발 간 등 록 번 호
11-1480523-004196-01

NIER-GP2020-121

National Institute of Environmental Research

National Aeronautics and Space Administration

한-미 협력 국내 대기질 공동조사 KORUS-AQ 최종 종합보고서

KORUS-AQ Final Science Synthesis Report



한-미 협력 국내 대기질 공동조사
KORUS-AQ 최종 종합보고서
KORUS-AQ Final Science Synthesis Report

Co-authors: James Crawford[1], 김용표[2], Alan Fried[3], Barry Lefer[4], Carolyn Jordan[5], 이강웅[6], Isobel Simpson[7], Jay Al-Saadi[1], 김준[8], 우정훈[9], Louisa Emmons[10], 조석연[11], 이태형[6], 박록진[12], 김대곤[13], 박진수[13], 최진수[13]

[1]NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, US

[2]Ewha Womans University, Seoul, KR

[3]University of Colorado, Boulder, Colorado, US

[4]NASA Headquarters, Washington, DC, US

[5]National Institute of Aerospace, Hampton, Virginia, US

[6]Hankuk University of Foreign Studies, Seoul, KR

[7]University of California, Irvine, California, US

[8]Yonsei University, Seoul, KR

[9]Konkuk University, Seoul, KR

[10]National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, US

[11]Inha University, Incheon, KR

[12]Seoul National University, Seoul, KR

[13]National Institute of Environmental Research, Air Quality Research Division, Incheon, KR

CONTENTS

1장 서론 8

2장 미세먼지 오염 18

3장 오존 오염 36

4장 배출 46

5장 대기질 모델링 71

6장 위성 원격 감지 78

7장 정책 제언 97

References 104

Appendix 114

이 보고서는 'KORUS-AQ Final Science Synthesis Report' 영문 보고서를 번역한 보고서로, 자세한 내용은 원문을 참고하십시오.

그림 1-1. KORUS-AQ의 연구 목표를 달성하고 지상, 항공 및 우주로부터 수집된 다양한 관점의 관측 결과 사이의 시너지 효과를 탐구하기 위한 관측 전략 개략도 나열된 각 자산에 대한 세부 정보는 본문에 제시되어 있음. ····· 11

그림 1-2. KORUS-AQ에서 실시한 지상 기반 관측에는 (a) 대기오염측정망을 구성하는 측정소 및 (b) 현장 관측(적색), Pandora 분광계(녹색) 및 AERONET 태양 광도계(청색)의 조합을 이용하는 연구 시설이 포함. 패널 (c)는 서울 수도권의 관측소 위치를 확대하여 보여줌. 이들 관측소에서의 지상 관측에 대한 자세한 내용은 부록의 표 1-4에 수록. ····· 12

그림 1-3. KORUS-AQ 항공기 각각의 비행 경로를 나타낸 Google Earth 이미지. 비행 접근에 영향을 미치는 특수 공역은 공항을 나타내는 원형 및 군사 작전 영역(흰색), 제한 영역(청록색) 및 금지 영역(자홍색)을 나타내는 다각형과 겹쳐져 있음. 하단에 위치한 그림은 서울 수도권 지역에서 각 항공기가 비행한 패턴을 확대한 것으로, 올림픽 공원(적색 원) 및 태화산학술림(녹색 원)의 위치가 표시되어 있음. 15

그림 1-4. KORUS-AQ 기간 동안 대기오염측정망 전역에 걸쳐 관측된 $PM_{2.5}$ 및 오존에 대한 일일 통계. 중앙값, 사분위수 범위, 그리고 5퍼센트 및 95퍼센트 수를 박스 위스커 플롯을 이용해 나타냄. 비행 일은 녹색으로 표시. 빨간색 선은 연구 시점에서의 대기질 기준을 나타냄. 정체기간(노란색) 및 지속적인 저수준 오염물질 이동(주황색)을 강조 표시했다. 1차 역학 주기와 차단 패턴은 검은색 화살표로 표시함. 각 패널 하단에 한랭전선 통과를 순차적으로 번호(F#)를 매겨 표시됨(그림 출처: Peterson 등, 2019). ····· 16

그림 2-1. 왼쪽 패널: 대기오염측정망 지도를 5개 지역으로 나눈 것. 서울 수도권(SMA)은 서울, 인천, 경기도를 망라함. 남동부 해안 지역에는 부산과 울산이, 남서부 지역으로는 광주와 제주도가 포함됨. 중부 지역은 '나머지 지역'으로 지칭함. 각 지역의 측정소 개수는 괄호로 표시. 오른쪽 패널: 왼쪽 패널에 표시된 5개 지역 각각에 대해 평균한 시간별 $PM_{2.5}$ 농도 시계열. 그림 상단에 4개의 주요 기상 시기에 대한 주석을 표시(그림 출처: Jordan 등, 2020). ····· 20

그림 2-2. KORUS-AQ 기간 동안 4개의 기상 기간에 대해 서울 KIST 지상 관측소에서 관측한 평균 PM_1 조성. 원형 차트의 크기는 해당 기간의 총 미세먼지 평균 농도에 따라 조정됨. 각 원형 차트에서 검은색으로 표시된 부채꼴 부분은 1차 미세먼지를 의미하며, 녹색으로 외곽선을 표시한 부분은 2차 미세먼지를 모두 망라함(그림 출처: Jordan 등, 2020). ····· 21

그림 2-3. 상단 패널: 캠페인 기간 중 KIST AMS 자료의 시계열 자료. 상단에 기상 기간이 주석으로 표시. 전체 KORUS-AQ 캠페인 중 PM_1 미세먼지의 대용물로 개별 성분(검은색)의 총합이 사용됨. 하단 패널:

올림픽 공원에서 측정한 시간별 PM_1 및 $PM_{2.5}$ 농도(그림 출처: Jordan 등, 2020 주요 본문 및 보충 정보). ····· 22

그림 2-4. KORUS-AQ 기간 동안 SOA 생성 계산. SOA 전구물질의 종류는 표 2-3에 정의. 단, 톨루엔은 1종 방향족(연한 자주색)에 속하나 별도로 표시. 오차 막대는 OA의 불확도를 나타냄.(±38%). (그림 출처: Nault 등, 2018) ····· 26

그림 2-5. 정체기간 및 상반기 이동/연무기간 동안 올림픽 공원에서의 T 및 RH의 시계열(상단 패널) 및 질산염과 황산염에 대한 ALW(하단 패널). ALW는 E-AIM 열역학 모델로부터 계산. 이동/연무기 동안 주간 기온이 감소한 것과 함께, 정체기간에 비해 이동/연무기 동안 낮과 밤 모두 RH가 증가한 것에 주의(그림 출처; Jordan 등, 2020). ····· 28

그림 2-6. KORUS-AQ 기간 동안 서울 대기오염측정망 관측소에서 시간당 평균 $PM_{2.5}$ 시계열(상단 패널). 시간별 평균 혼합층 고도(MLH) 시계열은 이전 24시간 동안의 MLH를 보여주는 24시간 연속 평균치와 함께 서울의 올림픽 공원에서 CL51 운고계를 이용해 측정(하단 패널). 하단 패널에는 오산 공군기지에서 오후 동안(현지 시간으로 오후 3시) 일일 측정을 통해 측정한 BL 깊이도 나타냄(그림 출처: Jordan 등, 2020). ····· 29

그림 2-7. KORUS-AQ 기간 동안 서울시 대기오염측정망 관측소에서의 시간당 평균 $PM_{2.5}$ 농도 시계열. CO/CO_2 기울기 중앙값은 DC-8 비행일 동안 서울 상공에서의 하강 프로파일로부터 계산된 값. CO/CO_2 기울기(중앙값 및 사분위수 범위)에 대한 통계치는 그 기울기가 유의한 상관관계(R^2>0.5)를 가지는 1분 자료 기간에 대해 표시됨. 부호의 크기는 CO/CO_2와 유의한 상관관계를 가지는 자료의 비율에 비례. 경계층(BL, 주황색 원) 및 자유 대류권 저층(LFT, 녹색 정사각형) 모두에 대한 통계치가 표시(그림 출처: Jordan 등, 2020). ····· 30

그림 2-8. a) 2016년 6월 1일부터 6월 30일까지 서울 중심지 및 서해 연안 대비 백령도 관측소(서울 중심지에서 북서쪽으로 약 210km)에서의 시간별 $PM_{2.5}$ 측정 시계열. b) 서울 중심지 평균과 해안 지역 평균 간 시간별 $PM_{2.5}$ 차이에 대한 시계열. $PM_{2.5}$ 수준이 가장 높은 날 중 일부, 특히 6월 22~23일과 6월 28일에 해안 지역보다 서울에서 훨씬 높은 값을 보이는 것에 유념할 것(그림 출처: Eck 등, 2020). ····· 32

그림 2-9. DC-8의 관측에 따르면 계산된 $H^+_{(미세먼지)}$ 농도와 SO_4^{2-} 농도 사이의 관계는 미세먼지 내 SO_4^{2-}의 형태에 따라 달라지는 것으로 나타남(왼쪽 패널). 질산염/황산염 몰비는 “암모늄 초과량”의 함수에 따라 증가(오른쪽 패널)(그림 출처: T.Park 등, 준비 중). ····· 34

그림 3-1. 서울 남동쪽 태화산 학술림 부근에서 DC-8이 52건의 고도별 관측을 진행하는 동안 관측한 오존의 수직적 분포. 상자는 1km 구간에 대해 개별 측정치의 중앙값과 사분위값을 나타냄. ····· 38

그림 3-2. 서울에서의 순 오존 발생량($P(O_3)$) 분포 모델링. 해당 VOC 유형을 제외했을 때의 계산값(각 패널의 주황색 선)과 모든 VOCs 전구물질을 포함한 "기준 사례" 계산(각 패널의 검은색 파선) 비교. 각 패널은 계산에서 제외된 VOC와 $P(O_3)$에서의 감소를 통합한 결과를 나타냄(그림 출처: Schroeder 등, 2020). ····· 40

그림 3-3. OPE, O_3, 및 NO_x 수명 변화 모의 값의 공간적 분포. 배출량 변화에 대한 반응으로 지표면에서의 a) OPE, b) O_3 수준 및 c) NO_x 수명 모의 값의 변화(조정된 배출 조건에서의 값에서 기본 조건에서의 값을 뺀 양)에 대한 공간적 분포를 나타냄. 주요 대도시권과 산업 지역은 각각 별과 원 모양으로 표시(그림 출처: Oak 등, 2019). ····· 42

그림 3-4. (a) 정체기간(C1), (b) 차단기간(C2) 및 (c-d) 이동기간(C3 및 C4) 등 다양한 기상 조건과 관련해 네 건의 고농도 O_3 발생 에피소드에 대한 O_3, $PM_{2.5}$, 구름량, 자외선(좌측 패널) 및 방향족, NO_x, HCHO 및 H_2O_2(우측 패널)의 일중 변동량. 비교를 위해 (e) 사례 미발생 조건도 제시(그림 출처: H. Kim 등, 2020). 44

그림 3-5. 오존 및 HONO 사이의 상관관계. 시간별 평균 자료(열린 원)는 음의 상관관계를 보여줌. 삼각형으로 표시한 HONO(아침에 발생) 및 오존(오후에 발생)의 일일 최대 수치는 양의 상관관계를 보여줌(그림 출처: Gil 등, 미발표). ····· 45

그림 4-1. 아시아(왼쪽) 및 한국(오른쪽) 지역의 NO_x 배출량에 대한 KORUS v5 모델 입력 배출량. ····· 48

그림 4-2. KORUS 배출량 모델링 버전 변화에 따른 중국(왼쪽) 및 한국(오른쪽)의 연간 평균 배출량 변화: (a) 무기 전구물질 (b) 유기 전구물질(Woo 등, 2020b, 준비 중). ····· 50

그림 4-3. KORUS-AQ 기간 동안 서울 대도시권 상공 저층에서 SO_2(왼쪽), NO_x(중앙) 및 톨루엔(오른쪽)에 대한 모델 시뮬레이션 결과와 DC-8 관측치 비교. 각 부호는 평균값을 나타냄. 각 고도에서 DC-8 관측치의 전체 범위는 박스 위스커 형식을 이용해 나타냄(중심선=중앙값, 박스=사분위수 범위, 선=10 ~ 90 백분위수). 각각의 고도 범위에 대한 통계에서 사용된 값의 수는 오른쪽에 표시. 회색 음영은 모델 값의 분포를 나타냄. ····· 51

그림 4-4. MAPS-Seoul 및 KORUS-AQ 캠페인 기간 중 측정 결과 함유량이 가장 풍부한 상위 15종의 VOC. 평균 혼합비를 기준으로 내림차순으로 표시함. (a) MAPS-Seoul 캠페인 중 2015년 5월 KIST에서의 지상 기반 자료(n = 23). KORUS-AQ 중 (b) 서울(n =177), (c) 대산(n =63) 상공에서의 저고도 항공

샘플(<0.5km) 및 (d) 중국(n=68) 풍하측 황해 저고도 상공에서 채취된 대기 샘플. 대산에서의 프로판 최고 농도(62.5ppbv)는 여기에 표시되지 않음(그림 출처: Simpson 등, 2020). ····· 54

그림 4-5. KORUS-AQ 중 (a) 톨루엔 및 (b) 카르보닐 황화합물(COS)의 공간적 분포. 톨루엔은 서울 수도권 상공에서 그 농도가 가장 높았던 반면(적색 점), 카르보닐 황화합물은 중국으로부터 유입된 공기에서 가장 풍부함. VOC 혼합비를 색상에 따라 표현함. KORUS-AQ 캠페인은 서울시를 중심으로 수행되었지만, 한국의 기타 주요 도심들 또한 VOC 배출 및 오존 오염의 영향을 받았음이 밝혀짐(그림 출처: Simpson 등, 2020). ····· 55

그림 4-6. (a) KORUS-AQ 기간 동안 서울 저고도(<0.5km) 상공에서 측정된 함유량 기준 가장 풍부한 VOC 상위 20종, (b) OH 반응속도 상수, (c) OH 반응성 선택된 방향족은 녹색으로 표시되고 선택된 알켄족은 주황색으로 표시. 패널(c)에 OH 반응성이 가장 높은 상위 4종의 화합물의 순위를 표시(그림 출처: Simpson 등, 2020). ····· 56

그림 4-7. (a) OH 반응성 계산(Simpson 등, 2020) (b) 광화학적 박스 모델링 계산(Schroeder 등, 2020)을 토대로 KORUS-AQ 기간 동안 서울에서 각 VOC 그룹이 O_3를 형성할 상대 가능성. 저분자량 알칸족은 C_2~C_3를, 고분자량 알칸족은 C_4 이상을 의미함(그림 출처: Simpson 등, 2020). ····· 57

그림 4-8. KORUS-AQ 동안 서울시 상공에서 측정한 선택된 VOC에 대한 소스 할당 결과. 색상으로 강조된 막대는 반응성 알켄(주황색) 및 방향족(녹색)의 주요 배출원을 나타냄(그림 출처: Simpson 등, 2020). ····· 59

그림 4-9. 2016년 6월 5일 오전 약 10시 50분(현지 시간) 약 300m 고도에서의 비행 경로. 대산 단지는 회색 음영으로 표시했으며, 가장 큰 규모의 개별 VOC 배출원의 크기는 연간 배출량(MT/year) 기준으로 나타냄. 각 비행 구간을 나타내는 부호의 색상과 크기는 DC-8에서 측정한 HCHO 농도에 따라 결정. 검은색 대형 화살표는 DC-8 바람 측정 분석 결과에 따른 평균 풍향(70.7^o ± 13.5^o) 및 풍속(4.5 ± 0.7m/s)을 나타냄. 여기서 오염물질 유출 경계는 ⭘ 기호로 표시했으며, 풍상측 유입은 ⭘ 기호로 표시(그림 출처: Fried 등, 2020). ····· 62

그림 4-10. (A) 대산에서의 연간 총 VOC 배출량 하향식 추정치 및 비교를 위한 상향식 인벤토리 추정치. 오차 막대는 측정 부정확성(1σ 수준)을 나타냄. **(b)** HCHO 및 4가지 주요 전구물질에 대한 유사한 분석. ····· 63

그림 4-11. 2016 KORUS-AQ 연구 중 대산의 VOC 배출 인벤토리 계산 요약(단위: MT/year) 인벤토리

값은 Woo 등 (2020b, 준비 중)으로부터 참고했으며, 다른 3가지 측정에는 1) Fried 등(2020), 질량 수지 접근법을 활용해 2016년 6월 2, 3, 5일 매연 기둥에 대해 DC-8에서 실시한 VOC 측정; 2) Cho 등(2020), HCHO 축적 및 손실에 대한 0-D 박스 모델 분석과 결합해 2016년 5월 22일 한서 킹 에어에서 실시한 HCHO 측정; 3) Kwon 등(2020), 여러 유기 전구물질로부터의 산출량을 가정하여 HCHO 순생성량에 대한 GEOS-Chem 시뮬레이션과 함께 GeoTASO 기기를 이용해 NASA B-200 항공기에서 실시한 HCHO 수직 기주농도 측정이 포함됨. 오차 막대는 각 하향식 측정에 대해 추정된 총 불확도(1σ)를 나타냄. ····· 64

그림 4-12. 대산 오염기단에 대해 3일의 샘플링 기간 동안 DC-8에서 수행한 샘플링 결과를 토대로 산출한 SO_2 연간 배출량 하향식 추정치. 6개의 측정치의 전체 평균은 13,000 ± 3,800MT/Yr(1σ 표준편차)다. 서산시(대산이 소재하고 있는 시 지역)에 대한 2016 CAPSS SO_2 배출 인벤토리는 3가지 범주로 나뉠 수 있으며, 여기에 속하는 항목은 이 지역의 SO_2 배출량의 97%를 차지함. ····· 66

그림 4-13. (A)**)** DC-8에서 샘플링을 실시한 한국 서해안 주변의 점 배출원(A: 현대제철, B: 당진 PP, C: 보령 PP, D: 서천 PP, E: 군산 IC) (b) 당진 PP 주변의 DC-8 비행 경로. SO_2 농도를 색상으로 표시함(빨간색 점: 70ppb 이상) (c) 근접 촬영한 당진 PP 굴뚝. 1~4번(파란색)은 기존 굴뚝을 나타내며 5~6번(빨간색)은 새로 추가된 굴뚝 설비를 나타냄. ····· 67

그림 4-14. 당진 PP에서 모델 및 Δ측정치의 상호 비교: (a) NO_x (b) SO_2 농도. '모델 1'은 1~4번 굴뚝만 포함되었을 때의 모델 계산값을 나타내며 '모델 2'는 6개 굴뚝 모두 포함되었을 때의 계산값을 나타냄. 'Δ측정치'는 DC-8 측정 지점에서 풍상측 및 풍하측 측정치의 차이를 의미함. X축은 매연 기둥 전체에 걸친 순차적 DC-8 측정 지점을 나타냄. 그래프의 파란색 음영 부분은 5~6번 굴뚝에서 추가로 배출된 양(즉, 모델 2 - 모델 1)을 나타냄(M. Park 등, 2020, 제출됨). ····· 68

그림 5-1. DC-8 항공기에서 관측한 해발 고도 별(bin, 검정색으로 표시) 서울 플룸 측정치(남서부 끝: 37.1°N, 127.05°E; 북서부 끝: 37.75°N, 127.85°E). 동일한 고도 bin 내 공존하는 WRF-Che(항공기 관측이 원래 시뮬레이션의 경우 빨간색, 2.13 × NO_x 배출 시뮬레이션의 경우 주황색으로 표시됨, 관찰에서 수직 상쇄). 정사각형 점은 중간 값을 나타냄. 직사각형은 25번째와 75번째 백분위수를 나타내며 양쪽의 짧은 선은 5번째와 95번째 백분위수를 나타냄. NO_2와 NO_y를 동시에 측정할 수 있는 경우 (a) NO_2, (b) NO_y, (c) NO_2–NO_y 비율을 비교한 결과(Goldberg 등, 2019 그림 인용). ····· 72

그림 5-2. 서울시, 부산시, 인천시, 광주시, 여수시, 강원도에 위치한 대기오염측정망 지상 측정소의 낮 시간 평균(8시간 평균) O_3(상부) 및 일간 $PM_{2.5}$(하부) 농도 시뮬레이션 및 관측 결과. 관측 결과는 검정색 실선으로, 개별 모델은 각각 다른 색상으로, 앙상블 모델 평균치는 빨간색 실선으로 표시. 모델 범위는

회색 그림자로 표시. 각 모델 및 앙상블 모델의 피어슨 상관계수(R), 정규화된 평균 편차(NMB), 평균 제곱근 오차(RMSE)는 좌측 상단 코너에 표시(R. Park 등, 2020 그림 인용). ····· 73

그림 5-3. 캠페인 기간 중 다양한 종관적 상황에 따른 지표면 공기의 PM_1 화학 성분의 평균 시뮬레이션과 관측 결과 비교. 각 화학 성분마다 다른 색상으로 표시되어 있으며 관측 결과는 한국과학기술연구원 지상 관측소AMS(127.045°E, 37.601°N)에서 제공. 가장 낮은 모델 레이어에서 얻은 모델 결과는 관측 결과와 함께 코히런트 샘플링이 적용(R. Park 등, 2020에서 그림 인용). ····· 75

그림 6-1. 2016년 6월 9일 GeoTASO의 NO_2(좌) 및 HCHO(우) 대류권 수직 기주농도 관측 결과. 이른 오전(위)부터 늦은 오후(아래)까지 일간 변화를 4회 관측(Judd 등, 2018에서 그림 인용). ····· 81

그림 6-2. 2016년 5월 17일 GeoTASO의 NO_2(좌) 및 HCHO(우) 대류권 수직 기주농도 관측 결과. 오전(위) 및 오후(아래)에 넓은 수도권 지역 영역에 걸쳐 관측(Judd 등, 2018에서 그림 인용). ····· 82

그림 6-3. 태화산 학술림 지역에서 측정 시간에 따른 NO_2, $HCHO/NO_2$ 기주농도에 대한 DC-8 관측 결과, 지상 및GeoTASO 및 위성 원격 측정, 모델 시뮬레이션 비교. 위에서 3번째 행까지는 DC-8, Pandora, GeoTASO, GOME-2B의 NO_2, HCHO, $HCHO/NO_2$ 비율, 그 아래 3개 행은 GEOS-Chem, WRF-Chem, CAM-Chem의 OMI 측정 결과 및 모델 결과(Koo 외 작성 중 논문에서 인용). ····· 85

그림 6-4. 충남 북부 지역에서의 GeoTASO SO_2 관측 결과 확대 모습. 이 지역에서 7회, 즉 (a) 5월 11일 08:58-11:23 LT, (b) 5월 17일 08:39-11:05 LT, (c) 5월 17일 14:10-16:31 LT, (d) 5월 22일 09:52-11:52 LT, (e) 6월 2일 10:19-11:47 LT, (f) 6월 5일 13:26-16:55 LT, (g) 6월 9일 07:48-11:51 LT 관측 결과. 이 지역에서 각 GeoTASO 비행 중 데이터로부터 수집한 평균 풍속 및 풍향은 노란색으로 표시. 이 지역에 대한 TMS(Stack Tele-Monitoring) 보고서에 나열된 SO_2 배출원 9곳은 번호가 매겨져 원과 삼각형으로 표시. 원은 2015-2017년 평균 SO_x 배출량이 1kt yr-1을 초과하는 SO_2 배출원을 나타내며 삼각형은 같은 기간 동안 평균 SO_x 배출량이 1kt yr-1 이하인 배출원을 나타냄. 각 원의 반지름은 2015-2017년 Stack TMS 기기가 각 시설에서 측정한 평균 SO_x 배출량의 로그값에 비례함. 번호가 매겨진 각 배출원의 배출 유형과 Stack TMS 보고서의 해당 3년 간 평균 SO_x 배출량이 표시되어 있음(지도는 Google Earth Imagery를 통해 생성됨.) (Chong 등, 2020 연구에서 그림 인용). ····· 87

그림 6-5. KORUS AQ 캠페인 기간 중 AHI 융합 AOD 평균(좌측 상단: 순환기간(dynamic period), 우측 상단: 정체기간(stagnant period), 좌측 하단: 이동기간(transport period), 우측 하단: 차단기간(blocking period))(Kim, Al-Saadi 등 작성 중 논문에서 그림 인용). ····· 89

그림 6-6. 2016년 5월 25일 서해 상 남북 절단면을 통한 소멸도(extinction) 수직분포의 항공 LIDAR 측정 결과 및 일 평균 GOCI AOD 관측 결과(Kim, Al-Saadi 등 작성 중 논문에서 그림 인용) ····· 90

그림 6-7. KORUS-AQ 기간 중 백령도, 올림픽 공원, 안면도 지역에서 AOD가 가장 높았던 5일(위)과 AOD가 가장 낮았던 5일(아래)의 기압면 고도 850-hPa에서의 바람 벡터 및 GOCI AOD 합성장(Lee 등, 2019에서 그림 인용).····· 91

그림 6-8. 2016년 (a) 5월 25일과 (b) 6월 5일 경도 0.25도 간격으로 측정한 서해 및 한반도(35–38°N, 123–128°E) 지역의 자오선 기준 관측위도대의 평균. 화살표는 850hPa에서 평균 바람장을 자오선 기준으로 나타낸 것(M. Choi 등, 2019에서 그림 인용). ····· 92

그림 6-9. (a) 2016년 5월 1일부터 6월 10일까지 부피 반경 중앙값의 AERONET 고도권 산출 결과 시계열과 서울 중심부에 위치한 연세대학교 관측소에서 675nm에서 측정한 AOD. (b) AERONET 크기 분포 산출 결과에는 주로 국지적인 배출원, 낮은 RH, 구름이 없는 상태를 보이는 정체 기간(5월 17, 18일)에 비해 오염 이동 기간(5월 25, 26, 31일)의 미세먼지 부피가 10배 증가. 이는 부분적으로 RH 수치가 높은 오염 이동 기간 동안 미세먼지의 수분이 증가하기 때문임(Eck 등, 2020에서 그림 인용).
····· 94

그림 6-10. 대기질에 대한 위성 관측 결과 적용의 프레임워크 ····· 96

표 2-1. KIST에서 측정된 PM_1 미세먼지 성분과 기상 파라미터 및 ALW. 본 수치는 괄호 안에 표시된 수의 항목 값에 대한 평균으로, 평균값 ± 표준 편차를 의미(표 출처: Jordan 등, 2020). ····· 24

표 2-2. 표 2-1의 각 기상 기간 동안 관측된 평균값과 캠페인 전체 기간에 대한 평균값 사이의 차이. 정체기간 및 이동/연무기간 동안, 캠페인 평균값으로부터 가장 큰 격차를 보이는 항목은 굵은 활자로 표시해 강조(표 출처: Jordan 등, 2020). ····· 25

표 2-3. 그림 2-4에서 사용된 화합물의 종 정의. 나열된 VOC는 모두 DC-8에서 측정됨(표 출처: Nault 등, 2018). ····· 27

표 3-1. GEOS-Chem의 배출 저감 시나리오에 대한 오존 화학반응 민감도(표 출처: Oak 등, 2020) ····· 42

표 5-1. KORUS-AQ 기간 동안 다양한 오염물질 및 측정지표에 따라 배출원이 한국 오염에 미친 영향[%] ····· 77

전체 개요

대기 오염도를 낮추기 위해 다양한 노력에도 불구하고 한국의 대기질은, 특히 초미세먼지($PM_{2.5}$)와 오존(O3)은 건강에 좋지 않은 수준이다. 현재의 대기질 관리 정책과 향후 성공적인 미래 전략 수립을 위해서는 현재 상황에 대한 면밀한 과학적 및 기술적 분석이 이루어져야 한다. 지상, 항공, 해양조사선, 위성 관측, 3-D 화학 수송 모델 등의 포괄적인 현장 연구를 통한 통합 연구는 전구물질 배출, 화학물질 생성, 수송, 증착 과정에 관련한 대기오염의 화학적, 물리적, 기상학적 측면을 이해하기 위한 과학적인 도구이다. KORUS-AQ는 최신 연구 방법을 활용하고 한국과 미국의 연구자들이 NIER와 NASA 간 긴밀한 파트너십을 통해 협력하여 한국의 대기질을 연구하는 최초의 공동 연구 프로젝트이다.

이 보고서의 목적은 연구 참여 전문가의 분석과 연구 결과로 심사를 거쳐 학술지에 개제된 논문을 기반으로 KORUS-AQ 기간 중 한국의 대기질을 이해하기 위한 과학적인 연구결과와 변화를 소개한다. 본 보고서는 2017년 발표된 KORUS-AQ 예비종합보고서(RSSR)를 대체하며 연구 기간 중 수집된 자료를 심층분석을 통해 새로 확보된 정보와 수정된 정보를 제공한다. 본 내용은 대중 및 정책 결정자들이 한국이 현재 직면하고 있는 포괄적인 대기질 문제를 파악하는 데 유용한 심층적인 설명과 과학적 정보를 제공하기 위한 것이다. 본 보고서의 각 장별 핵심 주제는 다음과 같다.

1) 미세먼지($PM_{2.5}$) 오염

- **$PM_{2.5}$ 오염의 주요 원인은 2차 생성으로, 이는 기상 패턴으로부터 큰 영향을 받는다.** 한국의 $PM_{2.5}$ 질량 대부분은 직접 배출(1차 배출)이 아니라 대기 중 전구 가스로부터 형성되는 물질(2차 생성)이 차지하고 있으며, $PM_{2.5}$의 양과 화학 성분은 주로 종관 기상학적 조건에 따라 변화한다.

- **$PM_{2.5}$의 유기물질 및 무기물질 성분은 종관기상 조건에 따라 달라진다.** 정체상태 동안에는 광화학(빛에 의한) 반응을 통해 국지적으로 배출되는 VOCs에서 주로 유기적 미세먼지(2차 유기적 미세먼지, Secondary Organic Aerosol, SOA)가 생성된다. 반대로, 월경성 이동으로 인한 전선 통과로 발생하는 기상조건에서는 비균질(가스-입자 변환) 반응으로 인해 주로 무기 미세먼지(2차 무기 미세먼지, Secondary Inorganic Aerosol, SIA)가 발생하여 높은 습도 조건과 중국발 대기 질량 이동의 증가와 함께 연무 발생과 지속을 촉진한다.

- **$PM_{2.5}$ 오염을 줄이기 위해서는 국지적으로 배출되는 NO_x 및 VOCs 배출량을 모두 줄여야 한다.** 국지적인 NOx 및 VOC 배출량(특히 반응성이 높은 C_{7+} 방향족) 감소는 SOA의 광화학적 생성을 촉진하는 건조한 정체 조건을 비롯해 SIA의 불균일 생성을 야기하는 습한 구름/안개/연무 조건에서

미세먼지의 2차 생성을 완화하는 데 일조하는 것으로 나타났다. 질산염 불균일 생성을 억제하기 위한 조치를 취할 경우 연무 현상의 규모와 지속을 줄이는 추가적인 이점이 있을 수 있다.

- **간단한 연소 효율 측정을 통해 중국이 한국의 대기질에 미치는 영향을 파악할 수 있다.** 현재 중국의 전반적인 연소 효율은 한국에 비해 현저히 낮다. 따라서 중국 대기 중 CO/CO_2 비율이 더 높다. 향후 배출량 변화를 지켜보아야 하겠지만 CO/CO_2 비율을 통해 월경성 영향과 지역 내 영향을 파악하는 유용한 지표가 될 수 있다.

2) 오존 오염

- **오존 오염의 원인은 주로 국지적인 배출이지만 지역 배경 오존도 증가하고 있다.** 수도권에서 국지적인 배출로 인해 생성된 오존이 크게 증가하고 있지만, 자유 대류권 하부의 배경 농도 중앙값이 지속적으로 무려 최대 80ppbv로 나타나 동아시아 전체에 걸친 더욱 광범위한 문제가 되고 있다. 따라서 오존 전구물질 배출을 해결하기 위해서는 한국뿐 아니라 주변국의 협력이 필요하다는 것을 보여준다.

- **방향족 탄화수소는 서울지역 오존 생성에 가장 중요한 VOC종이다.** 관측치에 기반한 민감도 계산 결과, 오존 생성에 있어 C_7+ 방향족이 지배적인 역할을 하며, 식생(식물)에서 자연 배출되는 이소프렌 등의 알켄 또한 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

- **NO_x 저감은 지역 범위의 오존 생성 제어에 핵심이지만 저감조치 초반에는 단기적으로 도시 지역 내 오존 수치가 높아질 수 있다.** NO_x를 저감하면 전체적인 오존 생성이 감소하지만 현재 NO_x 포화(VOC 제한) 상태에 있는 도시 지역의 오존 생성 효율이 높아지게 된다. 따라서 NO_x 감소율이 도시 및 지방 모두에 도움이 될 만큼 증가할 때까지는 VOC 저감이 단기적인 오존 증가를 완화하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

3) 배출원

- **한국 배출량의 정확도가 업데이트 되어 많이 높아졌다.** KORUS-AQ 연구 기간 동안 관측한 정보 및 KORUS-AQ 연구 결과를 바탕으로 한 모델링의 피드백에 따라 KORUS 배출량을 개발하였다. 하향식(Top-down) 배출량 추정은 특히 배출량의 차이를 파악하는 데 중요하다. 그러나 배출원 목록 최신화는 정책의 연결성 유지를 위해 새로운 에너지 정보, 시간 할당 대체, 화학종 프로파일 등의 상향식 정보에 기반하고 있다.

- **방향족과 알켄의 주요 배출원은 용매와 교통 배출인 것으로 확인되었다.** 방향족과 알켄은 서울지역 국지적인 오존 발생 화학반응에 가장 큰 역할을 하는 VOCs로 확인되었다. 관측 기반 분석에 따르면 용매는 서울 내 방향족의 주요 배출원이며 방향족 페인트 및 비도료 방향족 배출원 모두가 VOC 저감에 중요한 요소인 것으로 확인되었다. 교통은 에텐과 같은 알켄의 주요 배출원이었다.

- **석유화학 배출원은 뚜렷한 화학 조성을 가지고 있다.** 대산 석유화학 단지의 VOCs 혼합물은 서울과 다르게 나타났다. 예를 들어 서울은 톨루엔 수치가 높은 반면 대산은 벤젠 수치가 높았다. 대산 단지에서 배출되는 주요 VOC 종은 주로 에탄, n-헥산, 프로판, 벤젠이었다.

- **대산의 VOC 배출량은 상당히 과소평가되고 있다.** 대산 석유화학 단지의 VOC 배출량을 3가지 독립적인 접근 방식(질량 균형, GeoTASO, 측정 기반 0-D 박스 모델)으로 하향식 추정한 결과에 따르면, 대산 VOCs에 대한 기존의 상향식 목록은 2.5 - 4.0배 정도 낮게 과소평가되고 있다. 또한 대산 포름알데히드 및 4가지 주요 전구물질(에탄, 프로필렌, 1,3 부타디엔, 1 부텐)의 하향식 추정치는 상향식 목록에 비해 4.3 ± 1.5배 정도 낮게 과소평가된다. 이러한 결과는 대산에만 해당하지만 한국의 석유화학 단지 배출량이 전체적으로 과소평가되고 있는 것은 아닌지 의문을 가지게 한다.

- **NO_x 및 SO_2의 점 배출원을 포함한 배출 목록은 비교적 정확하게 작성되어 있으며 불확실성이 낮다.** 이산화황과 질소산화물 배출량의 하향식 추정치는 개선된 상향식 목록과 일치한다. NASA DC-8 측정치에 따르면 특히 NO_x와 SO_2 점 배출원에 대한 일치율(하향식/상향식)이 각각 0.8 - 1.3과 0.7 - 10으로 우수하다.

- **대산의 유해 대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs)로 인한 위험에 더욱 주목해야 한다.** 대산의 VOCs 배출량이 크게 과소평가되고 있다는 사실은 HAPs(1,3 부타디엔, 벤젠, 포름알데히드 등)의 존재로 인해 더욱 큰 우려를 낳고 있다. DC-8 항공기를 통해 서해 풍하지역 상공 수십 킬로미터 거리에서 과다한 양의 유해 화합물을 관측했다. 이러한 오염물질은 단지 근로자의 건강 문제와 해상풍의 영향을 받는 지역 주민에게도 위험을 초래한다.

4) 대기질 모델링

- **대기질 모델링은 배출원 목록을 개선하는 중요한 도구이다.** 원격감지 및 현장측정과 모델링을 결합하여 한국의 인위적 배출원 평가에 사용하였다. 초기 배출 목록으로 시뮬레이션한 결과, 관측 결과에 비해 NO_x 배출량이 40-50% 증가했으며 방향족 VOCs 배출량에 차이가 있었다. 이러한 모델-관측 간 차이는 업데이트된 인벤토리에 대한 상향식 자료를 통해 조사 및 수정되었다.

- **오존 및 PM 수준을 줄이기 위한 전략을 찾기 위해 다양한 조건에서 테스트 되었다.** 다양한 종관 패턴에 따른 PM 및 오존의 화학적 특성을 분석하여 전국적으로 PM 및 오존 생성의 NO_x 및 VOCs 의존성을 확인하였다. 모델을 통해 대기질 화학작용의 민감도를 연구한 결과, 국지적인 NO_x와 VOC 배출량을 동시에 저감하면 특히 대도시권에서 $PM_{2.5}$ 및 O_3 오염 개선하는 데 도움이 되는 것으로 확인하였다.

- **해당 지역의 공기질이 교통량에 얼마나 영향을 받는지에 대한 정량적 영향을 알아보기 위해서는 계층 모델이 필요하다.** 개별 모델은 물리적 및 화학적 작용을 모사함에 있어 다양한 범위(지역적 범위부터 세계적 범위까지), 해상도, 복잡성과 관련된 강점과 단점을 가지고 있다. 따라서 여러 모델을 앙상블로 사용하면 여러 개별 모델에 비해 관측 결과를 더욱 효과적으로 재현하여 더욱 정확한 답을 얻을 수 있다. 또한 모델은 국지적 영향과 지역적 영향에 대한 다양한 추정치를 제공한다.

5) 원격 측정

- **KORUS-AQ를 통해 고유한 방식으로 원형 GEMS 관측 결과를 테스트할 수 있었다.** GeoTASO 장비를 탑재한 NASA King Air는 GEMS로 측정 될 NO_2와 HCHO를 규칙적인 그리드 패턴으로 비행하여 하루 최대 4회에 걸쳐 공간 해상도가 높은 최초의 맵을 작성하였다. 이 자료는 수도권 오존 및 에어로졸 형성에 대한 주요 전구물질 분포가 공간 및 시간에 따라 크게 변동하는 모습을 최초로 보여주었다.

- **항공 및 위성 원격 측정은 대형 점 오염원 배출량을 추적하는 데 특히 유용했다.** GeoTASO 센서의 SO_2 수직 기주농도 관측 결과는 서해안, 특히 충청남도 북서쪽 해안의 점 오염원에서 배출되는 SO_2의 2차원 사진을 보여주었다. 대산 단지에서 발생한 SO_2 플룸이 배출원에서 1km 이동 시 1/e배 감소된 상태로 경기도 남부까지 도달한 경우가 있었다.

- **GEO 위성은 PM의 지역 간 장거리 이동을 모니터링 하는 데 유리하다.** KORUS-AQ 기간 동안, 여러 위성 센서가 정확도가 높은 AOD 관측 결과를 제공하여 동아시아 지역의 공간-시간별 미세먼지 분포를 모니터링 할 수 있었다. GOCI AOD에 바람장이 합성된 이미지를 보면 중국 중동부에서 이류되어 서해상공에 위치한 높은 농도의 미세먼지 플룸의 수직 기주농도 전체에 걸쳐 미세먼지가 크게 증가한 것을 명확히 확인할 수 있었다.

- **GEMS는 아시아 대기질 모니터링의 새 시대를 열어 줄 것으로 기대된다.** 한국에서 자체 개발한 GEMS(2020년 2월 19일 발사)는 동아시아 전체에 걸쳐 미세먼지, 오존, 전구물질(NO_2, SO_2, CH_2O, CHOCHO)의 기주농도에 대한 세부적인 지도를 제공한다. 대기질 예보, 하향식 배출량 추정, 자료 동화, 공공 서비스 등 여러 분야의 다양한 과학적 측면의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

6) 정책 제언

- **$PM_{2.5}$와 오존 오염은 NO_x와 VOC를 동시에 저감해야 한다. 특히 고분자(C_7 이상) 방량족 화합물이 중요하다.** NO_x와 VOC를 감소시키면 $PM_{2.5}$ 농도가 개선되지만 NO_x와 VOC 사이의 저감률이 오존의 관점에서 중요하다. NO_x가 VOC보다 빠른 속도로 감소하면 특히 도시 지역의 오존 농도 수치가 증가할 가능성이 크다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서는 장기적인 관점에서 지속적인 저감을 통해 목적을 이룰 수 있다는 믿음과 지속성을 가지는 것이 중요하다.

- **효과적인 저감대책을 수립할 수 있도록 탄소 7개 이상을 가진 방향족 화합물에 대한 특정 발생원을 결정(확정)해야 한다.** 서울 및 한국의 다른 도시 중심에서 발생원 시료채취를 수행하면 저감 대상으로 삼아야 하는 최우선 순위인 특정 VOC 제품을 식별하는 데 도움이 될 수 있다. 이러한 정보가 없다면 의미 있는 VOC 저감을 달성하기가 어려울 것이다.

- **산업 시설 점 오염원의 VOC 배출이 크게 과소평가되는 것에 대한 정밀 조사와 검증이 필요하다.** 대산에서의 오차로 인해 전국에서 그 차이의 정도에 상관없이 유사한 과소평가가 이루어지는 것인지에 대한 의문이 제기된다. 점 오염원에 대한 하향식 항공 관측은 이러한 정도를 파악하는 가장 효율적인 방법이다.

- **의사 결정을 지원하기 위해 불확실성을 효과적으로 재현하고 이해하기 위해서는 대기질에 대한 모델 시뮬레이션에 모델의 계층 구조를 적용해야 한다.** 배출 억제에 관한 정책을 지원하고 대기질 예보를 개선하기 위해서는 지속적인 모델 개발을 통해 개별 모델에서 오존과 2차 미세먼지 형성을 더욱 정확하게 시뮬레이션 할 수 있도록 해야 한다.

7) 향후 방향

- **모니터링 투자:** 광역적인 대기오염측정망과 GEMS의 시간별 모니터링뿐 아니라 GOCI-II까지 한국은 전례없이 다양한 정보를 보유하고 아시아 전역에 걸쳐 더 큰 지역 내 영향력을 행사하게 될 것이다. 서울 지역 측정에 대한 최소한의 추가 투자로도 1년 내내 대기질 변화를 해석하기 위한 양질의 정보를 확보할 수 있다. 이러한 정보는 다음과 같다.
  - 한국과 중국 간 연소 효율의 큰 차이에 따른 월경성 영향의 강도를 분석하기 위한 고해상도 CO 및 CO_2 측정 결과
  - 국지적인 2차 미세먼지 생성률의 변화에 대한 이해를 증진하기 위한 미세먼지 성분의 지속적인 연구 수준의 모니터링

- 연무 발생의 원인이 되는 화학물질과 기상 작용에 종합적인 이해를 위해 필요한 미세먼지 내 수분량을 계산하기 위한 습도가 높은 상태와 건조한 상태의 미세먼지 산란 관측 결과
- 무기 미세먼지 형성, 미세먼지 산도, 관련 미세먼지 반응 경로 분석을 완전히 통제하기 위한 고품질 암모니아 측정 결과

마지막으로, 혼합층 운동이 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 영향을 확인하기 위해, 기존에 운영되고 있는 운고계 네트워크에서 제공하는 실시간 혼합고 자료 결과가 개선되어 지표면 근처의 오염물질 혼합 및 확산의 일별 주기에 관한 정보를 지속적으로 수집되어야 할 것이다.

- **NIER-NASA MOU:** 2018년 12월, NIER와 NASA는 "오염 연구, 교정, 검증 협력"에 관련한 양해 각서를 체결했다. 이 협약은 대기질 예보를 위한 정보를 제공하고, 이해를 증진하며, 의사 결정에 가치를 더하기 위해 GEMS와 TEMPO 관측 결과의 교정과 검증, 그리고 더 중요하게는 위성으로부터 수집한 정보의 해석에 있어 미국과 한국 간 지속적인 협력을 약속하는 협약이다.

- **PAN(Pandora Asia Network):** 최근 PAN이 구축되면서 Pandora 분석기를 GEMS 관측 지역 내 모든 국가에 배치할 수 있게 되었다. 이는 PGN(Pandora Global Network)에 가입한 아시아를 비롯한 전 세계 국가 간 협력을 확대하는 데 매우 중요하다. 이러한 노력은 과학계의 협력을 도모하며, KOICA와 UNESCAP(United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific)의 후원을 통해 PAN는 아시아 전역의 대기질에 미치는 국지적 및 공동의 영향에 대한 논의와 의사 결정권자들의 참여를 유도한다.

- **지속적인 현장 연구의 필요성:** GEMS 검증을 위한 GCAS를 이용한 관측 비행이 이미 진행 중이다. 지상 관측소와 항공기에서의 현장 샘플링을 비롯한 기타 다른 집중측정기간은 GEMS 관측 결과, 모델 테스트, 배출량 검증에 있어 매우 유용할 것으로 보인다. 장기적으로는, 현장 연구 협력을 위한 지속적인 연구와 논의를 통해 한국과 미국의 과학자들이 각 국가의 목표를 달성하기 위해 노력하면서 배출량 및 그로 인한 대기질의 변화 추이를 분석할 예정이다.

8) 감사의 말씀

KORUS-AQ의 연구 결과를 명확하고 간결하게 소개하는 데 있어 본 보고서의 신뢰성을 확보할 수 있도록 해 준 모든 기여와 지원에 감사드립니다. 먼저, KORUS-AQ 관측 결과를 수집하고 통찰력 있는 분석과 해석을 제공하기 위해 노력과 노고를 아끼지 않은 KORUS-AQ 과학팀 구성원 분들께 감사드립니다.

우리는 또한 KORUS-AQ 연구를 가능하게 한 한국 국립환경과학원과 미국 NASA의 중요한 헌신과 프로그램 지원에 대해 감사를 표합니다. 복잡한 한국의 영공에서 연구 비행을 수행하기 위해서는 민간 및 군 항공 교통관제사의 추가 지원과 협력이 필수적이었습니다. 항공기와 염구팀을 배려해 준 오산 공군 기지에 특별히 감사드립니다. 마지막으로, 우리의 연구 계획을 평가하고 이번 국제 협력이 성공적으로 마무리될 수 있도록 기여해주신 미대사관과 한국 기관들에 감사의 말씀을 드립니다.

1장 서론

1.1. 배경

대기질은 전 세계적으로 근본적인 중요성을 가지는 환경 이슈다. 대한민국(한국)의 대기질은 지난 40년 동안 개선되어 왔지만 여전히 대부분의 선진국에 비해 열악한 상태다. 대기오염물질 기준 가운데 특히 미세입자는 한국뿐 아니라 중국을 비롯한 동북아 전역에서 심각한 우려를 낳고 있다. 또한, 한국은 지난 20년간 오존 수치가 증가해왔다. 미세먼지 오염에 대한 대중의 관심과 우려가 높아지면서 한국 사회와 일상 생활의 모든면에 영향을 받고 있다. 한국의 사회경제적 틀 속에서 미세먼지에 대한 가장 효과적인 해결책을 찾고 정책을 마련하기 위해서는 미세입자의 배출원과 그 경로를 이해하는 일이 필수적이다.

배기가스 배출 환경은 인구, 에너지 사용 및 산업 활동의 변화에 따라 계속해서 변화하므로, 대기질을 모니터링하고 이해하기 위해서는 지속적인 노력이 필요하다. 대기질 목표는 건강에 미치는 영향에 대한 이해가 향상되고, 대기의 오존, 미세 입자 및 기타 독성 오염물질에 대한 인간과 생태계의 노출에 대해 더 높은 목표를 설정하는 이점이 증명됨에 따라 대기질 목표도 발전해왔다(예: WHO 1987, 1995, 2000, 2006; Bachmann 2007). 과거, 대기질이 열악한 지역에 대한 원인 분석 활동은 오염 저감 전략 개발을 위한 모델링과 함께 주로 지상 기반 관측에 의존했다. 그러나 최근 몇 년 동안 한국에서는 대기오염물질의 관측 및 배출 인벤토리에 대한 더 양질의 자료를 요구하는 대중들의 촉구가 있었다. 또한 한국에서 관측된 대기오염물질의 외부 기여도에 대해 활발한 논의가 진행되었다. 외부 기여도에 대한 신뢰할 수 있는 추정치를 얻기 위해서는 항공 측정 및 원격 탐지 관측을 포함한 입체적 관측이 필요하다.

최근 몇 년 동안 저궤도(LEO: Low Earth Orbit) 위성은 대기질에 영향을 미치는 주요 구성 성분을 관측할 수 있는 역량을 보유한 것으로 입증되었다. 그러나 LEO 위성은 낮은 관측 빈도(대략 하루에 1회) 및 낮은 해상도(수평 척도로 수십 킬로미터)로 인해 하루 동안 전개되는 대기질 조건을 제어하는 배출원 분포 및 화학적 변화를 분석하지 못하므로 한계를 가지고 있다. 이러한 한계는 매일 전 세계를 높은 해상도(3.5 x 5.5km^2)로 관측하는 TROPOMI의 출시로 최근 개선되었다. 이러한 기술을 통해 특정 점 오염원 및 정밀한 도시 배출원 분포를 확인하는 일이 가능해졌다(Beirle 등, 2019, Goldberg 등, 2019). 하루 중 배출, 이동 및 화학 상태의 변화 과정 전반을 좀 더 연속적으로 관측하기 위한 추가 요건을 만족시키기 위해서는 정지궤도(GEO: Geostationary) 관측이 필요하다. GEO의 단점은 시야 범위가 제한적이므로 단일 위성으로는 전지구적 관측이 어렵다는 점이다. 이로 인해 북반구, 즉 아시아, 북미, 유럽의 주요 인구 밀집 지역의 대기질을 중점적으로 관측하는 군집위성을 발사하기 위한 국제적인 활동이 이어졌다.

이러한 정지궤도위성들은 하루 종일 10킬로미터 이상의 수평 해상도로 해당 지역에 대해 시간별 관측치를 제공한다.

군집위성 방식에서는 특히 위성 보정 및 검증을 위한 일반적인 전략과 관련하여 친밀한 공조가 요구된다. 위성 관측 결과의 해석을 비롯해 위성 정보를 기존 지상 모니터링과 통합하기 위한 모범 사례에 대한 공동 연구 또한 필요하다. 이러한 협력의 필요성은 한미 대기질 공동연구(KORUS-AQ: Korea-United States Air Quality)의 체결에 중요한 역할을 했다. 이 연구는 아시아와 북아메리카의 대기질에 대한 정지 위성 관측을 담당하는 두 기관, 즉 한국 국립환경과학원(NIER: National Institute of Environmental Research) 및 미국 항공우주국(NASA: National Aeronautics and Space Administration)이 공동으로 후원했다. 또한 정부, 학술, 민간 부문에 걸친 수십 개의 연구기관 과학자들로 구성된 연구단이 조직됨으로써 보다 폭 넓은 공동체가 참여했다.

KORUS-AQ가 한반도 주변에서 수행된 데는 다른 이유도 있다. 가장 중요한 이유는 한국이 시급한 주의를 요하는 대기질 상황에 직면하고 있다는 인식 때문이다. 아시아 태평양 연안에 자리잡고 있는 한국은 대기 조성에 큰 변화가 존재하는 독특한 위치를 점하고 있다. 한반도는 주변 수역으로 뚜렷이 분리되어 있으므로 적절한 기상 조건 하에서 풍상측 영향 및 풍하측 유출을 평가할 수도 있다. 또한 한국 내에서도 흥미로운 대기 조성 변화가 존재한다. 서울시와 주변 수도권(서울 수도권, SMA: Seoul Metropolitan Area)은 한국의 북서쪽 모서리 부분을 차지한다. 이 지역은 국토 면적의 12%에 불과하지만 전체 인구의 대략 절반에 해당하는 2500만 명이 거주하고 있다. 한국 북서부 해안의 산업 활동 및 발전소와 함께, 한국에서는 상대적으로 작은 지역에서 높은 비율의 오염물질이 배출된다. 이는 광역도시, 국가 및 지역 수준에서 대기질을 조사하기에 이상적인 환경을 제공한다.

한국에서는 '대도시 대기오염연구-서울(MAPS-Seoul: Megacity Air Pollution Studies–Seoul)'이라는 현장 조사를 위해 2015년 5월부터 6월까지 현장 관측을 포함한 과학 연구 프로그램이 실시되었다. SMA를 중심으로 한 MAPS-Seoul에는 원격 센서 및 위성 센서 사용과 대기질 모델링이 포함된다. MAPS-Seoul의 주요 목표는 SMA에서 오존(O_3)과 공기역학적 직경이 2.5μm($PM_{2.5}$) 이하인 입자상 물질에 초점을 맞춰 2차 화학 과정 및 이동 과정에 의한 오염을 연구하는 것이다. MAPS-Seoul은 또한 KORUS-AQ 캠페인에 앞서 예비 시험 연구의 역할을 하기도 했다.

KORUS-AQ 현장 조사는 2016년 5월부터 6월까지 실시되었다. KORUS-AQ 연구 시기는 늦봄부터 초여름까지 장마전 기간에 초점을 맞췄다. 미세 입자상 물질과 관련된 오염은 연초인 늦겨울과 초봄 동안 정점에 달하지만, 장마전 기간은 오존과 미세 입자 오염 사례가 모두 발생할 수 있는 광화학적으로 가장

활발한 기간과 관련된다. 또한 3월부터 4월 사이에는 월경성 이동이 극대화되므로, 장마전 기간 동안에는 지역 내 배출이 미치는 영향을 좀 더 집중적으로 관찰할 수 있다.

연구 종료 후, 2017년 7월 KORUS-AQ 예비종합보고서(RSSR: Rapid Science Synthesis Report)가 발간되어 향후 심층 분석을 통해 최종 확정될 중요한 예비 연구 결과가 한국의 정책 결정자들에게 제공되었다. KORUS-AQ RSSR에서는 다음 다섯 가지 질문에 대한 예비 답변이 제공되었다.

질문 1: A) 서울 등 수도권 지역과 한반도 전역에서 2차 생성으로 발생한 미세먼지의 양과 B) 미세먼지의 변동에 영향을 미치는 주요 오염원 및 요인을 파악할 수 있는가?

질문 2: 서울의 오존 발생은 NOx 때문인가 아니면 VOCs 때문인가? 오존 생성에 있어 유기물에 의한 생성과 자연 생성의 차이를 구별할 수 있는가?

질문 3: 현재의 배출량 및 부문별 대기오염물질 배출 자료 산정결과(예: NO_x, VOCs, SO_2, NH_3)를 확인하는 데 KORUS-AQ 관측 결과가 얼마나 도움이 되는가?

질문 4: 서해안 인근의 대규모 점 오염원은 시간 및 공간적 측면에서 수도권 지역의 대기질에 얼마나 영향을 미치는가?

질문 5: 서울은 지역 내, 아시아 대륙 또는 북반구로부터 유입된 오염물질의 영향을 얼마나 받는가?

본 KORUS-AQ 최종종합보고서(FSSR: Final Science Synthesis Report)에서 논의 및 요약된 결과와 권고 사항은 출판되었거나 곧 심사를 거쳐 학술지에 발표될 분석을 토대로 한 것이다. 따라서, KORUS-AQ FSSR은 앞서 2017년에 발간된 KORUS-AQ RSSR에서 제공된 초기 피드백에 대한 중요 업데이트 사항을 제공한다.

이 보고서의 각 장에서는 미세입자 오염(2장), 오존 오염(3장), 배기 배출물질(4장), 대기질 모델링(5장), 위성 원격 탐지(6장) 및 정책 권고 사항(7장)에 대한 KORUS-AQ 연구 결과와 과학적 소견을 제공한다. 본 장의 나머지 부분에서는 연구 중에 수집된 관측 결과, 연구 비행 실시, 대기질 조건 및 기상학적 상태에 대한 개요를 제공한다. 이러한 세부 정보는 이후 장에서의 논의를 위한 중요한 배경 정보를 제공한다.

1.2. 관측 자산

KORUS-AQ 연구는 2016년 5월 2일부터 6월 10일까지 실시되었다. 본 연구에서는 2020년 초 아시아에서 정지궤도 환경위성탑재체(GEMS: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer)의 발사로 실현된 정지궤도 위성 관측과 대기질 네트워크 운용 및 대기질 모델 간의 시너지 효과를 탐구하기 위해 다양한 관점의 관측 전략을 구현했다. KORUS-AQ의 관측 전략을 그림 1-1에 개략적으로 나타냈다. 그림 1-1은 관측 자산뿐만 아니라, 이러한 자산이 한국의 대기질에 관한 기초 과학을 다루는 데 어떻게 사용되었는지 보여준다. 더불어 모델 평가 및 개선을 위해 관측 자산이 사용된 방법을 보여주며, GEMS 관측 결과의 검증 및 해석을 위한 전략 개발에 관측 자산이 어떻게 기여했는지 또한 보여준다. 심층 관측 자료는 3대의 항공기, 2곳의 집중측정소(올림픽 공원 및 태화산 학술림) 추가 지상 관측 보강 및 2대의 선박으로부터 수집되었다. 특히 항공 관측에서 수집된 관측 결과 데이터를 설명하기 위해 다양한 대기질 모델이 활용되었다. 그림 1-1에 열거된 자산에는 한국의 정지궤도 해양관측위성(GOCI: Geostationary Ocean Color Imager, 또는 천리안해양관측위성), 일본의 히마와리 위성(AHI: Advanced Himawari Imager), 미국, 네덜란드, 핀란드가 공동 관리하는 오존 모니터링 기기(OMI: Ozone Monitoring Instrument) 등 기존 위성 장비도 포함된다. 이러한 기존 우주 기반 자산으로부터 수집된 정보는 캠페인 중 계획 수립 및 캠페인 후 KORUS-AQ 관측 결과 분석 및 해석 모두를 뒷받침했다.

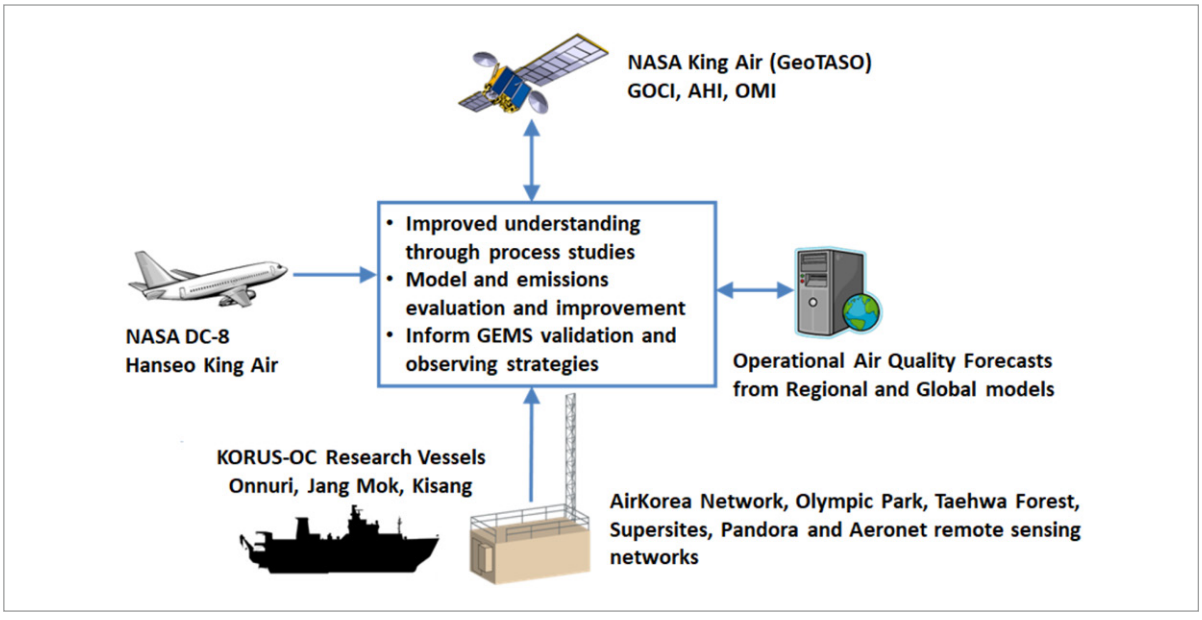


그림 1-1. KORUS-AQ의 연구 목표를 달성하고 지상, 항공 및 우주로부터 수집된 다양한 관점의 관측 결과 사이의 시너지 효과를 탐구하기 위한 관측 전략 개략도 나열된 각 자산에 대한 세부 정보는 본문에 제시되어 있음.

1.2.1 지상 관측

KORUS-AQ를 뒷받침하는 지상관측은 지표 대기질 환경의 직접 측정을 실시하고 이에 대한 핵심적인 연속 기록을 제공했다. KORUS-AQ 관측을 위한 관측소는 대기오염측정망(AirKorea monitoring network, https://www.airkorea.or.kr/eng)에서 제공했다. 한국 환경부가 주관하고 NIER이 시행하여, 한반도 전역에 걸쳐 300곳 이상의 관측소에서 미세 입자상 물질 및 오존을 포함한 기준 오염물질에 대한 시간당 관측치가 수집되었다(그림 1-2a 참조). 이러한 운영 모니터링 시스템은 서울 올림픽공원 및 태화산 학술림에 위치한 측정소를 통해 보완되었다(그림 1-2c 참조). 또한, 한반도 전역 및 백령도와 제주도의 여러 지점에서 추가적인 지상 관측 보강이 이루어졌다. Pandora 분광계 및 AERONET 태양 광도계 네트워크(그림 1-2b 참조)는 지상기반 원격 탐지에 대해 지표면 현장 관측치와 위성에 의해 관측된 원격 탐지 결과 사이의 격차를 메우는 데 유용한 추가 요소를 제공한다. 또한 KORUS-OC(Ocean Color)라고 부르는 해양 대기에 중점을 둔 관련 활동의 일환으로, 세 척의 연구 선박(그림 1-1 참조)으로부터도 관측치가 수집되었다. 각 연구 관측소 및 선상에서의 측정에 대한 자세한 내용은 부록의 표 3에 수록되어 있다.

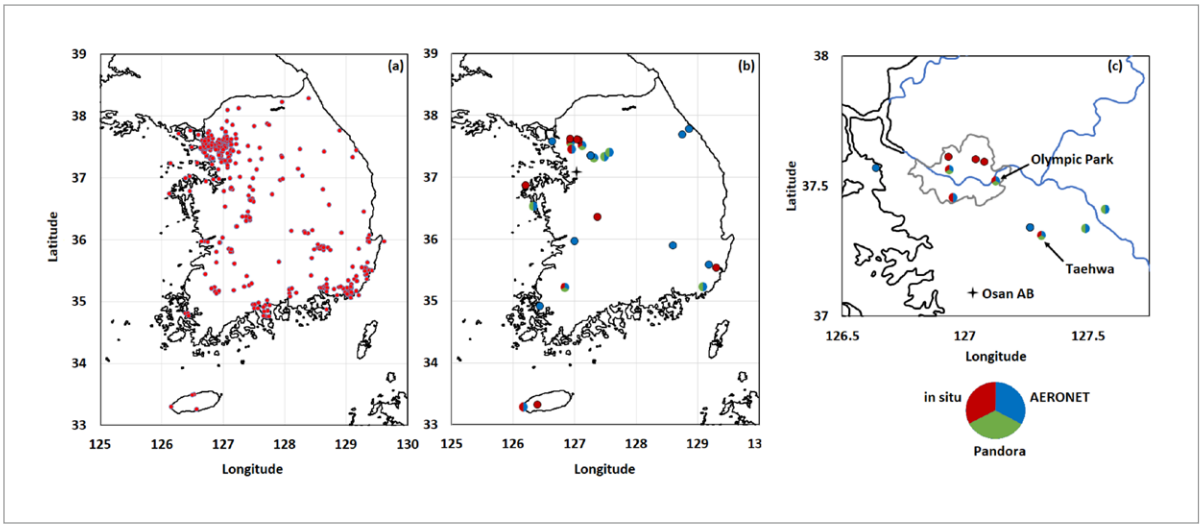


그림 1-2. KORUS-AQ에서 실시한 지상 기반 관측에는 (a) 대기오염측정망을 구성하는 측정소 및 (b) 현장 관측(적색), Pandora 분광계(녹색) 및 AERONET 태양 광도계(청색)의 조합을 이용하는 연구 시설이 포함. 패널 (c)는 서울 수도권의 관측소 위치를 확대하여 보여줌. 이들 관측소에서의 지상 관측에 대한 자세한 내용은 부록의 표 1-4에 수록.

1.2.2 항공 관측

KORUS-AQ에는 올림픽 공원에서 남쪽으로 대략 50km 떨어진 오산 공군기지에서 비행을 실시한 연구용 항공기 세 대가 포함되었다(그림 1-2c 참조). 각 플랫폼의 구체적인 역할은 아래에 설명되어 있다. 각 항공기에 대한 조사 담당자, 관측 장비 및 관측량에 대한 자세한 내용은 부록의 표 5에 수록되어 있다.

NASA DC-8: 세 대의 항공 플랫폼 중 가장 큰 플랫폼으로서 미량 기체와 미세먼지 조성의 현장 샘플링을 위한 포괄적인 장비를 탑재했다. 원격 탐지 기능에는 광화학반응 속도 진단을 위한 화학선 플럭스 측정, 항공기 상하부의 오존 및 미세먼지에 대한 능동적 원격 탐지, 그리고 항공기 상부 미세먼지의 광학적 깊이와 수증기, 오존 및 NO_2의 미량 기체량에 대한 수동적 원격 탐지가 포함된다.

한서 킹 에어(Hanseo King Air): 본 현장 플랫폼은 좀 더 소규모 장비로서, 위성 및 지상 기반 원격 센서를 이용해 감지할 수 있는 미량 기체 중 주요 기체군 (오존, NO_2, SO_2, CO, CH_2O, CH_4, CO_2 및 수증기)을 측정하기 위한 장비를 탑재하고 있다.

NASA 킹 에어(NASA King Air): 이 항공기는 특별히 NO_2, CH_2O 및 오존의 원격 탐지를 위해 설계되었다. 연구 지역의 지상 관측소 및 현장 항공기 상공을 비행하며 정지궤도 위성으로부터 예측할 수 있는 대기질 위성 관측을 위해 아날로그 신호를 제공했다.

이 세 대의 항공기 외에도, 또 다른 항공기가 같은 기간 허베이 성의 싱타이 인근 화베이 평원 위를 비행했다. 아시아 대기 화학 연구(ARIA: Air Chemistry Research in Asia)로 불리는 이 연구에서는 터보프롭 Y-12 항공기를 이용해 중요 풍상측 배출원 지역에 대한 귀중한 정보를 수집했다. 관측 결과에는 미세먼지 광학 특성(산란 및 흡수), 블랙카본, 미량 기체(오존, SO_2, NO, NO_2, NO_y, CO, CH_4, CO_2 및 H_2O) 및 VOC 채취 시료가 포함되었다.

1.2.3 위성 관측

KORUS-AQ팀은 지표 및 항공 관측 결과를 해석하기 위해 기존 위성으로부터 얻은 정보를 활용했다. 이러한 위성들은 종관 기상 패턴과 연계해 광역 관측을 제공하는 데 결정적인 역할을 했다. 각 위성 플랫폼의 구체적인 역할은 아래에 설명되어 있다.

GOCI(Geostationary Ocean Color Imager): 정지궤도 해양관측위성(GOCI)은 미세먼지의 광학적

깊이(AOD: aerosol optical depth), 미세입자 분율(FMF: fine mode fraction), 단일 산란 알베도(SSA: single scattering albedo) 및 미세먼지 유형 등 미세먼지의 광학적 특성에 대한 정보를 제공한다.

AHI(Advanced Himawari Imager): 히마와리 위성(AHI)는 GOCI와 유사하게 미세먼지의 광학적 특성을 비롯해 KORUS-AQ 관측에 영향을 미치는 기상 패턴과 관련된 주요 배경 조건과 관련 정보를 제공하는 정지궤도 기상위성이다.

OMI(Ozone Monitoring Instrument): 오존 모니터링 기기(OMI)는 자외선-가시광선 초분광 기기를 사용해 이른 오후 저궤도 위성(LEO)으로부터 대기오염물질(O_3, NO_2, SO_2, HCHO 및 미세먼지 특성)에 대한 일일 관측 결과를 제공했다. OMI 자료는 GEMS가 더 높은 시간 및 공간 해상도로 제공할 수 있는 정보의 대용물 역할을 했다.

1.3. 연구 비행 실시

KORUS-AQ 기간 동안 5월 2일부터 6월 10일까지 40일 중 23일간 비행이 진행되었다. 몇 번의 예외가 있었지만, 대부분의 비행일에는 세 대의 항공기가 모두 참여했다. 각 항공기의 비행 경로를 그림 1-3에 나타냈다. 이러한 비행 패턴을 위해서는 사전에 세부적인 협상을 진행해야 하며, 실시 과정에서 지속적인 협조를 받아야 한다. 일일 비행 계획은 샘플링을 위한 최적의 날과 비행경로를 결정하기 위해 대기질 모델 예측을 담당하는 팀과 필요한 전후 상황을 제공해 주는 기상 예보관 팀의 주도 하에 이루어졌다.

세심한 계획 및 비행 대기선 장소가 필요한 이유는 그림 1-3에도 나타난 것과 같이 주로 한국의 특수 공역 때문이다. 군사훈련용으로 예약된 지역을 다각형으로 표시했으며, 한반도와 그 연안 대부분을 덮고 있다. 이 복잡한 영공을 운항하기 위해서는 공항들 사이를 연결하는 제트항로를 따라 비행해야 했다(원형 영공으로 나타남). 서울과 주변 수도권에 대한 샘플링을 위해서는 특별 검토가 이루어져야 했다. 이 지역의 영공은 북한과의 경계를 따라 확장되어 한강 이북 서울 지역까지 이어지는 금지 구역으로 인해 훨씬 더 제한적이었다.

전체적으로 DC-8은 20회, NASA 킹 에어는 30회, 한서대 킹 에어는 33회 비행을 실시했다.

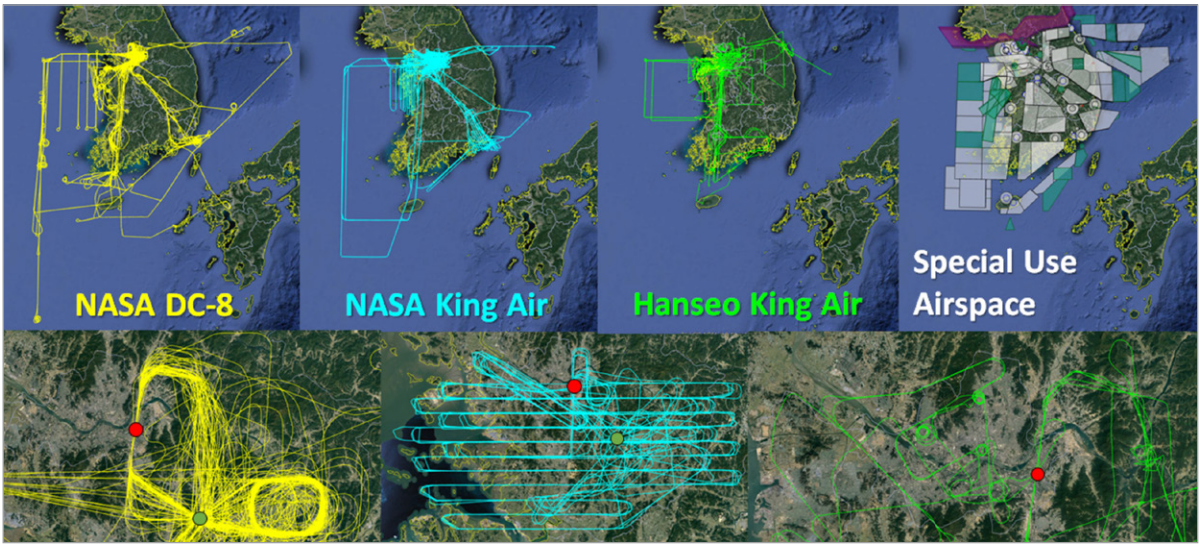


그림 1-3. KORUS-AQ 항공기 각각의 비행 경로를 나타낸 Google Earth 이미지. 비행 접근에 영향을 미치는 특수 공역은 공항을 나타내는 원형 및 군사 작전 영역(흰색), 제한 영역(청록색) 및 금지 영역(자홍색)을 나타내는 다각형과 겹쳐져 있음. 하단에 위치한 그림은 서울 수도권 지역에서 각 항공기가 비행한 패턴을 확대한 것으로, 올림픽 공원(적색 원) 및 태화산학술림(녹색 원)의 위치가 표시되어 있음.

1.4. 연구 중 한국의 대기질 상태

KORUS-AQ의 연구 기간은 오존과 미세 입자 오염 사례가 모두 발생할 수 있는 시기인 장마전 기간으로 선정되었다. 기후학적으로 볼 때, 이 기간은 한국 정책 입안자들이 통제 하는 국지적 배출원의 기여가 부각될 것으로 예상되었다. 그림 1-4는 오존과 $PM_{2.5}$에 대해 대기오염측정망에서 수집된 자료를 바탕으로 KORUS-AQ 동안의 대기질 통계 요약을 보여준다. 오존량은 대부분의 측정 기간 동안 일부 지역에서만 하루 8시간 기준인 60ppbv를 초과했지만, 5월 하순부터 6월 초 사이에는 높은 오존 수치를 나타내는 지역이 전체 지역 중 우세하게 나타났다. 전체적으로, 연구 기간 동안 측정망에서 수집된 오존 자료의 47%가 8시간 기준을 초과했다. 또한 자료의 15%가 1시간 기준인 100ppbv를 초과했다(표시되지 않음). 녹색으로 강조 표시된 비행 일수는 해당 기간 동안 상층 대기 조건에서도 오존의 전체적인 경향을 원활히 샘플링 할 수 있다는 것을 보여준다. $PM_{2.5}$의 추세도 원활히 포착되었지만, 최고치를 보이는 기간이 훨씬 짧아 5월 마지막 주에 집중되는 등 오존과는 상당히 다른 양상을 보였다. 24시간 기준인 50μg/m^{3}을 초과하는 값은 며칠 동안만 기록되었다. 전체적으로, 연구 기간 동안 측정망에서 수집된 $PM_{2.5}$ 자료 중 8%가 24시간 기준을 초과했지만, 최근 2018년 초에 24시간 기준이 35μg/m^3(점선)으로 감축되면서 초과

발생률은 26%로 증가했다.

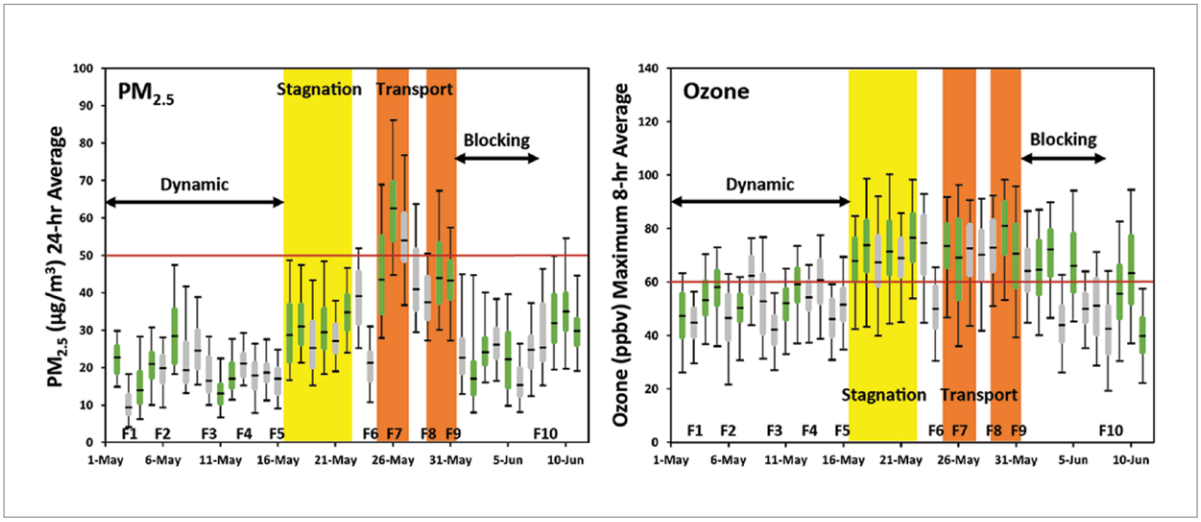


그림 1-4. KORUS-AQ 기간 동안 대기오염측정망 전역에 걸쳐 관측된 $PM_{2.5}$ 및 오존에 대한 일일 통계. 중앙값, 사분위수 범위, 그리고 5퍼센트 및 95퍼센트 수를 박스 위스커 플롯을 이용해 나타냄. 비행 일은 녹색으로 표시. 빨간색 선은 연구 시점에서의 대기질 기준을 나타냄. 정체기간(노란색) 및 지속적인 저수준 오염물질 이동(주황색)을 강조 표시했다. 1차 역학 주기와 차단 패턴은 검은색 화살표로 표시함. 각 패널 하단에 한랭전선 통과를 순차적으로 번호(F#)를 매겨 표시됨(그림 출처: Peterson 등, 2019).

그림 1-4에는 KORUS-AQ 현장 조사 중 뚜렷이 구분되는 4가지 기상학적 기간이 표시되어 있다. 각 기간과 관련된 조건은 아래에 서술되어 있다. 이 내용은 후속 장에서 논의할 조사 결과에 대해 중요한 배경 정보를 제공한다.

5월 1일 ~ 5월 16일: 역학적 기상 상태 및 복합 미세먼지 연직 프로파일

이 기간 동안 일련의 강력한 한랭 전선이 통과하면서 한국의 풍상측 배출원으로부터 수평 이동을 따라 수직 상승 했다. 이는 지표면에 미세먼지가 축적되는 것을 제한함으로써 복합 미세먼지 연직 프로파일을 형성시킨다.

5월 17일 ~ 5월 22일: 고기압 지속으로 인한 정체 상태

지속적인 고기압에 따른 건조 상태로 인해 맑은 하늘과 급격한 일교차가 발생했다. 한국 외 지역 배출원으로

부터의 공기 이동은 제한적이었으며, 대기 가스 및 미세먼지의 지표 관측에서는 지역 내 배출 및 대기 프로세스가 지배적인 것으로 나타났다.

5월 25일 ~ 5월 31일: 역학적 기상 상태, 저수준 이동 및 연무 발생

네 차례의 약한 전선 통과로 중국의 풍상측 배출원으로부터 오염된 공기가 이동했지만 역학적 기간에 비해 수직 상승이 약해 지표면 이동도 저수준에 그쳤다. 각 전선은 많은 구름량과 높은 습도를 수반했으며, 이로 인해 얕은 안정 경계층 내에서 연무 및 안개가 발생했다.

6월 1일 ~ 6월 7일: 차단 패턴

렉스 블록(저기압 북쪽의 고기압 형성)으로 인해 수평 이동이 제한됨으로써 정체 상태가 형성되었다. 그러나 고기압이 지속되었던 정체기간과 달리, 렉스 블록에 의해 발생하는 정체 상태는 지표 오염물질이 축적될 만큼 충분히 오래 지속되지 않았다.

5월 후반기의 정체기간과 저수준 이동/연무 기간 사이 지역 내 영향 및 월경성 영향의 역할을 고려할 때, 이들 기간은 시간에 따른 $PM_{2.5}$ 변화를 분석 및 해석하는 데 특히 중요한 역할을 한다. 반면, 오존의 광화학적 생성에서는 지역 내 배출이 더 지대한 역할을 하므로 종관 기상 상태에 대한 반응은 그리 크게 변하지 않았다. 그 대신, 급격한 오존 구배는 해풍전선과 관련된 짧은 기간 동안 더 흔하게 나타났다.

1.5. 맺는 말

KORUS-AQ 현장 조사의 관측 결과 분석을 통해 현재까지 60건 이상의 논문이 심사를 거쳐 학술지에 출판되었다. 이 보고서에 강조된 결과 및 그에 따른 권고 사항은 이러한 출판물들을 토대로 한다. 앞으로 KORUS-AQ 자료는 계속해서 과학의 가치를 이어가고, 향후 한국의 대기질 목표 달성의 진척도를 평가하는 데 필요한 현장 관측 전략을 제시할 것이다.

2장 미세먼지 오염

주요 결과

- 종관 기상조건은 한반도 전역의 $PM_{2.5}$ 농도를 변화시키는 주요 요인으로서, 전국에 걸쳐 놀라울 정도로 유사한 관측을 이끌어냈다.
- $PM_{2.5}$ 전체 양 중에서 직접 배출 물질(1차 오염물질 배출)보다는 대기 중 형성된 물질(2차 생성)의 비중이 더 컸다.
- 2차 생성을 일으키는 과정에는 여러 가지가 있으며 이들 과정은 종관 기상에 의존한다. 여기서, 정체기간 동안에는 광화학적(광구동) 과정에 의해 주로 유기 미세먼지(2차 유기 미세먼지, SOA)가 생성되는 반면, 이동/운무기 동안에는 불균일 반응(가스 및 입자 상호작용) 과정에 의해 주로 무기 미세먼지(2차 무기 미세먼지, SIA)가 생성되는 것으로 관측되었다.
- 정체기간 SOA는 휘발성 유기 화합물(VOCs, 4장 참조)의 지역 내 배출로부터 생성되었다.
- 이동기간 SIA는 중국으로부터의 강화된 기단 이동과 함께 습한 조건에서 생성되었으며, 그에 따른 지역 내 미세먼지 생성으로 인해 연무의 발달 및 지속이 촉진되었다.
- 미세먼지 생성에 기여하는 다양한 요인들은 아직 모델에 충분히 반영되지 않았다(5장 참조). 예를 들어, 정체 상황에서 SOA 생성을 이끄는 가스상 VOCs 및/또는 반응 경로를 식별하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 또한 본 모델은 지표 근처에 배출물질을 가두고 미세먼지 생성을 제한함으로써 대기질 저하를 일으키는 대기의 표층(경계층) 깊이의 일중 주기를 완전히 설명하지 못한다. 마지막으로, 연무 발생 시 SIA를 생성하는 불균일 반응을 규명하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

KORUS-AQ $PM_{2.5}$ 연구 결과에 따르면 국지적 NO_x 및 VOCs 배출량(특히, 최소 7개 이상의 탄소 원자(C_7+)를 가진 고반응성 방향족) 감소는 SOA의 광화학적 생성을 촉진하는 건조한 정체 조건을 비롯해 SIA의 불균일 생산을 일으키는 습한 구름/안개/연무 조건에서 미세먼지의 2차 생성을 완화하는 데 일조하는 것으로 나타났다. 질산염 불균일 생성을 제한하기 위한 조치를 취할 경우 연무 현상의 규모와 지속을 제한하는 추가적인 이점이 있을 수도 있다.

남아 있는 지식 격차를 해소하기 위한 향후 연구에 대한 권고 사항

- 향후 $PM_{2.5}$ 완화 전략을 마련하기 위한 나머지 질문에 추가로 답하기 위해서는 서울 지상 관측소에서 다음의 몇 가지 표적 측정을 추가로 수행하는 것이 향후 연구에 큰 도움을 줄 것이다:
  1. 국지적 배출원 대비 월경성 배출원의 $PM_{2.5}$ 및 그 전구물질의 비중을 산정하기 위한 CO 및 CO_2의 고정밀 측정(이 비중은 중국과 한국에서의 배출량에서 큰 차이를 보임)
  2. 2차 미세먼지 생성 및 기상 조건 간의 상호작용을 더 원활히 조사하기 위한 높은 시간 해상도 미세먼지 조성 분석
  3. 미세먼지 수분량을 계산하고 연무 발생을 일으키는 피드백을 조사하는 데 활용될 수 있는 가습 및 건조 미세먼지 산란
  4. 무기 미세먼지 형성 모델과 미세먼지 생성 메커니즘에서 산성도의 역할을 더 잘 제한하기 위한 NH_3의 고정밀 측정
- 또한 $PM_{2.5}$ 발생 동안 지표면에서의 미세먼지 생성 및 축적에서 혼합, 희석 및 난류의 역할을 이해하기 위해서는 현재 한국에서 운영되는 운고계 네트워크로부터 경계층 고도 자료 산물을 개발하여 일중 편차를 포착할 필요가 있다.

2.1. 종관 기상조건에 따른 한반도의 $PM_{2.5}$ 농도 변화

한반도 전역의 $PM_{2.5}$ 농도는 종관 기상조건에 따라 변화한다. 그림 2-1은 대기오염측정망의 모든 관측소로부터 계산된 지역 평균치를 사용해 한국 전역의 $PM_{2.5}$ 시계열을 나타낸 것이다. 기온, 상대습도, 강수, 월경성 이동, 해륙풍 순환 및 경계층 깊이 등의 현상을 포함하는 종관 기상조건은 $PM_{2.5}$에서 큰 변동을 일으켰다. 그러나 모든 기상현상, 즉 구름량, 안개 발생 또는 특정 이동 경로가 전국으로 확대되지는 않으므로 이로부터 지역적 편차가 발생했다. 서울시를 포함해 다른 지역보다 $PM_{2.5}$ 농도가 일관되게 높은 곳은 확인되지 않았다. 캠페인 중 지역별 평균치는 한반도 전체 평균인 28.4μg/m^3에서 1μg/m^3 미만의 차이를 보였다. 그러나 $PM_{2.5}$ 농도가 높은 경우(50μg/m^3 초과) 서울은 한반도 나머지 지역보다 더 높은 농도를 보이는 경향이 있었다. 이러한 상황은 정체기간 및 이동/연무기 모두에 걸쳐 5월 20일부터 6월 1일까지 여러 차례 발생했다(그림 2-1). KORUS-AQ는 한국 대기질 악화에 기여하는 고농도 $PM_{2.5}$의 원인을 파악하는 데 중점을 두고, 정체기간 및 이동/연무기 동안 $PM_{2.5}$를 증가시키는 데 기여한 요인을 면밀히 검토했다.

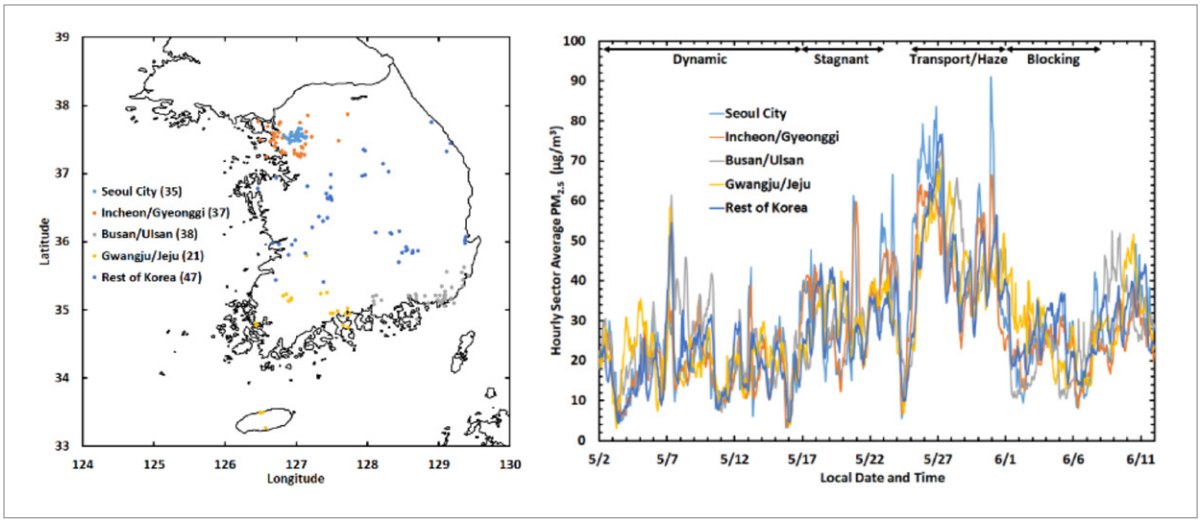


그림 2-1. 왼쪽 패널: 대기오염측정망 지도를 5개 지역으로 나눈 것. 서울 수도권(SMA)은 서울, 인천, 경기도를 망라함. 남동부 해안 지역에는 부산과 울산이, 남서부 지역으로는 광주와 제주도가 포함됨. 중부 지역은 '나머지 지역'으로 지칭함. 각 지역의 측정소 개수는 괄호로 표시. 오른쪽 패널: 왼쪽 패널에 표시된 5개 지역 각각에 대해 평균한 시간별 $PM_{2.5}$ 농도 시계열. 그림 상단에 4개의 주요 기상 시기에 대한 주석을 표시(그림 출처: Jordan 등, 2020).

2.2. 2차 생성 메커니즘에 의한 미세먼지 생성

전체 $PM_{2.5}$ 중에서 2차 생성 메커니즘에 의해 형성된 물질이 가장 큰 비중을 차지한다. 한국과학기술연구원(KIST), 시행한 초기 연구에 따르면(H. Kim 등, 2018) 그림 2-2의 원형 차트에서 녹색으로 윤곽선을 표시한 부분에서도 볼 수 있듯이 미세먼지 총량 중 2차 생성 메커니즘에 의해 형성된 미세먼지는 대기 중으로 직접 배출된 입자(1차 오염물질 배출)보다 비중이 훨씬 높은 것으로 나타났다. 2차 미세먼지의 비율은 캠페인 당시 4개 기상 기간에 걸쳐 71%~83% 범위였다. KIST에서 관측한 미세먼지 조성 및 양은 올림픽 공원에서의 관측치 및 NASA DC-8이 수집한 항공 측정치와 상당히 일치한다. 이 자료는 본 연구에서 서울 지표상에서의 시계열 완성을 위해 사용된다(그림 2-3).

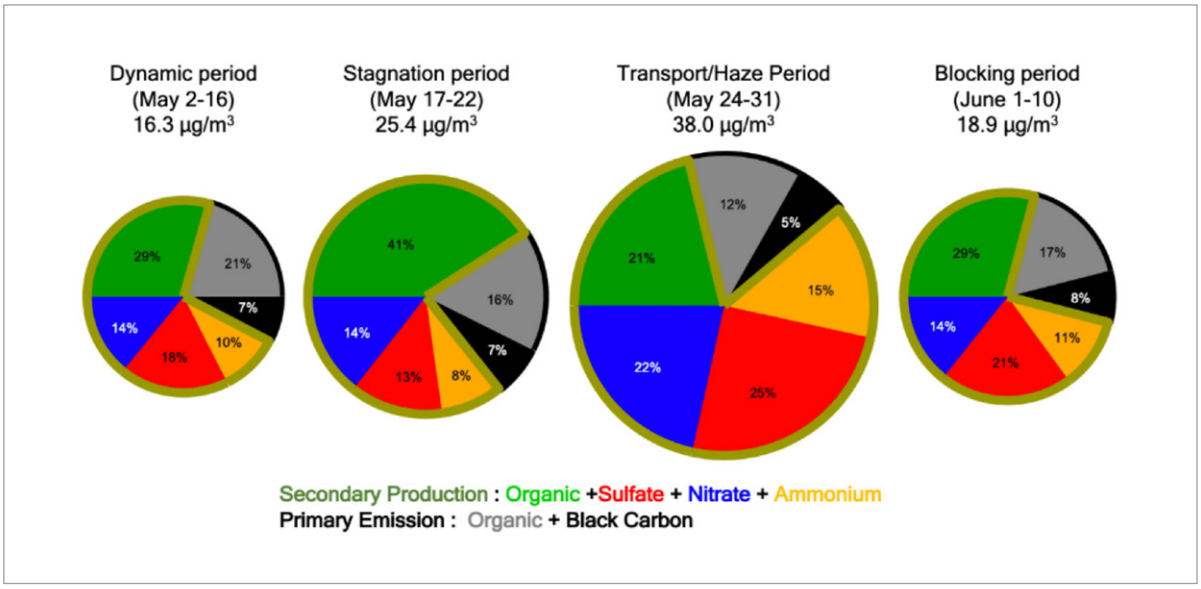


그림 2-2. KORUS-AQ 기간 동안 4개의 기상 기간에 대해 서울 KIST 지상 관측소에서 관측한 평균 PM_1 조성. 원형 차트의 크기는 해당 기간의 총 미세먼지 평균 농도에 따라 조정됨. 각 원형 차트에서 검은색으로 표시된 부채꼴 부분은 1차 미세먼지를 의미하며, 녹색으로 외곽선을 표시한 부분은 2차 미세먼지를 모두 망라함(그림 출처: Jordan 등, 2020).

이들 측정에 사용된 기법(미세먼지 질량 분석기)은 직경이 1μm 미만인 입자(PM_1, 이에 반해 $PM_{2.5}$는 직경 2.5μm까지의 입자를 포함함)에 제한된다. 그림 2-3의 상단 패널은 개별 화학물질을 PM_1의 대용물로 합산한 KIST 시계열 자료를 보여준다. 그림 2-3의 하단 패널은 올림픽 공원에서 측정한 시간별 PM_1 및 $PM_{2.5}$ 시계열을 나타낸 것으로, 캠페인 중 대부분의 기간 동안 둘 사이에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉, $PM_{2.5}$ 총량 중 대부분은 PM_1 크기에 속한다. 그러나 이동/연무기 동안에는 두 입자 크기의 시계열이 서로 갈라지는데, 이는 더 큰 입자 크기로의 전환이 일어났음을 시사한다. 캠페인 기간 중 미세먼지 성분에서 나타난 가장 두드러진 특징은 정체기간 후반부 동안에는 미세먼지 중 SOA의 비중이 우세하다가 이동/연무기간 동안에는 SIA 비중의 우세로 전환된 것이다(그림 2-2 및 2-3 상단 패널). 이는 2차 미세먼지 생성을 증가시키는 데 두 기상 기간 사이에 서로 다른 대기 프로세스가 원인이 되었음을 시사했다.

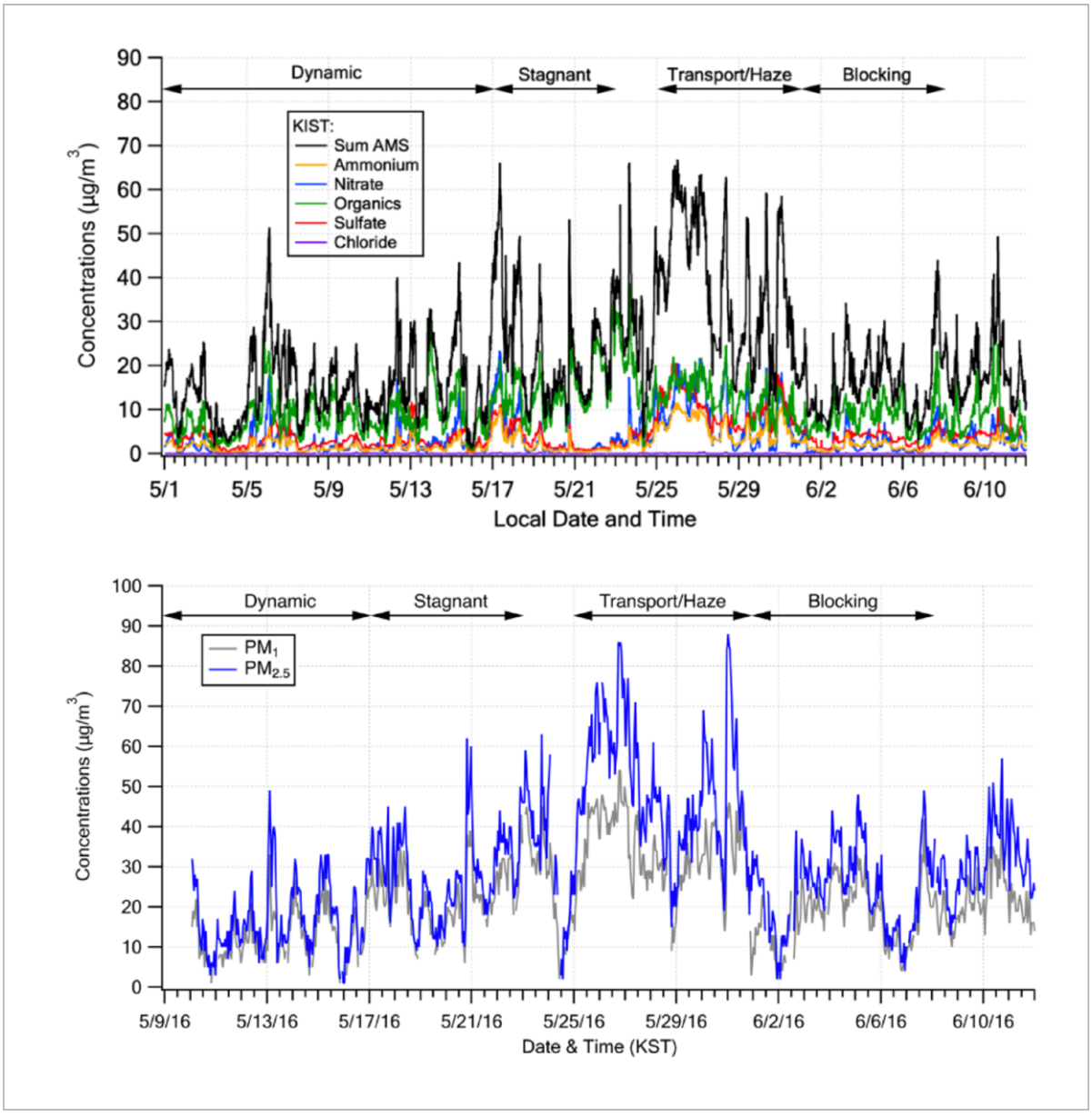


그림 2-3. 상단 패널: 캠페인 기간 중 KIST AMS 자료의 시계열 자료. 상단에 기상 기간이 주석으로 표시. 전체 KORUS-AQ 캠페인 중 PM_1 미세먼지의 대용물로 개별 성분(검은색)의 총합이 사용됨. 하단 패널: 올림픽 공원에서 측정한 시간별 PM_1 및 $PM_{2.5}$ 농도(그림 출처: Jordan 등, 2020 주요 본문 및 보충 정보).

2.3. 종관 기상조건에 따른 2차 화합물 생성

2차 생성은 여러 다른 과정에 의해 일어나며 이들 과정은 종관 기상조건에 의존한다. 표 2-1은 KIST에서의 KORUS-AQ 샘플링 기간 동안 PM_1의 각 화학 성분의 평균 농도와 함께 온도(T: temperature), 상대습도(RH: relative humidity) 및 미세먼지 수분량(ALW: aerosol liquid water)의 평균값을 보여준다. 각 기상 기간에 대한 평균값도 제시되어 있다. 표 2-2는 KORUS-AQ 평균으로부터 각 기상 기간의 평균값 사이의 차이를 나타낸 것으로, 정체기간 및 이동/연무기 동안 가장 큰 차이가 관측되었음을 보여준다. PM_1은 이동/연무기 동안 가장 크게 증가한 것으로 나타났는데, 이는 질산염, 황산염 및 암모니아 등 2차 무기 화합물이 크게 증가했기 때문이다(표 2-2). 또한 이 기간 동안 RH의 증가로 인해 ALW도 증가했다. PM_1 또한 증가했지만 정체기간에는 그 정도가 덜했다. 여기서 PM_1의 증가는 SOA의 증가로 인한 것이다. 특히, 이 기간 동안 ALW를 비롯해 RH는 캠페인 기간 평균에 비해 훨씬 낮다는 점이다.

이러한 결과는 Peterson 등(2019)이 설명하고 1장에서 요약한 기상 상태와 일치한다. 정체기간은 맑은 하늘 아래 건조한 상태로 특징 지어진다. 기온에서의 큰 일교차로 인해 역학적 경계층이 형성되었으며, 이러한 경계층은 기온이 높은 오후 동안 더욱 확대된 뒤 밤 동안 기온이 낮아지면서 축소되었다. 고기압으로 인해 월경성 이동이 제한된 결과 지역 내 배출물질이 더 우세했다. 이러한 조건 때문에 VOCs의 지역 내 가스상 배출로부터 SOA의 광화학적(일광 유도) 생성이 촉진되었다. 이 기간 동안 이동이 제한됨에 따라 경계층 내에 SOA가 고농도로 축적되었다.

이와 반대로, 이동/연무기 동안에는 약한 한랭전선의 통과로 인해 중국으로부터 월경성 이동이 증가하여 한국에 구름 낀 하늘 아래 습한 기단이 유입되었다. 한국 연안을 따라 서해(황해)의 차가운 표면 온도로 인해 연안의 습한 상공에서 안개 형성이 유발되었다. 구름/안개 상태에서는 기온의 일교차가 제한되므로 역학적 경계층이 억제되고 일중 팽창 및 수축이 최소화되었다. 이러한 안정 경계층 공기의 높은 습도로 인해 흡습성(수분을 쉽게 흡수하고 함유하는 성질을 나타내는 용어) 무기 미세먼지(질산염, 황산염, 암모니아)가 수분을 흡수하여 ALW가 증가했고 미세먼지는 더 큰 크기로 성장했다. 이에 따라 질산염 및 황산염 등의 불균일 생성에 이용될 수 있는 표면 영역도 증가해 더 많은 수분이 축적되었다. 그림 2-3의 하단 패널에도 나타나 있는 것처럼, 이러한 양의 피드백 루프는 SIA의 급격한 2차 불균일 생성과 $PM_{2.5}$ 미세먼지의 크기 증가를 촉진했다.

표 2-1. KIST에서 측정된 PM_1 미세먼지 성분과 기상 파라미터 및 ALW. 본 수치는 괄호 안에 표시된 수의 항목 값에 대한 평균으로, 평균값 ± 표준 편차를 의미(표 출처: Jordan 등, 2020).

	KORUS-AQ 평균	순환기간	정체기간	이동기간	차단기간
POA(μg/m^3)	3.85±3.18 (11605)	3.35±3.25 (2803)	4.17±2.66 (1200)	4.57±3.29 (1478)	3.19±2.26 (1858)
블랙 카본(μg/m^3)	1.52±0.82 (28758)	1.21±0.70 (7090)	1.74±0.83 (2879)	2.09±0.88 (3639)	1.48±0.81 (4553)
암모니아(μg/m^3)	2.56±2.16 (14403)	1.60±1.16 (3562)	2.14±2.28 (1440)	5.54±2.78 (1821)	2.07±1.06 (2276)
황산염(μg/m^3)	4.40±3.26 (14403)	2.99± 1.83 (3562)	3.25±2.72 (1440)	9.50±4.12 (1821)	3.92±1.52 (2276)
질산염(μg/m^3)	3.78±4.20 (14403)	2.30±2.58 (3562)	3.66±4.95 (1440)	8.20±5.86 (1821)	2.70±2.33 (2276)
SOA(μg/m^3)	5.91±4.63 (11605)	4.78±2.98 (2803)	10.4±6.06 (1200)	8.04±3.69 (1478)	5.51±2.79 (1858)
PM_1 총량(μg/m^3)	22.1±13.0 (14403)	16.3±8.80 (3562)	25.4±12.5 (1440)	38.0±15.6 (1821)	18.9±7.89 (2276)
기온(℃)	19.7±4.5 (10773)	17.2±5.0 (3562)	22.0±5.0 (1439)	20.1±3.4 (1820)	22.3±3.3 (2275)
상대 습도(%)	60.1±21.3 (10773)	66.3±22.4 (3562)	40.5±17.9 (1439)	70.2±16.4 (1820)	61.3±17.2 (2275)
ALW(μg/m^3)	12.5±21.9 (10773)	11.4±21.6 (3562)	3.8±7.3 (1439)	29.8±30.4 (1820)	9.5±18.3 (2275)

약어: POA = Primary Organic Aerosol, 1차 유기 에어로졸, SOA = Secondary Organic Aerosol, 2차 유기 에어로졸, PM_1 = 공기역학적 직경이 1μm 미만인 입자상 물질, ALW = Aerosol Liquid Water, 수분량

표 2-2. 표 2-1의 각 기상 기간 동안 관측된 평균값과 캠페인 전체 기간에 대한 평균값 사이의 차이. 정체기간 및 이동/연무기간 동안, 캠페인 평균값으로부터 가장 큰 격차를 보이는 항목은 굵은 활자로 표시해 강조 (표 출처: Jordan 등, 2020).

	순환기간	정체기간	이동기간	차단기간
POA(μg/m^3)	-0.5	0.3	0.7	-0.7
블랙 카본(μg/m^3)	-0.3	0.2	0.6	0.0
암모니아(μg/m^3)	-1.0	-0.4	**3.0**	-0.5
황산염(μg/m^3)	-1.4	-1.2	**5.1**	-0.5
질산염(μg/m^3)	-1.5	-0.1	**4.4**	-1.1
SOA(μg/m^3)	-1.1	**4.5**	2.1	-0.4
PM_1 총량(μg/m^3)	-5.8	3.3	**15.9**	-3.2
기온(℃)	-2.5	2.3	0.4	2.6
상대 습도(%)	6.2	**-19.6**	**10.1**	1.2
ALW (μg/m^3)	-1.1	**-8.7**	**17.3**	-3.0

약어: POA = Primary Organic Aerosol, 1차 유기 에어로졸, SOA = Secondary Organic Aerosol, 2차 유기 에어로졸, PM_1 = 공기역학적 직경이 1μm 미만인 입자상 물질, ALW = Aerosol Liquid Water, 미세먼지 수분량

2.4. 국지적 VOCs 배출로 인한 정체기간 SOA 생성

정체기 SOA는 국지적 VOCs 배출로 인해 생성되었다. Nault 등(2018)은 간단한 박스 모델 및 상공의 DC-8에서 측정된 VOCs 농도를 이용해 서울에서의 SOA 생성을 계산했다. 이들은 가장 중요한 전구물질 화합물이 반휘발성 및 중간 휘발성 유기화합물 군(전체적으로 S/IVOC로 약칭) 및 가장 반응성이 높은 방향족 화합물로부터 유래되었음을 보였다(그림 2-4 및 표 2-3). 이러한 화합물은 광화학적 수명이 짧다(모두 1일 미만, 주간 관측된 평균 OH 농도 6 x 10^6 molecules/cm^{3}에서는 4시간 미만) KORUS-AQ 동안 풍속은 대체로 4 m s^{-1} 수준에 불과해, 일광 시간 동안 이동 거리는 약 60km 범위였다. ***즉, 이러한 SOA 전구물질은 지역 내에서 배출되었다.***

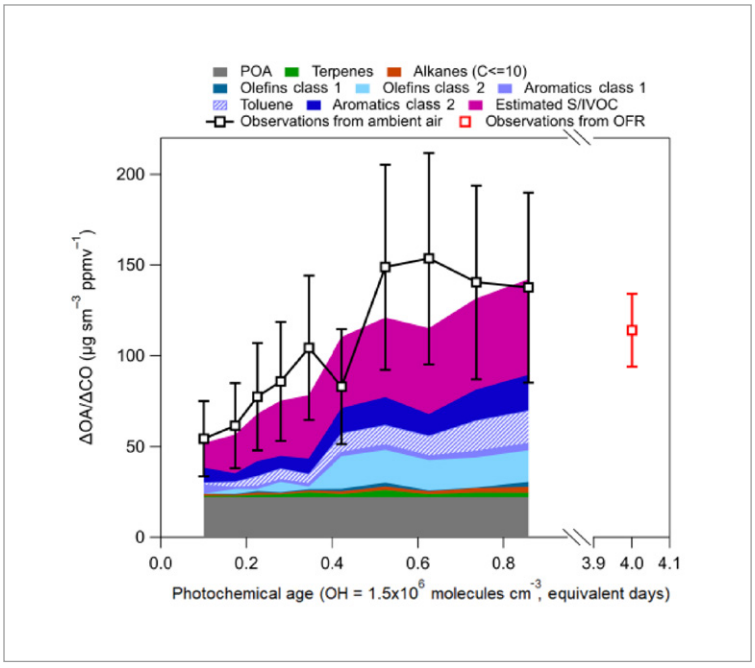


그림 2-4. KORUS-AQ 기간 동안 SOA 생성 계산. SOA 전구물질의 종류는 표 2-3에 정의. 단, 톨루엔은 1종 방향족(연한 자주색)에 속하나 별도로 표시. 오차 막대는 OA의 불확도를 나타냄.(±38%). (그림 출처: Nault 등, 2018)

S/IVOC는 도시 환경에서 배출되는 전체 VOCs 중 극히 일부만 차지하므로 측정하기 어렵다. 그러나 이러한 화합물은 저휘발성과 높은 반응성을 보이므로 작용기를 첨가한 후 광화학적 반응을 통해 가스상에서 입자상으로 쉽게 전환시킬 수 있다(Nault 외, 2018 및 그 참고문헌). 이러한 화학군의 화합물을 식별하기 위해서는 더 많은 연구를 수행할 필요가 있다.

박스 모델 외에 Nault 등 (2018)은 SOA 전구물질의 배출원으로 확인된 모든 지역 내 배출물질을 추가로 분석했다. 여기에는 광학적으로 유도된 기타 미량 기체(예: O_3, HCHO 및 퍼옥시아실질산염)와 SOA의 상관관계, 서울 풍상측 CO 배경 농도 및 유기 미세먼지와의 비교, 서울 상공의 대기에서 SOA가 생성될 가능성은 서해 상공 대기에 비해 3.5배 더 높음을 보여주는 DC-8의 산화 흐름 반응기(OFR: oxidation flow reactor)로부터의 자료가 포함된다.

표 2-3. 그림 2-4에서 사용된 화합물의 종 정의. 나열된 VOC는 모두 DC-8에서 측정됨(표 출처: Nault 등, 2018).

종	포함 화합물 또는 매개변수화
테르펜(Terpene)	알파피넨(alpha-pinene), 베타피넨(beta-pinene)
알칸(C ≤ 10)	메틸-시클로펜탄(methyl-cyclopentane), 시클로헥산(cyclohexane), 메틸-시클로헥산(methyl-cyclohexane), n-헵탄(n-heptane), n-옥탄(n-octane), n-노난(n-nonane), n-데칸(n-decane)
1종 올레핀(Olefin class 1)	1-부텐(1-butene), i-부텐(i-butene), cis-부텐(cis-butene), trans-부텐(trans-butene)
2종 올레핀(Olefin class 2)	스티렌(styrene), 1,3-부타디엔(1,3-butaduene)
1종 방향족(Aromatics class 1)	벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 이소프로필벤젠(isopropylbenzene), n-프로필벤젠(n-propylbenzene), 에틸벤젠(ethylbenzene)
2종 방향족(Aromatics class 2)	M+p-크실렌(M+p-xylene), o-크실렌(o-xylene), 3-에틸톨루엔(3-ethyltoluene), 4-에틸톨루엔(4-ethyltoluene), 1,2,3-트리메틸벤젠(1,2,3-trimethylbenzene), 1,2,4-트리메틸벤젠(1,2,4-trimethylbenzene), 1,3,5-트리메틸벤젠(1,3,5-trimethylbenzene)
추정 S/IVOC	6.7 × ΔHOA/ΔCO(ΔHOA/ΔCO = 23 μg/SM^3-ppmv)

약어: HOA = 탄화수소 유사 유기 에어로졸

고 반응성 방향족에 대해 알려진 특성 및 이들이 SOA 생성에 크게 기여한다는 것을 감안할 때(그림 2-4), 정체 기상 상태에서 SOA와 관련된 심각한 대기질을 완화하기 위해 C_{7+} 방향족 VOCs를 대상으로 한 배출량 저감을 실시할 것을 권고한다.

2.5. 이동/연무 기간의 SIA 생성과 기상 조건의 연관성

이동/연무기의 SIA 생성은 연무의 발생 및 지속을 촉진하는 양의 피드백을 가진 기상 조건과 연관되어 있다. 열역학 모델(E-AIM, 자세한 사항은 Jordan 등, 2020 참조)을 이용해 미세먼지에서 측정된 질산염, 황산염, 암모니아, 기체상 HNO_3 및 기상 파라미터 RH와 T로부터 ALW을 계산했다. 저온고습 조건에서 가스상 NH_3 및 HNO_3는 에어로졸상 질산암모늄(NH_4NO_3)으로 변환되었다. 질산염 미세먼지는 더 많은 수분을 에어로졸에 포함시킴으로써 가스상 NH_3 및 HNO_3의 미세입자로의 추가 분할을 촉진하여 양의 피드백 루프를 형성한다. 이처럼 서로 밀접하게 연결된 계는 ALW와 질산염의 급격한 증가를 초래해 이들 또한 함께 변화하도록 만든다(그림 2-5). 이와 유사하게 가스상 SO_2 또한 이 계에 참여하지만 그림 2-5에 나타난 곡선을 볼 때 이 성분은 다른 성분과 다른 양상을 보이는데, 이는 황산염은 일단 한번 형성되면

계속 에어로졸상으로 남는 반면 반휘발성 질산염은 그렇지 않기 때문이다.

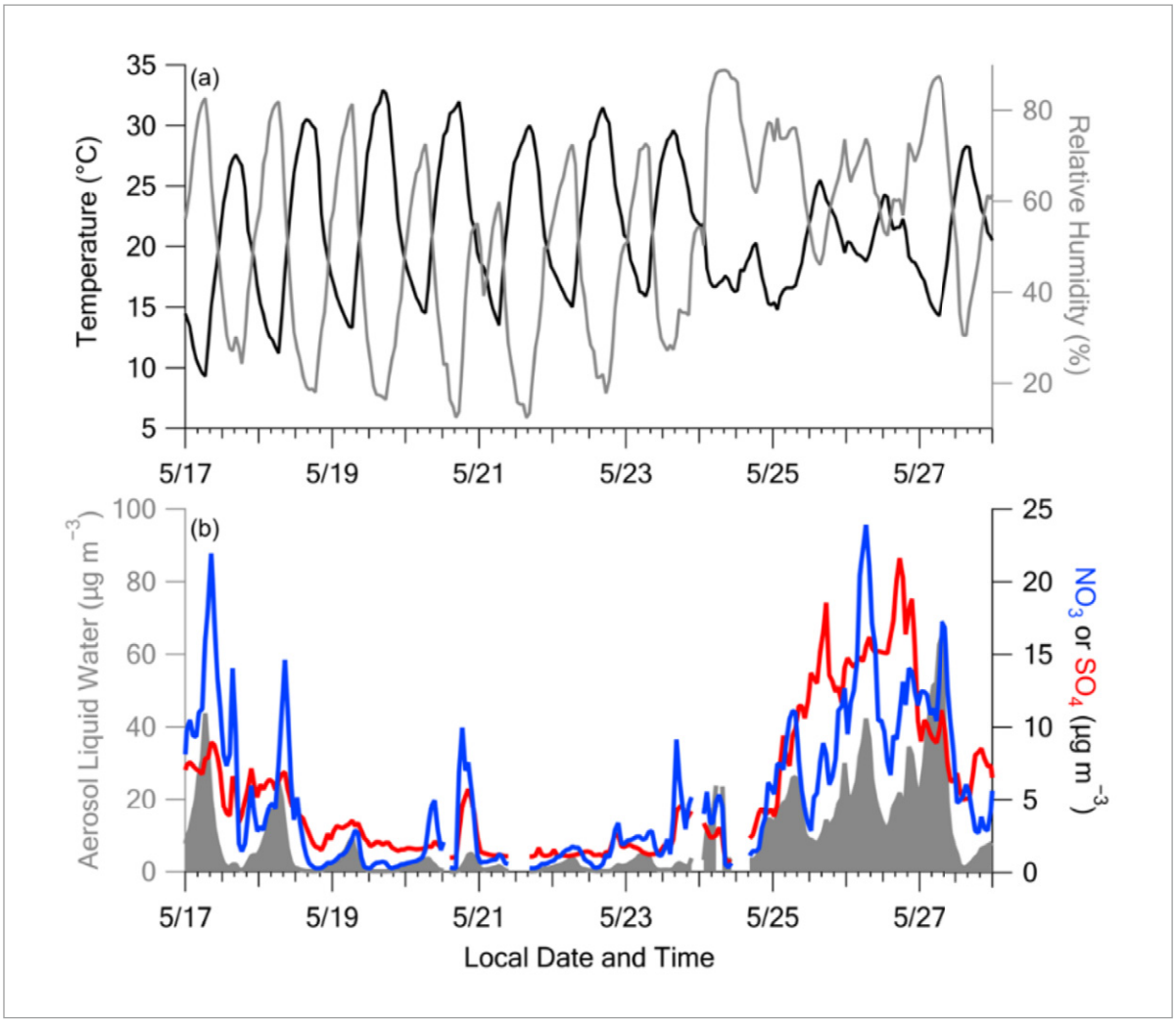


그림 2-5. 정체기간 및 상반기 이동/연무기간 동안 올림픽 공원에서의 T 및 RH의 시계열(상단 패널) 및 질산염과 황산염에 대한 ALW(하단 패널). ALW는 E-AIM 열역학 모델로부터 계산. 이동/연무기 동안 주간 기온이 감소한 것과 함께, 정체기간에 비해 이동/연무기 동안 낮과 밤 모두 RH가 증가한 것에 주의(그림 출처; Jordan 등, 2020).

이동/연무기에는 흐림/안개 상태로 인해 지상에 도달하는 일광이 감소하여 경계층의 일중 변동이 제한되었다(그림 2-6). 다습한 경계층에서 급격한 미세먼지 불균일 생성이 일어나 지상에 도달하는 일광이 더욱 감소했으며, 이에 따라 경계층이 안정화하는 데 일조하고 주야로 미세먼지가 매우 높은 농도로

축적됨으로써 KORUS-AQ 기간 동안 관측된 수치 중 가장 나쁜 $PM_{2.5}$를 기록했다(그림 2-6). 즉, SIA의 불균일 화학적 생성을 유도하는 양의 피드백 루프는 연무의 발생을 촉진하는 또 다른 기상학적 양의 피드백 루프의 한 부분으로서, 경계층을 안정화하고 일사량을 감소시켜 SIA가 추가로 축적되도록 한다.

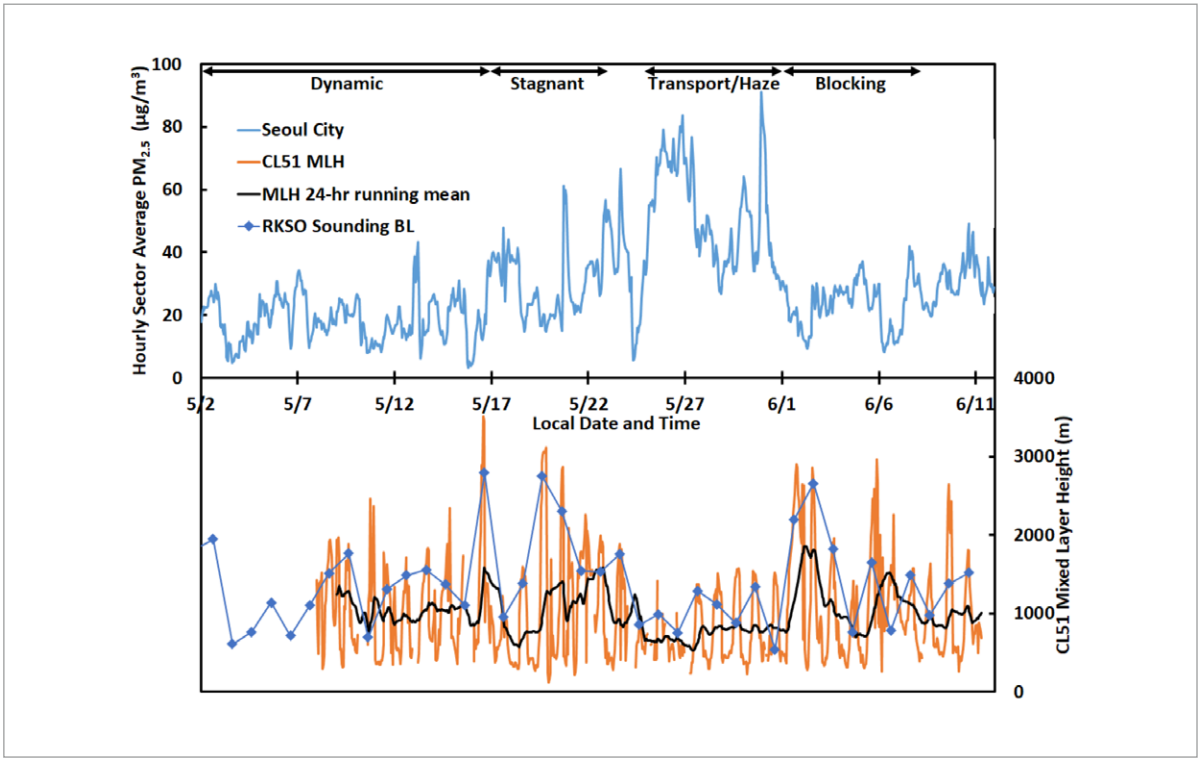


그림 2-6. KORUS-AQ 기간 동안 서울 대기오염측정망 관측소에서 시간당 평균 $PM_{2.5}$ 시계열(상단 패널). 시간별 평균 혼합층 고도(MLH) 시계열은 이전 24시간 동안의 MLH를 보여주는 24시간 연속 평균치와 함께 서울의 올림픽 공원에서 CL51 운고계를 이용해 측정(하단 패널). 하단 패널에는 오산 공군기지에서 오후 동안(현지 시간으로 오후 3시) 일일 측정을 통해 측정한 BL 깊이도 나타냄(그림 출처: Jordan 등, 2020).

또한 안정 경계층은 일반적인 야간 가스상 반응성을 변화시켜 야간 질산염 형성을 강화하는 데 기여한다. 서울에서는 야간 동안 얕은 경계층에서의 NO_x 배출로 인해 근저 지표의 O_3(최소 수 ppbv 수준)가 거의 모두 제거된다. 이 반응 경로는 궁극적으로 질산염 미세먼지를 생성하며, O_3을 제거하면 이 과정도 중단된다. 그러나 이동/연무기 동안 야간 경계층은 평소와는 달리 붕괴되지 않으므로 밤 동안 늘어난 O_3(약 20~40ppbv)와의 연직 혼합이 더욱 활발해져 캠페인의 나머지 기간에 비해 대략 3배 빠른 속도로

NO_x를 질산염으로 전환시킨다. 즉, 낮 동안에는 흐린 날씨로 인해 경계층 성장이 제한되지만(표면층의 공기 순환 제한) 다습한 얕은 층은 야간에도 열을 유지하며 경계층의 야간 붕괴를 제한하므로 가스상 반응성 증가로 인해 질산염 생성이 더욱 늘어난다.

이동/연무기의 미세먼지 생성에서 중국으로부터의 풍상측 배출원이 기여하는 바가 어느 수준인지에 대한 의문이 제기되었다. Nault 등 (2018)에 따르면 미세먼지의 짧은 수명을 감안할 때 서울 전체 NO_x 중 월경성 배출원에 기인하는 것은 10%에 불과한 것으로 나타났다. ***따라서 이 기간 동안 질산염은 지역 내 NO_x 배출원으로부터 발생한다.***

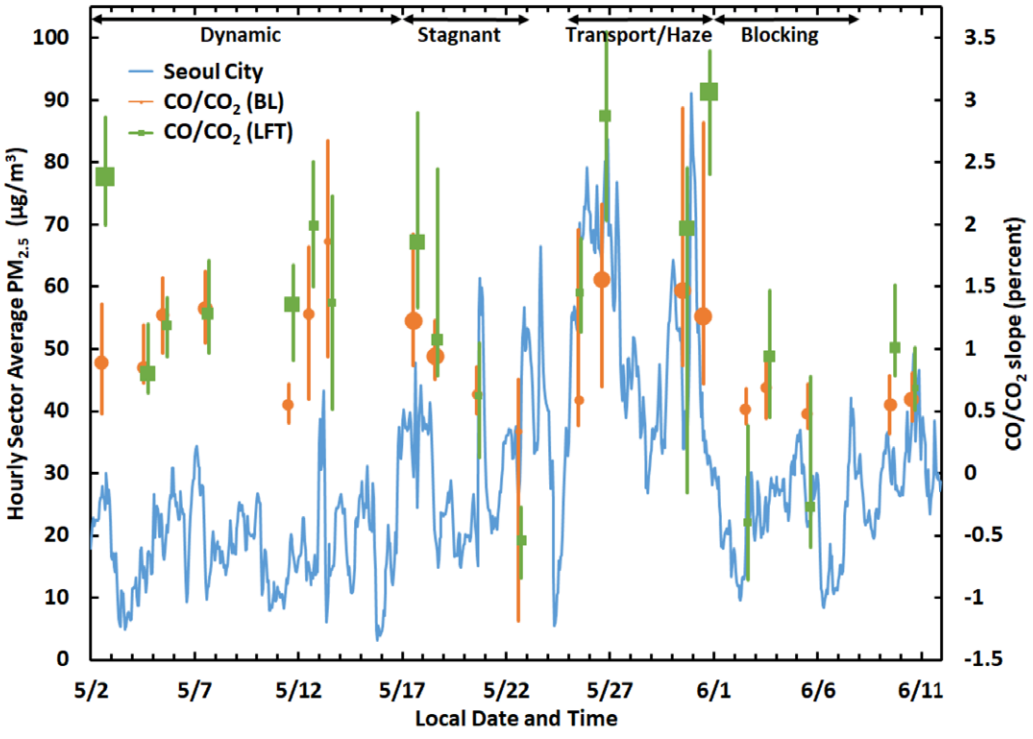


그림 2-7. KORUS-AQ 기간 동안 서울시 대기오염측정망 관측소에서의 시간당 평균 $PM_{2.5}$ 농도 시계열. CO/CO_2 기울기 중앙값은 DC-8 비행일 동안 서울 상공에서의 하강 프로파일로부터 계산된 값. CO/CO_2 기울기(중앙값 및 사분위수 범위)에 대한 통계치는 그 기울기가 유의한 상관관계(R^2>0.5)를 가지는 1분 자료 기간에 대해 표시됨. 부호의 크기는 CO/CO_2와 유의한 상관관계를 가지는 자료의 비율에 비례. 경계층(BL, 주황색 원) 및 자유 대류권 저층(LFT, 녹색 정사각형) 모두에 대한 통계치가 표시(그림 출처: Jordan 등, 2020).

중국과 한국 간의 CO/CO_2 배출량 비율을 기준으로 Halliday 등(2019)이 개발한 측정치 및 항공 자료를 활용하여 캠페인 전체에 걸친 월경성 이동을 평가했다(그림 2-7). 비효율 연소로 인해 생성된 수치는 한국에서는 1%에 정도에 그치는 데 비해 중국에서는 4% 정도로 높다. 이 수치는 기단이 CO_2에 대한 강한 생물학적 흡수의 영향을 받을 경우 음의 값이 될 수도 있다. 경계층(BL)에서 CO/CO_2 기울기는 역학적 기간, 이동/연무기 및 초기 정체기간 동안 서로 유사하다. 정체기간이 진행되고 한국 상공의 대기가 점점 더 고립될 때, CO/CO_2 기울기 값이 감소함에 따라 국지적 배출의 영향이 더 우세해졌다. 마찬가지로, CO/CO_2 기울기 값이 정체기간 후반과 유사한 차단기간 동안에도 지역 내 배출이 우세했다(그림 2-7). BL과 그 상공의 대기층(자유 대류권 저층, LTF라고 부름) 사이에서 값이 분리된 것은, 이동/연무기에 약한 전선이 통과하는 동안에는 역학적 기간의 강한 전선에서 수직 상승이 일으키는 것에 비해 대기가 수직적으로 원활히 혼합되지 않았음을 보여준다. 이동/연무기 동안 이들 두 대기층 값에 차이가 나타난다는 것은 중국으로부터 이동한 공기는 중첩된 LFT 대기층과 비교해 안정 BL 대기에서 그 영향력이 더 약하다는 것을 시사한다(그림 2-7). 그럼에도 불구하고 공기의 이동은 이 기간 동안 지표에서 관측된 SO_2 증가에 기여하는 것으로 보인다. 즉, 황산염의 불균일 생산은 SO_2의 월경성 이동 및 지역 내 배출 모두에 의한 것으로 보인다. 아쉽게도, KORUS-AQ 동안 서울 지상 관측소에서 지역 및 풍상측 전구물질의 기여를 더 정량적으로 평가하기 위한 CO_2 측정은 시행되지 않았다. ***이러한 이유로, 서울의 지상 관측소에 고정밀 측정을 추가함으로써 월경성 대비 지역 내 가스상 전구물질로부터의 미세먼지 생성에 대한 더 나은 통계치를 제공할 것을 권고한다.*** 이러한 수치는 한국과 중국 사이의 CO/CO_2 배출 비 사이에 극명한 차이가 있을 때만 유용함을 유념해야 한다. 오염물질 배출은 끊임 없이 변화하므로, 기술과 연소 효율 및 인간 활동의 변화로 인해 배출 비율이 변화하거나 시간이 경과한 경우 이들 수치를 평가하기 위해서는 일정한 주의가 요구된다.

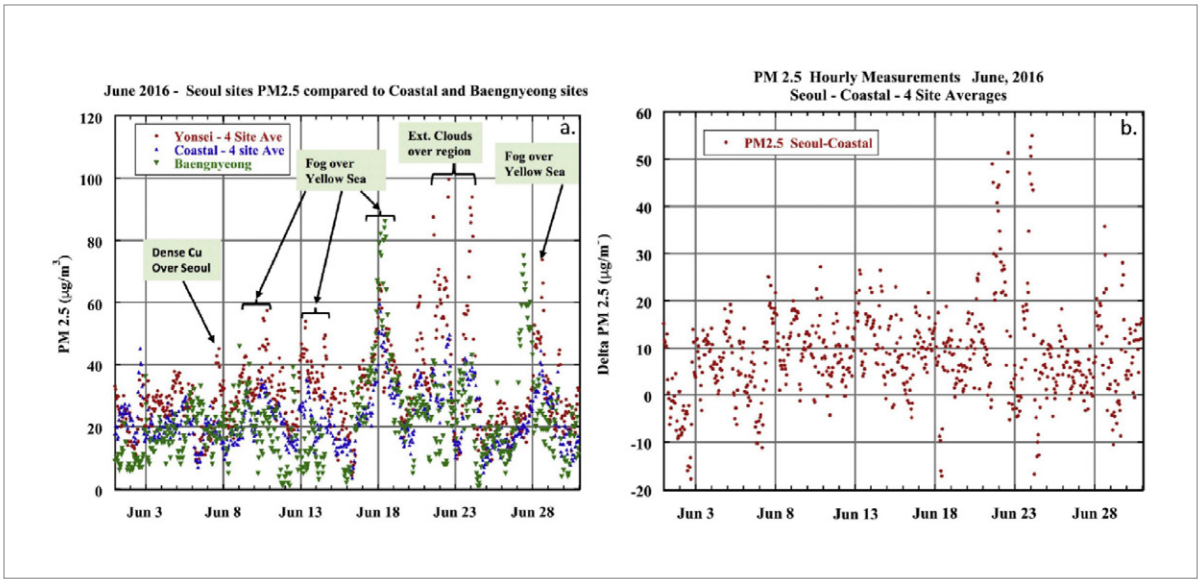


그림 2-8. a) 2016년 6월 1일부터 6월 30일까지 서울 중심지 및 서해 연안 대비 백령도 관측소(서울 중심지에서 북서쪽으로 약 210km)에서의 시간별 $PM_{2.5}$ 측정 시계열. b) 서울 중심지 평균과 해안 지역 평균 간 시간별 $PM_{2.5}$ 차이에 대한 시계열. $PM_{2.5}$ 수준이 가장 높은 날 중 일부, 특히 6월 22~23일과 6월 28일에 해안 지역보다 서울에서 훨씬 높은 값을 보이는 것에 유념할 것(그림 출처: Eck 등, 2020).

Eck 등 (2020)은 KORUS-AQ 연구 기간 동안 지상 기반 에어로졸 로봇망(AERONET: AErosol RObotic NETwork) 자료를 조사하고, 나머지 캠페인 활동이 종료된 이후 2016년 6월말까지 평가를 계속했다. 이들은 2016년 6월 전반에 걸쳐 $PM_{2.5}$ 피트 농도 발생이 흐린 날씨 및/또는 안개 상태와 관련이 있는 것을 발견했으며(그림 2-8), 안개/구름 상태는 $PM_{2.5}$ 농도 증가와 연관되어 있을 뿐만 아니라, 관측된 PM2.5 농도는 해안 지역 풍상 측 보다 서울 지역이 더 높은 것을 확인했다. 이들의 관측은 이동/연무기 동안 이러한 기상학적 상태와 관련된 국지적 $PM_{2.5}$ 생성에 대한 관측 결과와 일치한다. 이 결과는 한국의 늦은 봄 및 초여름 동안 $PM_{2.5}$과 관련된 대기질 악화에서 국지적 불균일 미세먼지 생성이 중요한 역할을 할 가능성이 있음을 시사한다.

2.6. 미세먼지 생성 기여 요인의 모델 반영

미세먼지 생성에 기여하는 다양한 요인들은 아직 모델에 충분히 반영되지 않았다. 더 정확한 대기 관측 및 대기 과정에 대한 더 완전한 이해를 위해 모델을 개선하려는 노력이 이루어지고 있지만, 모델과 관측 간의 차이로 인해 발생하는 지식 격차의 원인을 파악하고 이를 해결하기 위해 노력하는 것이 중요하다. 예를 들어, J. Choi 등의 모델링 연구(2019)에 따르면, KORUS-AQ 기간 중 $PM_{2.5}$가 가장 높은 기간(예: 정체기간 후반 및 이동/연무기 초반)에 중요한 차이점을 확인하였다. 이러한 차이는 해당 기간 동안의 $PM_{2.5}$ 발생을 좀 더 면밀히 관찰해야 할 원인을 제공한다는 점에서 중요하다.

이전 절에서 논의한 것처럼 모델 개선이 필요한 분야가 몇 가지 있다. 여기에는 가스상 VOC 전구물질 파악을 위한 연구와 더불어 정체 상태에서 SOA 생성을 재현할 수 있는 것으로 알려진 전구물질에 대한 대기 반응 경로를 파악하기 위한 추가 연구가 포함된다(자세한 내용은 Choi 등, 2019, Nault 등, 2018 및 H. Kim 등, 2018 참조). 모델에서 질산염의 불균일 생성은 자주 과대 추정되는 반면, 황산염의 불균일 생산은 과소 추정되기 때문에 미세먼지 질량의 합은 잘 설명되지만, 개별 반응 경로는 그렇지 않다(이에 대한 자세한 내용은 Jordan 등, 2020 및 참고문헌 참조). 예를 들어, 아시아에서의 연무 발생 중 황산염 불균일 생산은 활발히 연구되고 있는 분야다.

$PM_{2.5}$ 발생에서 중요한 것으로 나타난 한 가지 요소는 대기 경계층 고도의 일중 주기다. 야간 경계층 고도는 미세먼지의 분포 및 역학과 관련되어 있으므로 이를 측정하는 것은 특별히 더 어렵다. 이는 부분적으로 경계층 고도가 뜻하는 바가 그것의 측정에 사용된 파라미터에 따라 달라지기 때문이다(예: 기온 및 역학을 토대로 한 기상학적 정의 혹은 가스 또는 미세먼지 분포를 토대로 한 화학적 정의). 미세먼지 생성, 축적 및 확산과 관련된 주간 및 야간 경계층 역학을 이해하기 위한 적합한 자료 산물을 개발하는 데는 어려움이 따른다. ***그럼에도 불구하고, 특히 지표에서의 미세먼지 역학과 관련된 경계층 일중 역학의 특성을 밝히기 위한 역량을 향상시키기 위해 한국의 현재 운고계 네트워크로부터 경계층 고도에 관한 산물을 개발할 것을 권고한다.***

2.7. 진행 중인 연구

KORUS-AQ 연구를 통해 획득한 풍부한 자료는 미세먼지와 관련된 다양한 주제에 걸쳐 진행 중인 연구에 계속 사용되고 있으며, 시간이 지남에 따라 국제 학술지에 더 많은 연구가 발표될 것으로 기대된다. 위에서 언급한 바와 같이 연무 조건에서 SIA 생성에 기여하는 메커니즘에 대한 이해를 증진시키기 위한 연구가 진행 중이다. 미세먼지 산성도 및 암모니아(NH_3)의 역할에 대한 한층 깊은 이해가 이러한 연구에 기여할 것으로 예상된다. 예를 들어, T. Park 등의 연구(준비 중)는 한국이 암모니아가 풍부한 지역임을 보여준다(그림 2-9). 그림 2-9(왼쪽 패널)는 계산된 $H^{+}_{(미세먼지)}$ 농도와 SO_4^{2-} 농도 사이의 관계가 미세먼지 내 SO_4^{2-}의 형태에 따라 달라지는 것을 보여준다. $[NH_4^{+}]/[SO_4^{2-}]$ 몰비가 2 이하인 것은 미세먼지 내에 존재하는 것으로 나타난 네 가지 형의 황산염 사이에 일부 결합이 일어났음을 시사한다. 이때, DC-8에서 AMS를 사용하여 측정한 마이크로미터 미만의 입자는 평균적으로 암모늄과 더불어 질산암모늄에서 기인한 과량의 황산암모늄에 의해 완전히 중화된다. "암모늄 초과량"은 $[NH_4^{+}]/[SO_4^{2-}]$ = 1.5를 충족시키는 데 필요한 양을 초과하는 양으로 정의된다. 질산염/황산염 비율은 암모니아 초과량이 증가하는 것과 함께 증가하는 것으로 나타났다(그림 2-9, 오른쪽 패널 참조). 아쉽게도, KORUS-AQ 동안 DC-8에서는 NH_3를 측정하지 않았다. ***따라서 향후 연구를 위해 서울에서 제한적인 표적 세트에 대해 시행될 새로운 측정에 고정밀 NH_3 측정을 추가할 것을 권고한다.***

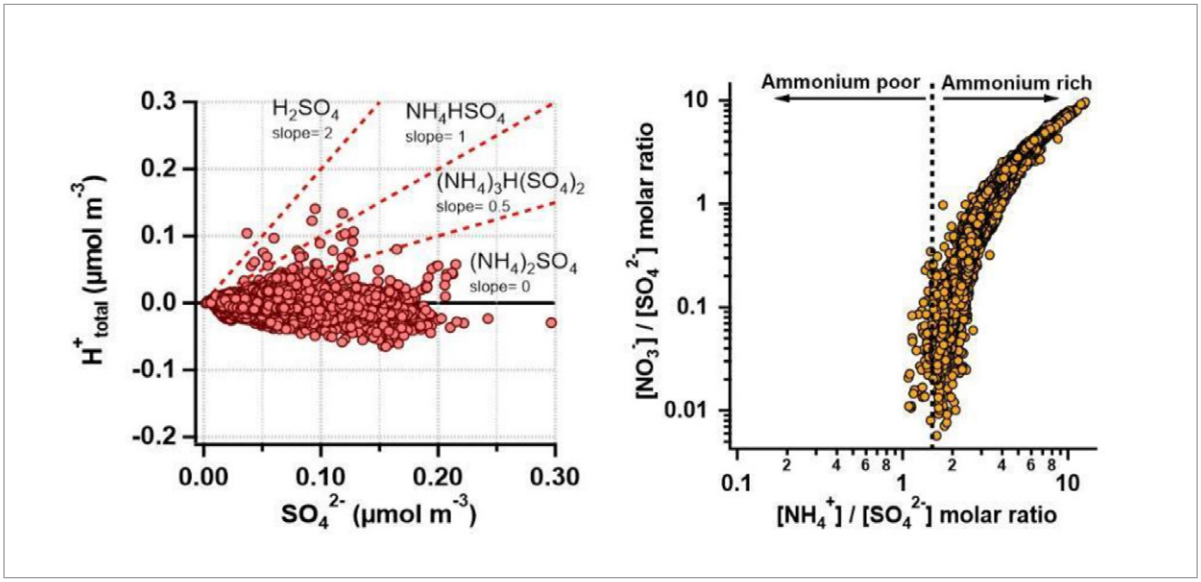


그림 2-9. DC-8의 관측에 따르면 계산된 $H^{+}_{(미세먼지)}$ 농도와 SO_4^{2-} 농도 사이의 관계는 미세먼지 내 SO_4^{2-}의 형태에 따라 달라지는 것으로 나타남(왼쪽 패널). 질산염/황산염 몰비는 "암모늄 초과량"의 함수에 따라 증가(오른쪽 패널)(그림 출처: T.Park 등, 준비 중).

2.8. 맺는 말

$PM_{2.5}$ 대기오염 완화를 위한 향후 연구에 크게 일조하기 위해 대기오염측정망 내 한 곳 이상의 관측소에서 추가 파라미터에 대한 표적 모니터링을 시행할 것을 권고한다. 첫째, 월경성 이동 대비 국지적 배출을 평가하기 위한 지표로서 CO 및 CO_2 고정밀 측정이 필요하다. 둘째, 가스로부터 미세먼지의 2차 생성과 기상 상태 간의 상호작용을 보다 정확히 평가하고 기록하기 위한 고-시간해상도의 에어로졸 성분 측정이 필요하다. 셋째, 연무 발생을 이끄는 화학적 및 기상학적 과정의 결합에 대한 이해를 증진시키기 위해, 그로부터 미세먼지 수분량의 계산이 가능한 가습 및 건조 미세먼지 산란 측정이 필요하다. 그리고 네 번째로, 무기 미세먼지 형성, 미세먼지 산도 및 관련 미세먼지 반응 경로의 모델 평가를 완료하기 위한 고정밀 NH_3 측정이 필요하다. 마지막으로, 에어로졸 역학과 관련된 경계층 고도의 일중 주기의 특성을 규명하고 $PM_{2.5}$ 발생에서 혼합과 확산의 역할을 더 잘 이해하기 위해 현재의 운고계 측정으로부터 산물을 개발할 것을 권고한다.

3장 오존 오염

주요 결과

- 서울 수도권 상공에서의 오존 일일 변동량은 지역 내 화학반응이 오존 초과를 유발함을 입증한다. 오존량은 공해가 발생한 동안에는 늦은 오후에 100ppbv를 훨씬 초과할 수도 있다.
- 지역 내 생성 외에도, 거대하고 안정적인 저장고 역할을 하며 대기 저층에 중앙값이 80ppbv 정도인 배경 오존 농도가 존재하고 있어 지역적 오존 문제 또한 있음을 시사한다.
- 관측을 토대로 오존 생성율을 계산한 결과, 알켄에서 이소프렌으로의 2차 기여에서 C_7+ 방향족 화합물이 주된 역할을 하는 것으로 나타났다(이들 화합물의 배출원에 대한 상세한 내용은 4장 참조).
- 화학적 이동 모델(Chemical Transport Model) 시뮬레이션은 배출량 감소에 대한 오존의 예상 민감도를 보여주었으며, NO_x가 제어된다면 오존은 도심에서 증가하는 한편 국내 나머지 지역에서는 감소할 것으로 예측되었다. VOC가 추가로 제어될 경우, 도심에서의 오존 증가 현상을 피할 수 있을 뿐만 아니라 국내 전역에 긍정적인 영향이 있을 것이다.
- 이른 아침에 올림픽 공원에서 아질산(HONO) 농도를 관측한 결과 이 농도는 오후의 오존 최고 농도와 관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 모델로 잘 설명되지 않는 추가적인 화학반응이 있음을 나타내며, 도심지역에서 오존을 제어하기 위한 NO_x 저감의 추가적인 이점이 있음을 시사한다.

KORUS-AQ 오존 연구 결과는 동일한 종의 VOCs(C_7+ 방향족)에 가장 높은 민감도를 보이는 오존을 규명하는 것과 함께 NO_x 및 VOC 저감의 공동 이점(co-benefit)을 밝혀냄으로써 $PM_{2.5}$에 대한 연구 결과를 보완한다. NO_x만 감소할 경우 도심 지역의 오존 오염이 악화될 것으로 예상되므로 NO_x 및 VOCs의 동시 저감은 특히 중요하다. 국지적 오존 농도를 감축하기 위한 활동은 높은 지역적 오존 배경 농도(대략 80ppbv)로 인해 제한되므로, 오존 전구물질 배출과 관련해 한국과 그 주변 국가의 공동의 노력이 촉구된다.

3.1. 한국에서의 장기 모니터링 결과

한국에서의 장기 모니터링 결과, 오존 오염은 지난 30년간 느리지만 꾸준히 확대되어 온 것으로 나타났다(Kim and Lee, 2018). KORUS-AQ를 통해 서울 수도권(SMA)의 인구 고 밀집 지역에 초점을 맞춰 현재 오존 증가를 이끄는 요인에 대한 상세한 조사가 가능해졌다. 그림 3-1은 태화산 학술림 집중 측정소 부근 서울 동부에서 DC-8이 나선형으로 상승하며 측정한, 고도에 따른 오존의 일중 통계를 보여준다. 가장 낮은 고도(km)에서 뚜렷한 일중 패턴이 관측되었으며, 이때 오존 중앙값은 오전에 68ppbv에서 오후에 107ppbv의 범위를 보였다. 오존량이 이처럼 넓은 범위를 보이는 이유는 이른 아침에는 NO_2로 분해되기 때문에 오존 농도가 낮은 반면 늦은 오후에는 하루 동안 일어난 광화학적 생성으로 인해 최고 농도를 보이게 되는 것과 관련이 있다. 1~2km까지 이동하면 오전의 NO_2 분해 효과가 감소하고 오후 동안의 경계층 깊이가 항상 2km에 달하는 높이까지 오존 오염을 일으키는 것은 아니므로 오존 중앙값의 범위는 더 좁아진다(72~90ppbv). 이 층 또한 광화학 반응의 영향을 크게 받으며 오전과 오후 사이 오존 농도가 거의 20ppbv까지 변화한다. 아마도 가장 눈에 띄는 부분은 2~4km 층의 오존량으로, 이 층에서의 오존 중앙값은 80ppbv 언저리이며 대한민국 대기환경 기준에 따른 8시간 평균 오존 상태의 허용한계와 동일한 60ppbv를 거의 항상 초과한다. 이는 지표면 부근에서의 지역 내 오존 생성과 더불어 상당한 배경 오존 농도 문제가 존재하고 있어 자유 대류권 저층으로부터의 공기의 유입으로도 오존량 기준을 위반하기에 충분함을 보여준다. 대류권 저층(2~4km)에서의 일일 오존 생성율은 좀 더 온화한 수준(5~8ppbv)으로, 국지적 또는 지역적 원인에 의한 것인지 와는 상관없이 국지적인 조치와 인근 국가에 의한 지역적인 조치의 조합을 통해서만 오존 농도 수준을 개선할 수 있다.

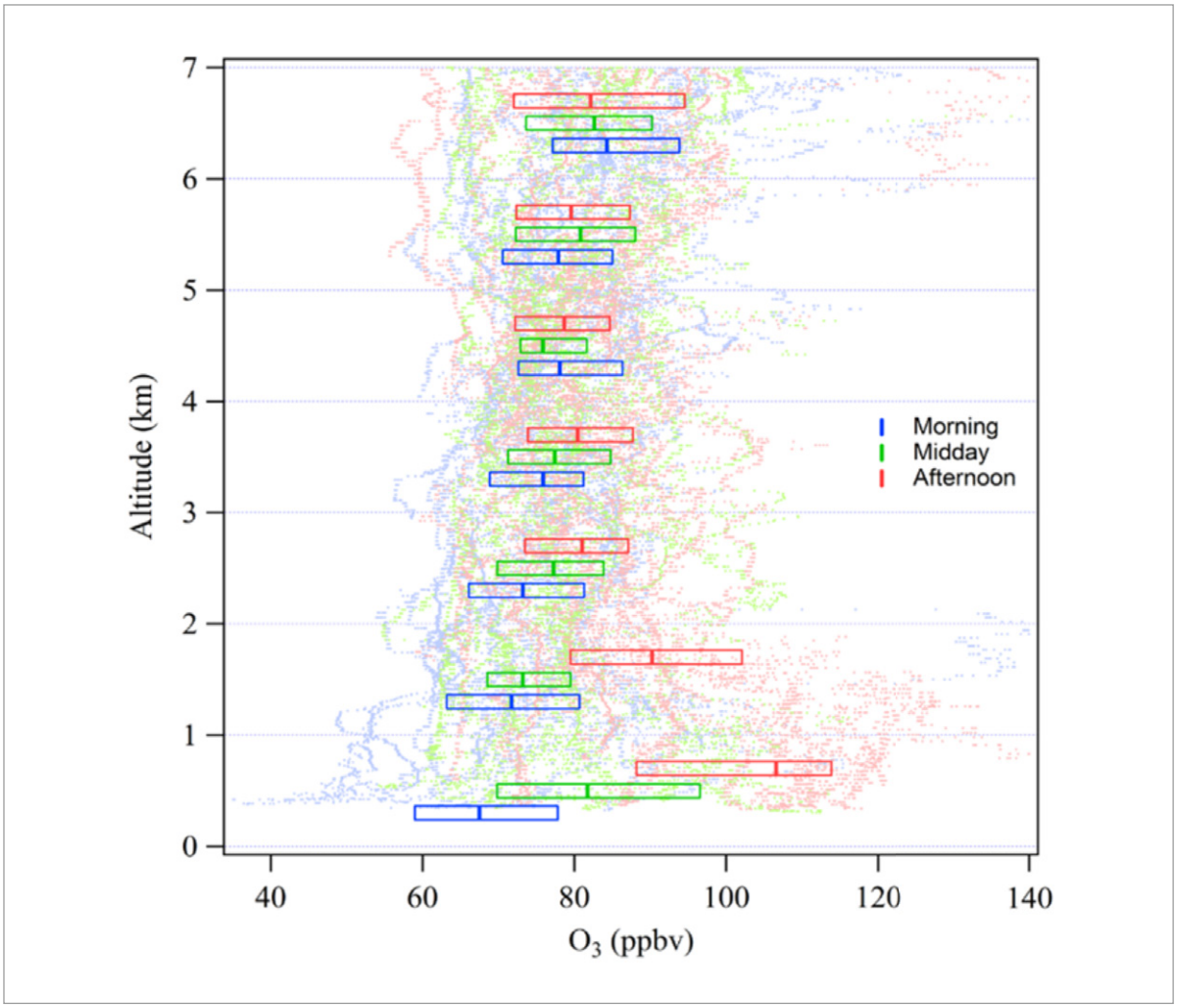


그림 3-1. 서울 남동쪽 태화산 학술림 부근에서 DC-8이 52건의 고도별 관측을 진행하는 동안 관측한 오존의 수직적 분포. 상자는 1km 구간에 대해 개별 측정치의 중앙값과 사분위값을 나타냄.

3.2. 다양한 등급의 VOCs에 대한 오존 민감도

한국의 오존 오염에 관한 세부 사항은 0-D 박스 모델(Schroeder 등, 2020)과 3-D 전지구적 화학 수송 모델(Oak 등, 2019)을 모두 사용하여 조사했다. 이들 연구는 각 접근 방식의 상대적 강점을 고려하여 상호보완적으로 수행되었다. 박스 모델은 관측 조건에서 화학적 생성율을 직접 평가할 수 있다는 확실한 이점이 있기 때문에 전구물질에 대한 오존 생산의 상세한 민감도를 검사하는 데 이상적인 모델이다. 3-D 전지구적 화학 수송 모델은 배출, 화학반응, 이동 및 물리적 과정에 대해 전반적으로 모두 다루고 있으므로, 오존량과 배출량 변화에 따른 반응을 평가할 수 있다. 두 모델링 연구 모두 그 결과에 대한

신뢰도를 제공하기 위해 관측치와의 비교를 통해 모델 성능에 대한 세심한 정밀 조사와 평가를 거쳤다. 아래에서 검토한 바와 같이, 이러한 평가는 오존 오염에 대한 화학 반응을 적절히 반영할 수 있도록 모델을 개선하는 데 필요한 귀중한 증거를 제공했다.

Schroeder 등(2020)은 DC-8에서 이루어진 전구물질, 광분해 빈도 및 광화학적 산물에 대한 포괄적인 관측을 바탕으로 0-D 박스 모델을 사용해 서울 수도권에서의 순 오존 생성율을 계산했다. 초기 계산 결과 방향족 화합물, 특히 톨루엔 및 크실렌의 화학 반응 처리와 관련된 것으로 밝혀진 포름알데히드(CH_2O) 및 질산과산화아세틸(PAN: peroxyacetylnitrate)이 전체적으로 과대추정된 것으로 나타났다. 일반적으로 이들 화합물은 오염된 환경에서도 큰 역할을 하지 않지만, KORUS-AQ 기간 동안 관측된 양으로 인해 이들 화합물에 대한 가장 최근의 실험실 역학 연구를 반영하여 모델의 화학적 메커니즘을 신중히 개선하게 되었다. Schroeder 등은 올림픽 공원과 태화산학술림 사이에 나타나는 질소산화물의 큰 농도 구배와 관련해 오존 발생을 평가하기 위해 개선된 모델을 사용하여 서울 수도권 전역에서 NO_x 포화(VOC-제한 시) 상태가 만연한 것을 입증했다. 이 평가는 다른 연구팀에 의해 입증되었다(Kim 등, 2018; H. Kim 등, 2020). 이후 모델에서 다른 종류의 VOCs를 제거하고 오존 생성율에서의 변화를 평가함으로써 민감도를 계산했다(그림 3-2). 지금까지 가장 큰 반응은 C_7+ 방향족 화합물(예를들어 톨루엔 및 크실렌)에서 관찰되었으며, 본 모델에서 제외했을 때 평균 오존 생성량 감소분 중 32%를 차지했다. 그 생체 배출원으로 인해 독립적으로 평가된 이소프렌(15%)을 제외하고, 알켄(14%)에서도 유의한 반응이 나타났다. 이러한 화합물은 그 영향력이 다른 VOC 종을 훨씬 능가하므로 오존 저감 전략의 가장 중요한 표적이 된다. 이들 결과는 RSSR(NER & NASA, 2017)에 제시된 결과와 정성적으로 유사하지만, 새로 수행된 계산을 통해 오존 생성량 및 전구물질에 대한 그 민감도를 더 정확히 정량화할 수 있었다.

Schroeder 등은 또한 서울 수도권에서의 지역적 오존 발생 수준이 여전히 NO_x 배출량과 관련이 있음을 감안하여, NO_x 수치가 감소했을 때 오존 생성 반응을 계산했다. 오존 생성을 일으키는 과산화 라디칼의 순환이 NO_x-포화 상태에서는 억제된다는 점을 고려할 때, 이러한 계산은 두 가지 효과를 입증했다. 첫째, NO_x 감소는 오존 발생율을 높이고 둘째, 감소된 NO_x 상태에서 화학적 순환의 증가는 NO_x의 수명을 단축시키고 배출량의 단순 감소율보다 더 급격한 속도로 NO_x의 공간 점유 수준을 감소시킨다. 그러나 이들 두 효과의 상호작용을 위해서는 3-D 화학 이동 모델을 이용해 NO_x 분포에 대한 영향과 그로 인해 발생한 오존량의 영향을 완전히 정량화해야 한다.

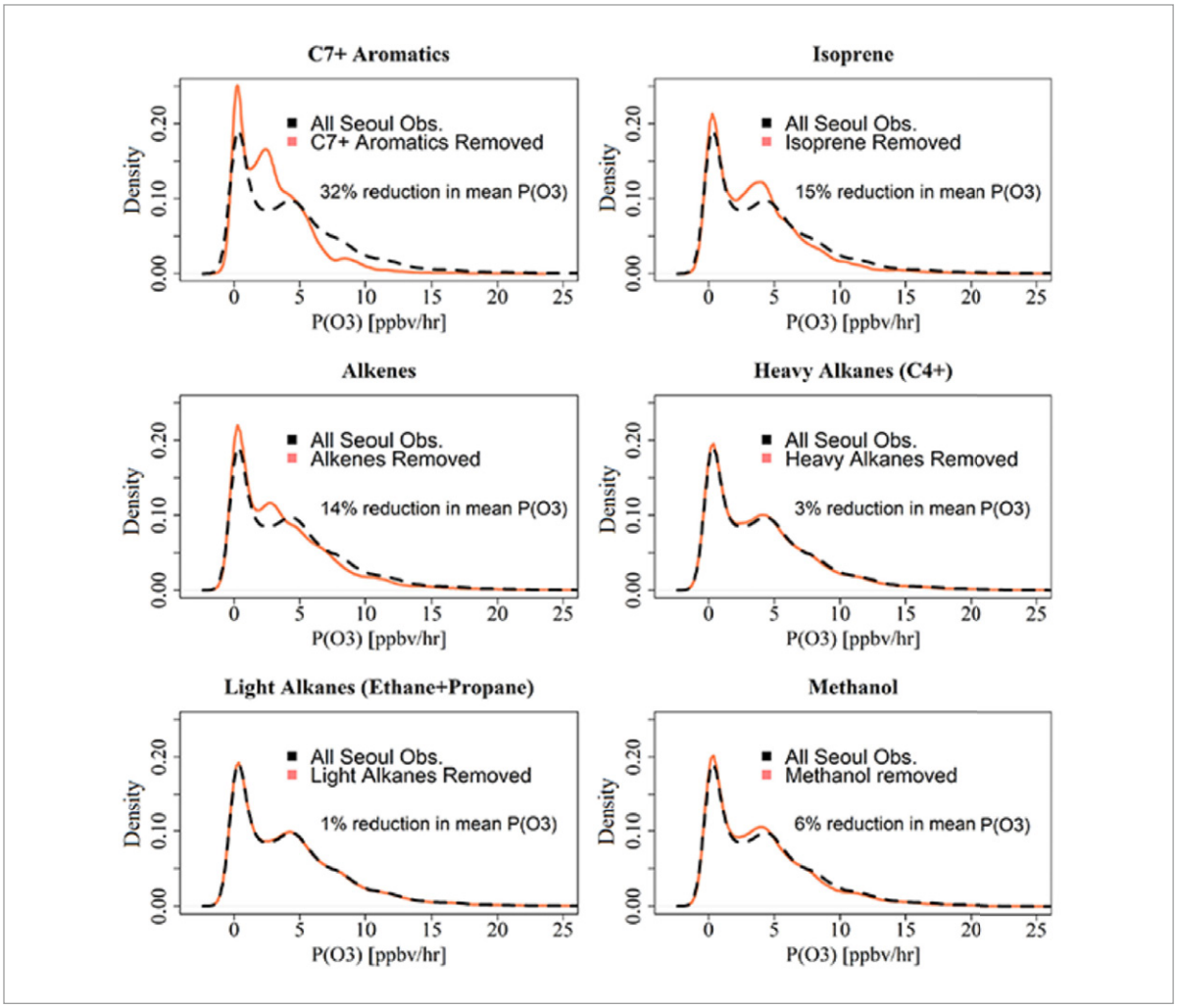


그림 3-2. 서울에서의 순 오존 발생량($P(O_3)$) 분포 모델링. 해당 VOC 유형을 제외했을 때의 계산값(각 패널의 주황색 선)과 모든 VOCs 전구물질을 포함한 "기준 사례" 계산(각 패널의 검은색 파선) 비교. 각 패널은 계산에서 제외된 VOC와 $P(O_3)$에서의 감소를 통합한 결과를 나타냄(그림 출처: Schroeder 등, 2020).

3.3. 배출 감소에 대한 오존 민감도의 모델 평가

Oak 등(2019)은 GEOS-Chem 화학 수송 모델을 사용하여 오존 생성 효율과 NO_x 및 VOC 배출 제어에 대한 오존의 예상 반응을 조사했다. 이 모델은 방향족 화학반응에 대한 모델 개선, 레이더 관측을 토대로 PBL 고도에서의 일중 변동량 조정, KORUS v2.1 인벤토리를 기준으로 이후 NO_x 배출량 50% 증가 등 세 가지 주요 조정이 이루어졌다. 이러한 조정을 통해 모델이 관측치에 더 잘 부합하도록 하고 Schroeder

등(2020)의 관찰-기반 박스 모델과의 비교도 원활히 수행할 수 있었다. Oak 등은 GEOS-Chem 모델을 통해 더 지역적인 관점을 도입함으로써 VOC가 제한된 도시/산업단지와 이보다 더 넓은 한반도 사이에서 나타나는 광화학적 오존 반응에서의 구배를 보여줄 수 있었다. 배출 제어에 대한 오존의 반응을 평가하기 위해 민감도가 계산되었다(그림 3-3). NO_x 배출이 30% 감소할 경우 한반도 전역에 걸쳐 오존 발생 효율이 증가했지만, 이러한 효과는 NO_x 감소를 비롯해 NO_x 수명 단축에 따라 부분적으로 상쇄되었다. 이는 북서부 해안을 따라 존재하는 점오염원인 산업단지들을 포함해 서울 수도권에서 가장 뚜렷이 관찰되었다. 남동부의 부산, 포항, 울산 및 남부의 여수와 동부의 강릉 등 VOC가 제한된 다른 해안 도시 및 산업 지역에서도 이러한 효과가 현저히 나타났다. NO_x만 단독으로 감소되었을 때 앞서 언급한 도심/산업 지역에서는 전체적으로 오존이 3~6ppbv 증가한 한편 농촌 지역에서는 오존이 몇몇 ppbv 수준으로 약간 감소하는 영향이 나타났다. 이러한 영향은 NO_x 및 VOC 배출을 동시에 30% 감소시켰을 때 더욱 개선되었다. 이 시나리오에서, 도심/산업 지역의 오존은 대체로 크게 변화하지 않은 반면 국내 나머지 지역에서는 NO_x 감소와 같은 더 큰 이점이 있는 것으로 나타났다. 이때 NO_x 감소 수준은 VOC 감소로 인한 오존 발생 효율의 제한적 증가를 추월했다. 도심/산업 지역 및 농촌 지역에 대한 평균적인 영향을 통합한 결과를 표 3-1에 요약했다. 이 결과는 도시 산업 지역에서의 오존 증가를 방지하기 위해 NO_x 및 VOCs를 동시에 저감할 필요성을 강조한다.

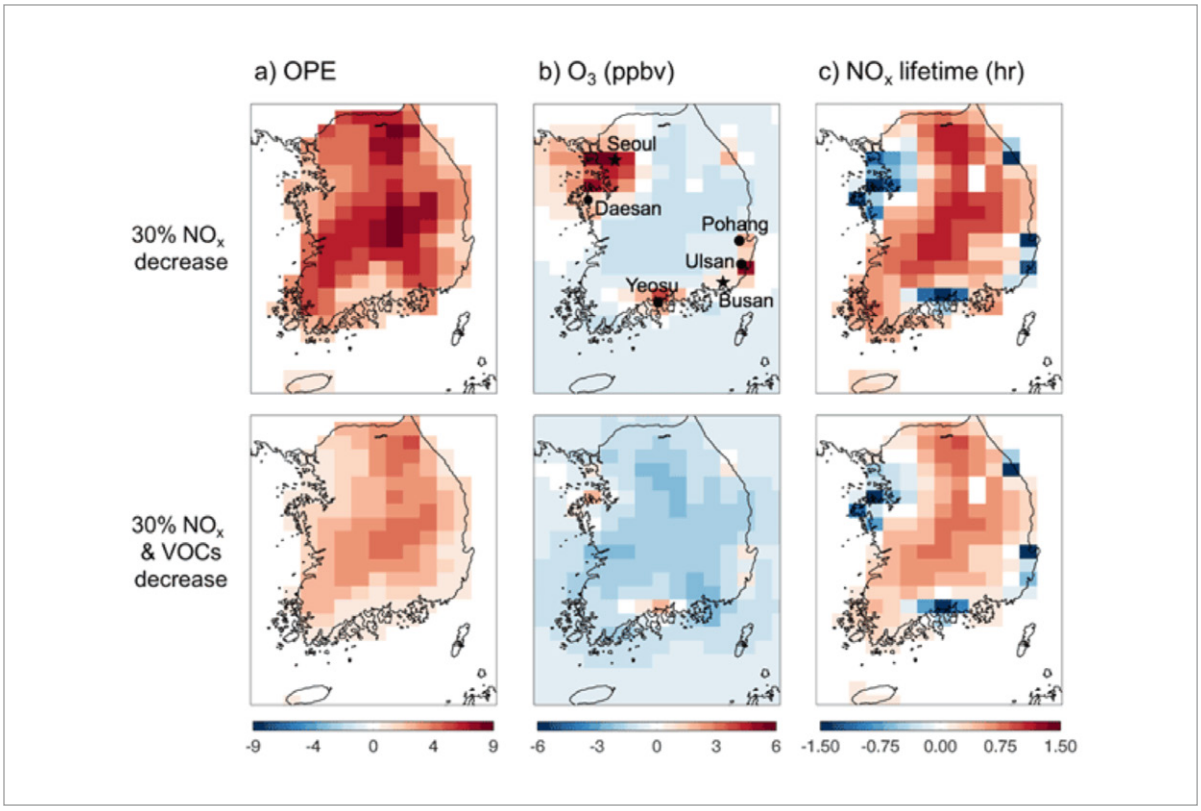


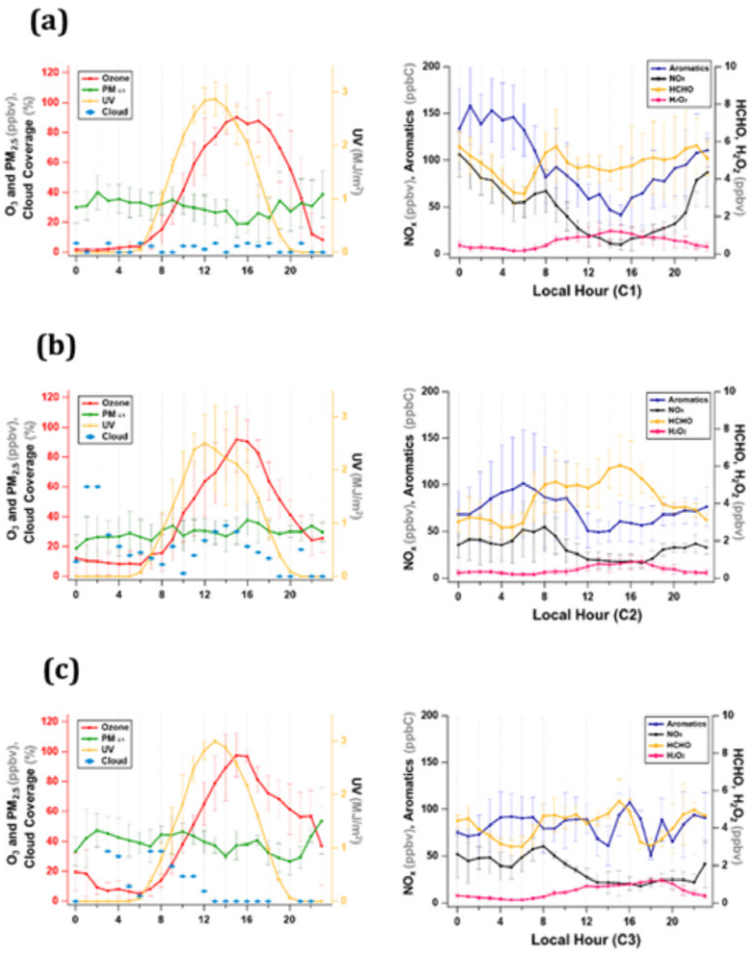
그림 3-3. OPE, O_3, 및 NO_x 수명 변화 모의 값의 공간적 분포. 배출량 변화에 대한 반응으로 지표면에서의 a) OPE, b) O_3 수준 및 c) NO_x 수명 모의 값의 변화(조정된 배출 조건에서의 값에서 기본 조건에서의 값을 뺀 양)에 대한 공간적 분포를 나타냄. 주요 대도시권과 산업 지역은 각각 별과 원 모양으로 표시(그림 출처: Oak 등, 2019).

표 3-1. GEOS-Chem의 배출 저감 시나리오에 대한 오존 화학반응 민감도(표 출처: Oak 등, 2020)

	도심/산업 지역		농촌 지역	
	NO_x 30% 감소	NO_x 및 VOCs 30% 감소	NO_x 30% 감소	NO_x 및 VOCs 30% 감소
O_3	+3%	0%	-1%	-2%
NOx	-36%	-36%	-34%	-28%
$P(O_3)$	+13%	-8%	-15%	-18%
OPE	+40%	+18%	+32%	+17%

3.4. 오존 생성에 유리한 전구체 및 조건에 관한 지표

오존의 평균 변화량은 작은 것으로 나타났지만, 이러한 배출 저감 시나리오는 오존 오염을 줄이기 위한 시도의 초기 단계만을 보여준다. 또한 이 시나리오는 날마다 발생할 수 있는 극단적 상태가 아닌 평균 상태를 반영한다. H. Kim 등(2020)은 올림픽 공원 집중측정소에서 수집된 관측자료를 분석하여 오존 제어 요인에 대해 보다 상세한 정보를 제공한다. 기상 상태가 중요한 역할을 하는 것으로 나타났지만, 오존 고농도 에피소드는 모든 기상 체제에서 관찰되었으며, 궁극적으로 에피소드가 없는 날과 비교했을 때 오존 고농도 에피소드는 이른 아침에 높은 UV 및 더 높은 전구물질 농도 조건과 관련이 있었다(그림 3-4). 따라서 배출량이 감소하면 전구물질의 최대 농도를 제한하는 것을 통해 에피소드 발생 빈도 및 그 심각성을 완화할 수 있을 것으로 보인다.



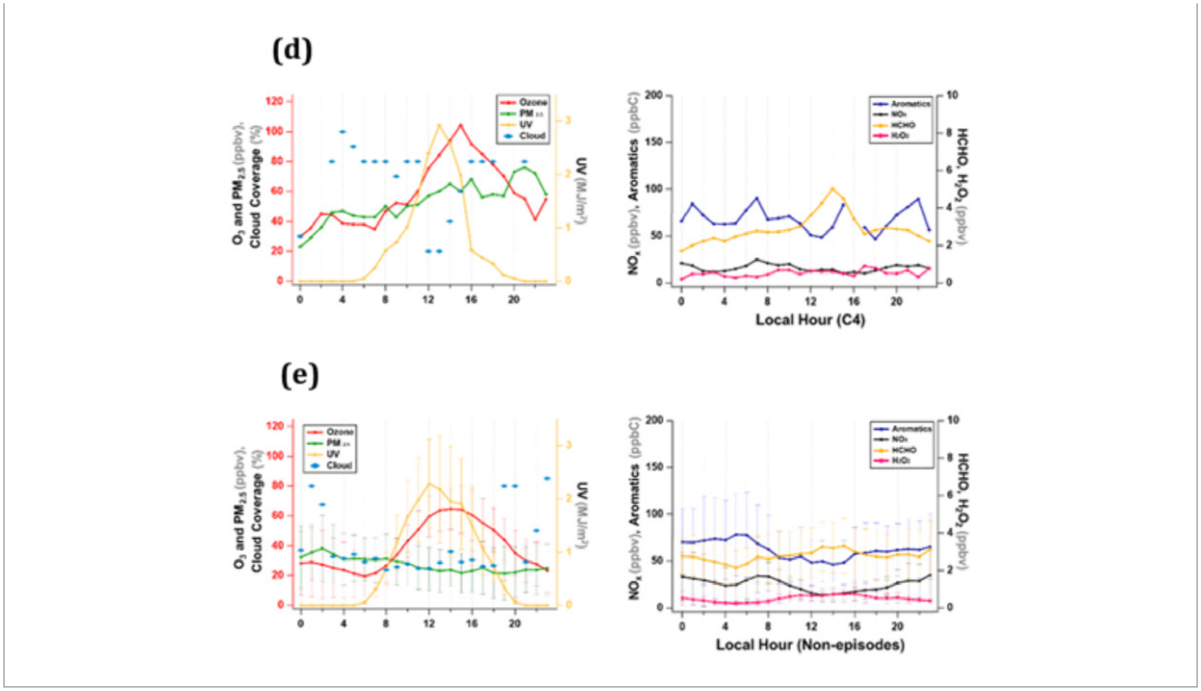


그림 3-4. (a) 정체기간(C1), (b) 차단기간(C2) 및 (c-d) 이동기간(C3 및 C4) 등 다양한 기상 조건과 관련해 네 건의 고농도 O_3 발생 에피소드에 대한 O_3, $PM_{2.5}$, 구름량, 자외선(좌측 패널) 및 방향족, NO_x, HCHO 및 H_2O_2(우측 패널)의 일중 변동량. 비교를 위해 (e) 사례 미발생 조건도 제시(그림 출처: H. Kim 등, 2020).

H. Kim 등(2020)이 올림픽 공원의 관측 결과에 대해 민감도를 계산한 결과, NO_x만 감소시킬 경우 서울의 오존량이 증가할 것이라는 예상과 VOC 민감도를 추가로 제공하였다. 그러나 지금까지 논의된 모든 시뮬레이션은 Gil 등(미발표)에서 강조된 HONO 관측 수준을 충분히 설명하지 못한다. HONO는 아직 충분히 밝혀지지 않은 불균일 반응을 통해 형성되며, 이에 Gil 등은 8가지의 화학 및 기상학적 변수들과 HONO 간의 상관관계를 토대로 한 인공 신경망을 이용해 HONO에 대한 시뮬레이션 작업을 수행했다. HONO과 오존 사이에는 직접적인 상관관계는 없지만, 이른 아침에 기록된 HONO 최고 농도는 오존의 오후 최고 농도의 신뢰할만한 지표인 것으로 나타났다(그림 3-5). 이는 이른 아침 HONO의 광분해로부터 추가적으로 배출된 라디칼이 오전 동안 오존 형성 속도를 증가시킬 뿐만 아니라 오후의 오존 최고 농도에 실질적으로 기여할 수 있음을 시사한다. HONO 화학 반응의 영향이 입증될 경우, 오존 생성에 대한 이러한 추가 기여로 인해 오존 저감에 대해 기존의 모델에서 예측된 것보다 더 효율적인 NO_x 배출 제어가 이루어질 수 있을 것이다.

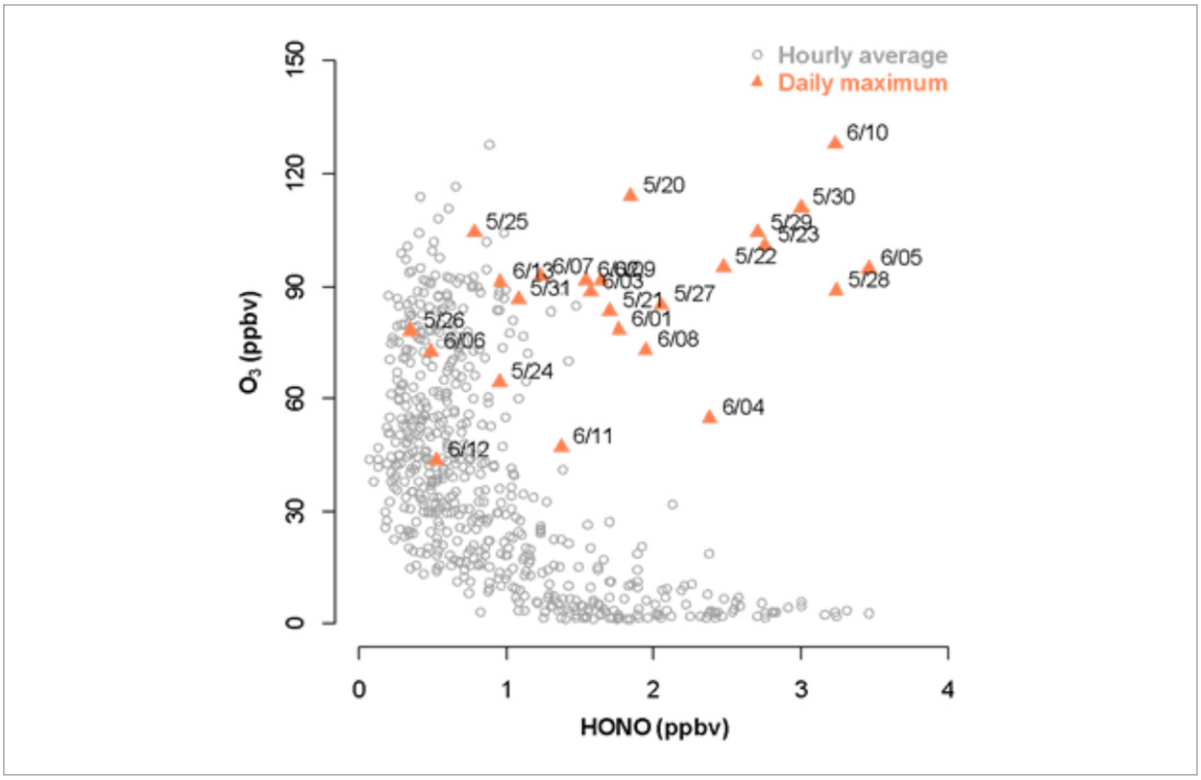


그림 3-5. 오존 및 HONO 사이의 상관관계. 시간별 평균 자료(열린 원)는 음의 상관관계를 보여줌. 삼각형으로 표시한 HONO(아침에 발생) 및 오존(오후에 발생)의 일일 최대 수치는 양의 상관관계를 보여줌(그림 출처: Gil 등, 미발표).

3.5. 맺는 말

한국의 오존 오염을 분석한 출판물들은 공통적으로 NO_x 및 VOC 배출 모두를 함께 감소시켜야 한다는 분명한 메시지를 전달한다. NO_x 저감은 지역적 오존 발생량을 제한하는 데 가장 효과적인 것으로 나타난 반면, VOC 감소는 라디칼 생성 및 오존 생성 효율을 저해할 수 있는 것으로 나타났다. 대부분의 인구 밀집 지역에서는 VOC가 제한된 환경이 조성되므로 VOCs에 대해 좀 더 공격적인 초기 저감 정책이 촉구된다. 이러한 조치는 NO_x 및 VOCs를 30% 이상 감소시키기 전에 인구 밀집 지역에서 발생할 수 있는 오존 상태 악화 가능성을 최소화할 것이다. 또한 오존과 미세먼지 오염은 NO_x 및 VOC 배출에 대해 서로 중복되는 민감도를 보이며, 방향족 VOCs는 두 유형의 오염에 있어 특히 중요하다. 이에 따라, 오존과 $PM_{2.5}$를 함께 다루는 공동 완화 전략이 장려된다. 이러한 활동은 심각한 공해를 억제하는 데 기여할 수 있지만, 높은 배경 조건을 감소시키기 위해서는 계속해서 인근 국가와의 지역적 협력을 우선 과제로 삼아야 한다.

4장 배출

4.1. 서론

인간 활동과 관련된 1차 오염 배출물질에는 질소 산화물(NO_x), 휘발성 유기 화합물(VOC) 및 이산화황(SO_2)과 같은 미량 기체가 포함된다. 이러한 배출물질은 대기질과 인간의 건강에 직접적으로 영향을 줄 뿐만 아니라 2차 오염물질(즉, $PM_{2.5}$ 및 오존)을 형성하므로 그 배출원과 배출 규모를 이해할 필요가 있다. 배출 인벤토리(emission inventory)는 대기로 방출되는 각 오염물질의 분포와 배출량을 계산한 값을 제시하며 매년 지역별 및 배출원별로 집계한다. 이러한 배출 인벤토리는 보통 정책 사용을 위한 국가별 배출물질 통계 수치를 이해하기 위한 목적으로 개발되지만, 대기질 모델링을 뒷받침하기 위한 과학적 평가의 중요한 구성 요소가 되기도 하다. 배출량은 일별, 계절별 및 연간 단위로 복잡한 변동성을 나타낸다. 배출량이 최고 수준의 정보에 기초하여 산정되었다고 하더라도, 그 정확성을 평가하기 위해서는 현장 관측이 필요하다. 현실적으로 모든 배출원을 규명하기는 어렵기 때문에 배출량 자료와 현장관측 간 차이가 다수 발견된다. 따라서 배출 인벤토리에 따른 모델 예측치를 관측 결과와 비교하면 과소 추정된 부분이 자주 관찰된다. KORUS-AQ는 배출 인벤토리를 개선하고 이를 관측치와 비교하여 광범위하게 평가할 수 있는 기회를 제공했다. 여기에는 참여연구진들이 모델링에 바로 사용할 수 있는 모델 입력 배출량(model-ready emissions)의 제공도 포함된다. KORUS-AQ 관측을 활용해 배출량을 평가 및 개선하는 일은 현재의 배출 수준과 대기질 간의 관계를 이해하고 향후 배출량 저감 전략으로부터 기대되는 결과를 효과적으로 예측하는 데 있어 매우 중요하다. 관측에는 화학종 분화된 휘발성 유기화합물질(VOC)에 대한 상세한 측정도 포함되며, 이를 통해 오존 및 유기성 2차먼지(SOA) 제어에 일조할 수 있는 구체적인 정책 권고사항을 제시할 수도 있다. 본 절에서는 상향식 배출 인벤토리 개발 및 평가, VOC 배출에 대한 관측 기반 분석, 점 오염원 배출 평가 및 진행 중인 평가에 대한 권고사항을 다룬다.

4.2. 상향식 배출 인벤토리 개발 및 평가

핵심 요점

- KORUS-AQ 연구 결과, 관측 및 모델링을 진행한 연구진으로부터의 피드백을 바탕으로 여러 버전의 KORUS 배출 인벤토리(v1, v2.1 및 v5)가 개발되었다. KORUS-AQ의 과학적 발견들에 따라 배출량의

업데이트가 요구되었지만 배출목록의 변경은 정책과의 연결성을 유지할 필요가 있으므로 에너지 정보, 시간 배분계수 또는 화학종 배분계수등 상향식 정보 업데이트에만 기반하여 시행되었다. 배분 대체물질 또는 화학종 분석 특성화 등의 상향식 정보를 배경으로 엄격히 시행되었다.

- KORUSv5 배출 인벤토리를 활용한 참여모델들의 앙상블(ensemble) 평균은 서울 상공 SO_2, NO_x 및 톨루엔(방향족 VOC)에 대한 DC-8의 관측 결과와 잘 부합했다. 이 세 가지 오염물질은 발전부문의 점오염원, 운송 및 용제 사용등 주요 배출원에 대한 배출량을 평가하는 데 사용되었다.

4.2.1 배출 인벤토리 개발 과정:

KORUS 배출 인벤토리는 KORUS-AQ 현장 연구 수행을 지원하기 위해 주로 CREATE(Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment; Woo 등, 2020a)를 바탕으로 개발되었다. KORUS 배출 인벤토리는 지리적으로 Streets 등(2003)에서 정의된 아시아 전역을 포괄하며, 아시아 전역에 대해서는 CREATE를 기반으로 하고, 한국은 CAPSS(Clean Air Policy Support System), 중국은 MEIC(Multi-resolution Emission Inventory for China), 기타 일본, 동남아 및 인도 지역등의 지역 인벤토리를 병합하여 개발하였다(Woo 등, 2020b, 준비 중).

인위적 배출의 경우 54개 연료 등급, 201개 하위 섹터 및 SO_2, NO_x, CO, VOCs, NH_3, PM_{10}, 및 $PM_{2.5}$를 포함한 13종의 오염 물질이 포함된다. KORUS 배출 인벤토리는 CREATE 배출 인벤토리의 형식을 그대로 유지하므로, 통합 정책 평가 모형 체계 및 Smoke-Asia(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions-Asia, Woo 등, 2012a) 배출 처리 시스템과 연계될 수 있다. 따라서 본 인벤토리는 과학적 대기 환경연구와 정책 지원에 모두 활용될 수 있다. 대기질 모델링에 사용되는 배출량은 SAPRC-99 화학 메커니즘(Carter, 2000) 및 월별 시간 배분을 사용한 SMOKE-Asia 배출량 처리 기법을 통해 생성되었다. 최종 모델 입력용 배출량은 아시아 지역의 경우 0.1도, 한국 지역의 경우 3km의 격자 해상도에서 생성되었다(그림 4-1).

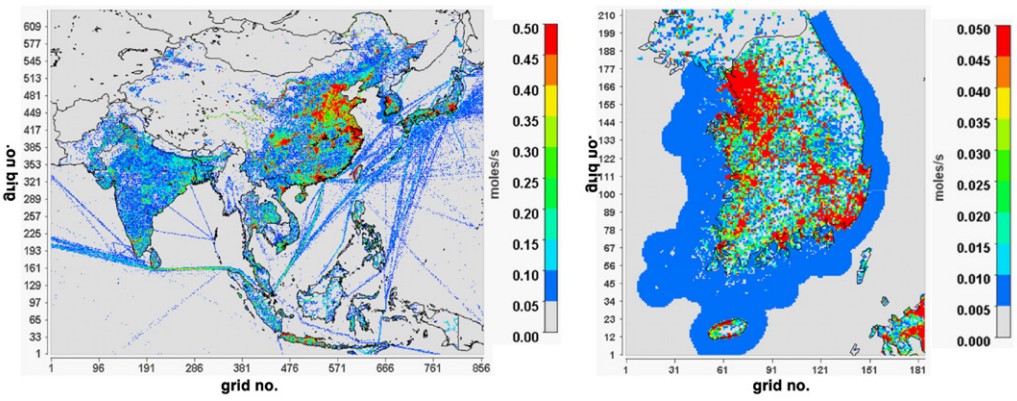


그림 4-1. 아시아(왼쪽) 및 한국(오른쪽) 지역의 NO_x 배출량에 대한 KORUS v5 모델 입력 배출량.

본 연구에서 차별화하여 시도된 것으로는, 표준 배출량을 KORUS-AQ 연구 수행을 위한 모델 입력 형태로 배포한 점을 들 수 있다. 이전의 연구들에서는 표준 배출자료를 인벤토리 수준에서 배포하고, 화학종 분화 및 시공간적 배분 등의 배출 처리는 개별 모델링 연구진이 수행하였기 때문에, 연구진들이 각각의 자료처리를 하는 과정에서의 알려지지 않은 변이가 발생하였다. KORUS-AQ의 경우 모델링 연구진들이 특정 모델의 요구 사항에 맞추기 위한 추가적 처리 과정이 거의 필요 없는 격자별 월별 화학종별 형태로 제공되는 표준 배출 입력장을 직접 사용할 수 있다(R. Park 등 2020). 이러한 추가적 투명성은 배출 처리의 차이가 모델 시뮬레이션에서의 차이에 어떻게 기여하는지 이해하는 데 유용하다.

4.2.2 배출 인벤토리 및 배출량 모델링의 변화

항공 현장 캠페인은 2016년 5월부터 6월 사이에 실시되었지만 배출, 화학적 변환, 월경성 이동의 기여 및 위성 응용에 관한 포괄적인 연구는 그보다 훨씬 더 긴 기간인 2015년부터 2020년까지 수행되었다. 5년간의 KORUS-AQ 연구 기간 동안 업데이트된 에너지 정보와 관측 및 모델링 연구 커뮤니티의 피드백을 바탕으로 다수의 배출 인벤토리 버전(버전1~버전5)이 개발되었다.

KORUSv1 배출 인벤토리는 2014년에 CREATE 버전 2.4(2010년 기준연도로부터 추정된 2015년 자료)을 토대로 개발되었으며 MAPS-Seoul 및 KORUS-AQ 의 모델링 예비연구를 지원하였다(Woo 등, 2020b, 준비중). 이후 2016년에, 한국에 대한 CAPSS 2015 추계배출량(CAPSS 2012 로부터 3년 추계한 배출 인벤토리) 및 아시아 나머지 지역에 대한 CREATE 버전 3.0(2015년 기준연도)을 토대로 인벤토리 버전

2.1이 개발되었다. 2013년부터 2015년 사이 새로 건설된 국내 발전소로부터의 배출량을 비롯해 중국의 대규모 점 배출원(LPS: Large Point Source)의 더 포괄적인 데이터베이스 또한 포함되었다(Jang 등, 2019, Oak 등, 2019).

KORUSv2.1의 주요 개선 사항은 중국 및 한국에서 중점적으로 수행된 최근 연구 자료들을 기반으로 19종의 새로운 화학종 프로파일을 생성한 것이다. 이러한 프로파일은 용제 사용, 이동 배출원, 주거지 배출원 및 산업 과정 등 여러 주요 부문으로부터 배출되는 물질의 화학적 성분에 대한 중요한 세부 정보를 제공한다(Woo 등, 2020b, 준비 중).

KORUSv5는 한국(CAPSS 2015), 중국(MEIC 2016) 및 일본(PM2.5 EI 2015)등 2018년에 제공된 새로운 국가별 배출 인벤토리를 이용해 2019년에 개발되었다. 당초 KORUSv5 배출 인벤토리는 이러한 신규 배출 자료를 토대로 초기 개발되었으며 관측 및 모델링 연구 커뮤니티의 피드백에 따라 후속 조정을 거쳤다(Woo 등, 2020b , 준비 중).

그림 4-2는 다양한 버전의 KORUS 모델링 배출에 대한 배출량 변화를 나타낸다. 이러한 배출량은 연간 산정치이므로 월별 차이와 관련된 영향은 포함되지 않았다. 전체적인 KORUS 배출 변화량은 다음과 같이 설명할 수 있다. 국내 NO_x 배출은 KORUSv1에 비해 KORUSv5에서 37% 증가했는데, 이는 Goldberg 등(2019) 및 Miyazaki 등(2019)의 하향식 분석 결과와 동일한 방향성을 보인다. 또한 이러한 변화는 좀 더 최신 상향식 배출 자료인 2016년 CAPSS 인벤토리(2019년까지 제공되지 않음)와도 일치한다. 2016년 CAPSS는 이동식 배출가스 측정장비(PEMS: Portable Emissions Measuring Systems) 기반 배출 계수를 적용함에 따라 도로 이동 부문에서의 NO_x 배출량이 30% 까지 증가했음을(서울시의 기준) 보여주었다. 이러한 CAPSS 업데이트는 시기적 차이에 의해 2018년에 개발된 KORUSv5 배출 인벤토리에는 포함되지 못했지만, KORUS-AQ 측정 및 모델링을 기반으로 한 상향식 배출량 수정이 올바른 방향으로 진행되었다는 것을 확인시켜 주었다. 중국의 유기 입자 전구물질(예: VOC)의 경우, KORUSv2.1 에서 새로운 화학종 프로파일을 포함함에 따라 비반응성 VOC보다 반응성 VOC(즉, 알칸, 방향족, 알켄)에 더 많은 양이 배분되어 반응성 VOC의 배출량이 상대적으로 증가하였다. KORUSv5의 경우 중국의 기준 인벤토리(MEIC 2016)에서 VOC 배출량이 증가함에 따라 모델링 배출량이 더욱 증가했다. 한국의 경우, KORUSv2.1에서 VOC 인벤토리 배출량이 증가하고, 방향족 및 알켄족 부문의 할당이 늘어나는데, 이는 KORUSv5 에서도 유지된다.

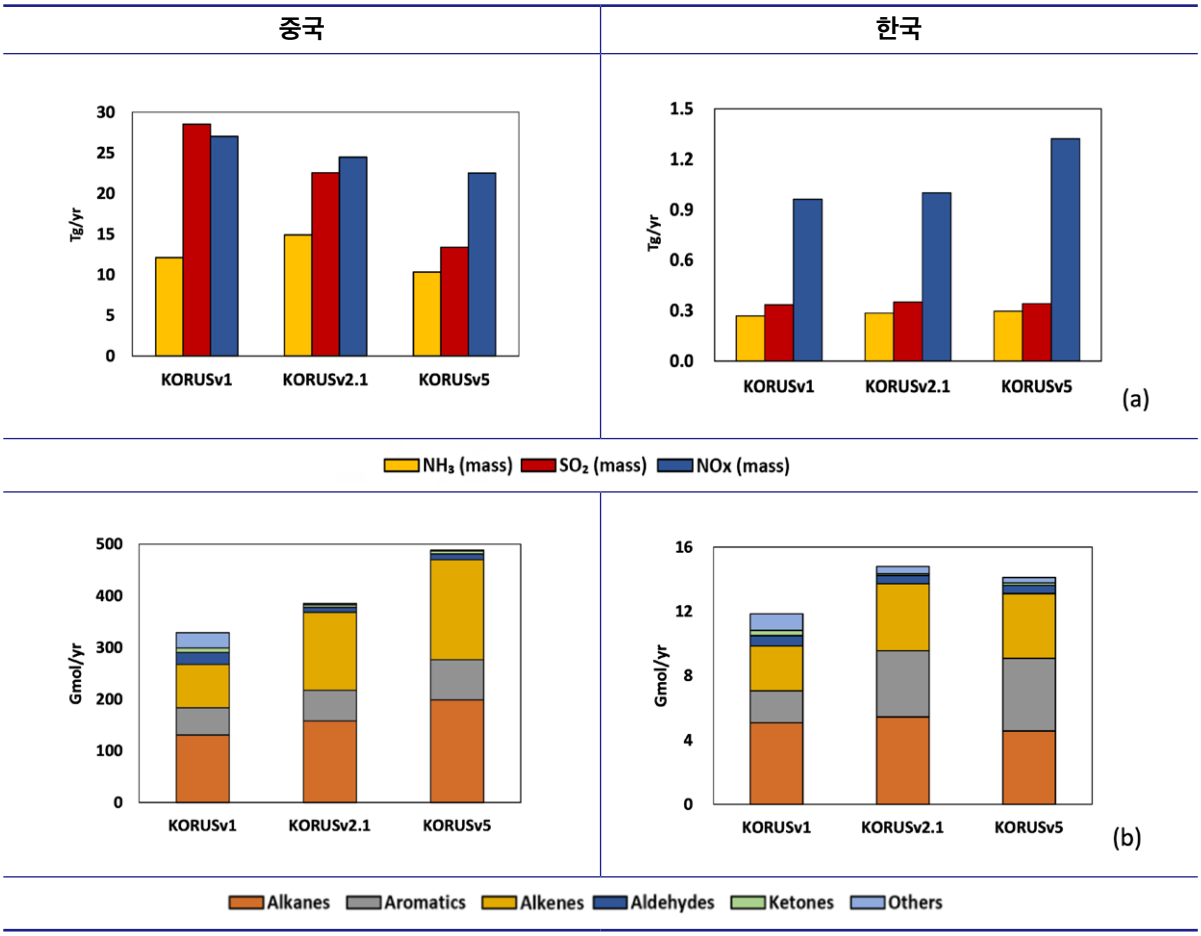


그림 4-2. KORUS 배출량 모델링 버전 변화에 따른 중국(왼쪽) 및 한국(오른쪽)의 연간 평균 배출량 변화: (a) 무기 전구물질 (b) 유기 전구물질(Woo 등, 2020b, 준비 중).

4.2.2 다양한 대기질 모델을 활용한 상향식 배출 평가

배출량 모델링을 평가하기 위한 가장 좋은 방법은 여러 화학종에 대한 측정 결과에 대해 다양한 대기질 모델의 성능을 비교하는 것이다. 현장 캠페인 기간 동안과 사후 분석을 위해 CMAQ, WRF-Chem, CAMx, GEOS-Chem 및 CAM-chem 등 여러 대기질 모델의 입력장으로써 KORUS 배출량이 제공되었다. 초기 모델링 분석 결과, 실측 결과와 비교해 NO_x 및 VOC 배출량이 과소 추정된 것으로 나타났다((RSSR, 2017). 위성 관측을 이용한 배출물질(즉, NO_x) 하향식 평가 결과도 이러한 과소추정을 입증했다(Goldberg 등, 2019, Miyazaki 등, 2019).

R. Park 등(2020)은 KORUSv5 배출 인벤토리 및 KORUS-AQ 관측을 이용해 여러 대기질 모델을 상호

비교했다. 그림 4-3은 SO_2, NO_x 및 방향족 VOC(톨루엔)에 대해 KORUSv5 배출 인벤토리를 이용한 여러 모델과 DC-8 관측치를 비교한 결과를 보여준다. 이러한 화합물은 각각 다양한 배출원으로부터 유래된다는 점에 유의할 필요가 있다. SO_2 배출은 점 오염원에 크게 영향을 받는다. NO_x 또한 점 오염원으로부터 배출되지만 운송 부문의 영향을 더 크게 받는다. 톨루엔은 수많은 용제-기반 제품(이후 VOC 배출원에 대한 절에서 검토할 예정)으로부터 유래된다. 즉, 그림 4-3의 비교는 KORUSv5 배출 인벤토리의 다양한 배출원 부문을 광범위하게 검사한 결과로 볼 수 있다. 모델 간에는 상당한 차이가 나타나며, 이들의 전체 평균은 가장 낮은 고도층에서는 관측치보다 약간 높은 경향이 있고 그 바로 위층에서는 양호한 일치 또는 약간 과소 추정된 경향을 보인다. 전체 모델을 통합한 결과가 전체적으로 관측치와 가장 잘 맞는 일은 상당히 흔히 발생하는 한편, 개별 모델은 오염물질과 그 분포에 따라 더 잘 일치하거나 불일치할 수 있다. 이는 개별 모델에 따라 강점과 약점이 서로 다르기 때문이다. 이후 5장에서 전체 모델 분석의 중요성을 강조 및 논의할 예정이다.

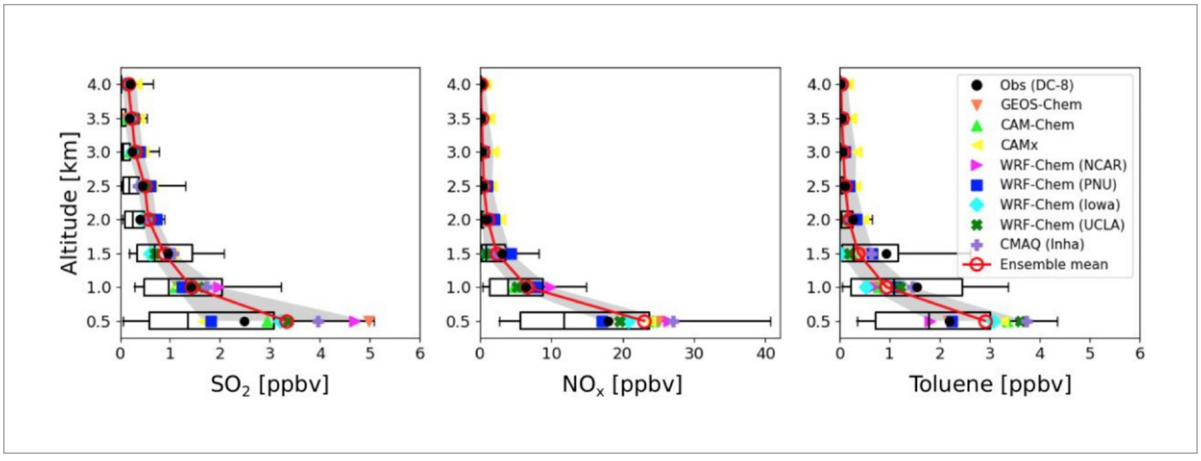


그림 4-3. KORUS-AQ 기간 동안 서울 대도시권 상공 저층에서 SO_2(왼쪽), NO_x(중앙) 및 톨루엔(오른쪽)에 대한 모델 시뮬레이션 결과와 DC-8 관측치 비교. 각 부호는 평균값을 나타냄. 각 고도에서 DC-8 관측치의 전체 범위는 박스 위스커 형식을 이용해 나타냄(중심선=중앙값, 박스=사분위수 범위, 선=10 ~ 90 백분위수). 각각의 고도 범위에 대한 통계에서 사용된 값의 수는 오른쪽에 표시. 회색 음영은 모델 값의 분포를 나타냄.

KORUS 배출 인벤토리의 개선과정은 배출에 대한 현재의 이해도를 평가하는 데 있어 관측결과를 사용함으로써 얻을 수 있는 피드백의 중요성을 보여준다. 전 과정이 반복적으로 수행되면서 배출 및 모델링/분석 연구자들 간의 긴밀한 협업이 촉진되었다. 이 과정은 추후 더 나은 상향식 정보를 통해서 확인 가능한 불일치 사항을 조기에 파악할 수 있도록 하였다. 예를 들어, NO_x 배출량이 과소 추정되었다는

초기 관측-모델링 연구 결과는 KORUS 인벤토리에서 NO_x 배출량의 부족을 조정하도록 하였으며, 이후 최소한 부분적으로는 non-PEMS 배출계수 때문인 것을 밝힌 상향식 국가 인벤토리 개발을 위한 독립적 연구 결과와 부합하는 것으로 나타났다. 또한 VOC 배출에 대해 새로운 화학종 프로파일 적용한 경우 초기 수도권(SMA) 상공에서의 방향족 화합물의 결핍에 대해 효과적으로 답할 수 있지만 KORUS-AQ 동안 샘플링이 제한되었던 다른 지역의 배출원은 계속해서 과소 추정될 수 있다. 이러한 연구과정은 배출 전반에 대한 이해를 한층 더 향상시켰지만, 아직 해소되지 않은 여러 문제가 남아 있어 추가 조사가 필요하다. 다음 절에서는 VOC 및 점 배출원에 대해 좀 더 상세히 검토하였다.

4.3. VOC 배출에 대한 관측 기반 분석

핵심 요점

- 서울 내 VOC 배출원은 생물 기원 배출원 및 인위적 배출원이 혼합되어 있다. 측정 및 배출 인벤토리 측면에서 용제와 이동 배출원 및 산업 활동은 서울의 주요 인위적 VOC 배출원이다. KORUS-AQ 기간 동안 관측된 바에 따르면, 서울에서 가솔린 증발, 천연가스 및 바이오 매스 연소는 상대적으로 덜 중요한 VOC 배출원이었다.
- KORUS-AQ 동안 시행된 상세한 VOC 측정 및 분석을 통해 서울의 지역 내 오존 화학반응에서 특정 VOC(즉, 방향족 및 알켄족, 특히 톨루엔, 자일렌, 에텐 및 식생기원의 이소프렌)의 상대적 중요성에 대한 핵심적인 정보를 얻을 수 있었다.
- 추가 분석에서는 이들 반응성 VOC의 서울 내 배출원을 규명했다. 유기용제는 서울 내 방향족 물질의 주요 배출원으로서, 페인트 및 비페인트 방향족 배출원은 VOC 저감에 있어 특히 중요한 표적이다. 차량은 에텐과 같은 알켄족의 주요 배출원이다.
- 대산석유화학 공단은 서울과 다른 VOC 혼합물을 보인다. 예를 들어, 서울의 배출물은 톨루엔이 풍부한 반면 대산의 배출물은 벤젠이 풍부하다. 대산공단의 시설로부터 배출되는 주요 VOC 종으로는 에텐, n-헥산, 프로판 및 벤젠이 있다. 이러한 오염기단은 특정 풍향 조건에서 서울에 도달할 수 있으며, 이에 대한 연구가 진행 중이다.

4.3.1 VOC 배경 이론 및 KORUS-AQ 동안의 측정:

휘발성 유기 화합물(VOC: Volatile organic compound)은 대기 오염의 중요한 구성 요소다. VOC는 질소산화물(NO_x)과 반응하여 스모그 성분 중 하나인 오존을 형성한다. VOC는 또한 2차 유기 미세먼지(SOA: secondary organic aerosol)도 생성한다. 일부 VOC는 2차 대기오염물질을 생성할 뿐만 아니라 대기 중 농도가 권고 한계를 초과할 경우 직접적인 건강위험을 초래할 수 있다. 대한민국 환경부(KMOE)는 VOC 등 주요 오염물질의 환경기준을 강화하고 배출량을 줄이기 위한 정책을 추진 중이다.

KORUS-AQ 기간 동안 NASA DC-8은 고속 반응 측정기와 2500개 이상의 캐니스터-기반 전체 대기 샘플(WAS: whole air sample)을 사용해 80종 이상의 VOC를 측정했다. 이 측정치는 (1) 서울과 주변 지역의 VOC 성분을 특성화하고, (2) 서울에서 어떤 종의 VOC가 주요 오존 전구물질로 작용하는지 결정하고, (3) 이러한 반응성 VOC의 배출원을 규명하는 데 사용되었다.

4.3.2 서울 내 VOC 조성:

KORUS-AQ 기간 동안의 측정 결과, VOC는 배출원 출처에 따라 서로 다른 특징을 나타냈다(Simpson 등, 2020). KORUS-AQ 기간 중 2016년 서울 상공에서 측정된 대기 조성은 한 해 전인 2015년 지상 기반 MAPS-Seoul 캠페인(Kim, Choi 등, 2018)에서 측정된 결과와 유사했으며, 두 경우 모두 에탄, 프로판, 톨루엔이 풍부했다(그림 4-4a-b). 이와는 달리 대산석유화학단지의 매연은 에틸렌, 저분자량 알칸 및 벤젠이 풍부한 VOC 조성을 보였다(그림 4-4c). 황해 상공에서 채취된 중국으로부터의 유입 공기는 석탄 연소를 포함한 출처로부터 배출되는 에탄, 프로판, 에틸렌 및 카르보닐 황화합물(COS: carbonyl sulfide) 등의 장기체류성 기체로 특성화할 수 있다(그림 4-4D).

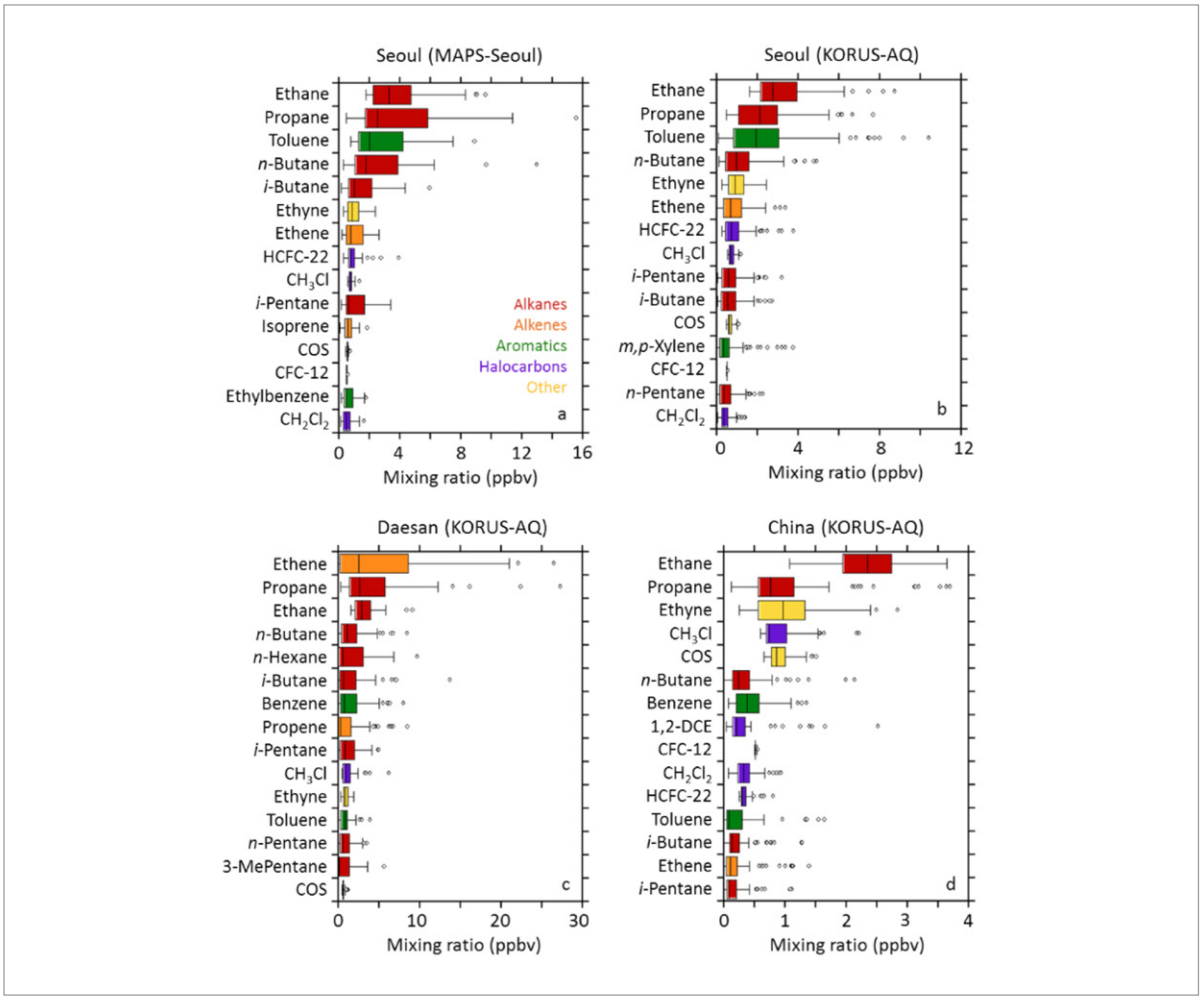


그림 4-4. MAPS-Seoul 및 KORUS-AQ 캠페인 기간 중 측정 결과 함유량이 가장 풍부한 상위 15종의 VOC. 평균 혼합비를 기준으로 내림차순으로 표시함. (a) MAPS-Seoul 캠페인 중 2015년 5월 KIST에서의

지상 기반 자료(n = 23). KORUS-AQ 중 (b) 서울(n =177), (c) 대산(n =63) 상공에서의 저고도 항공 샘플(<0.5km) 및 (d) 중국(n=68) 풍하측 황해 저고도 상공에서 채취된 대기 샘플. 대산에서의 프로판 최고 농도(62.5ppbv)는 여기에 표시되지 않음(그림 출처: Simpson 등, 2020).

VOC 농도에 대한 여러 다른 지역 배출원의 영향을 보여주는 예는 그림 4-5에서 확인할 수 있다. 이 그림은 서울 상공의 대기는 톨루엔 농도가 높은 반면 중국으로부터 유입된 대기는 카르보닐 황화합물 농도가 높은 것을 보여준다. 중국측 대기는 기상학적으로 서쪽으로부터 유입이 일어나는 기간 동안 서해 상공에서 샘플링되었다.

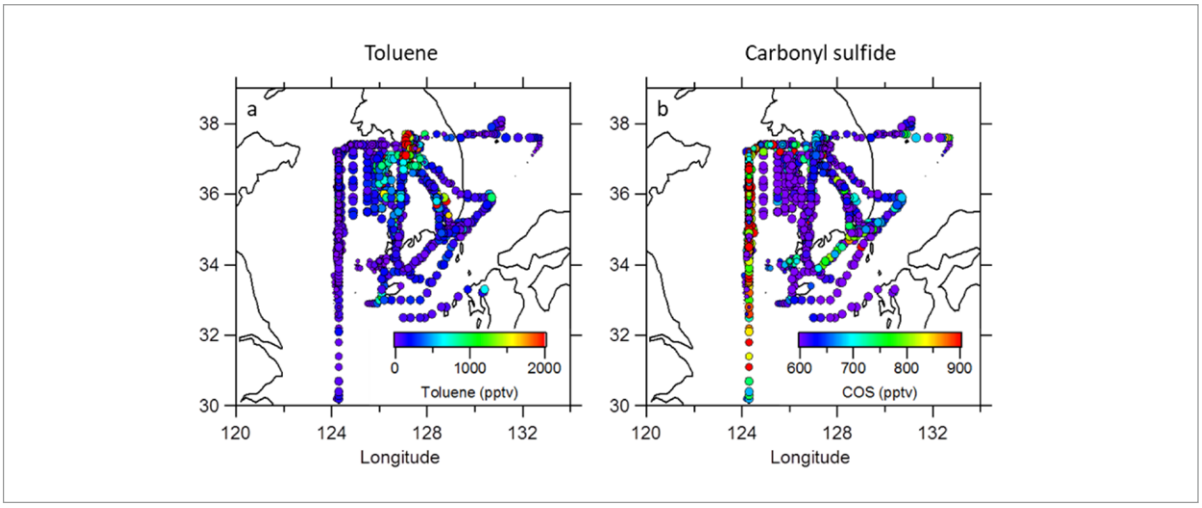


그림 4-5. KORUS-AQ 중 (a) 톨루엔 및 (b) 카르보닐 황화합물(COS)의 공간적 분포. 톨루엔은 서울 수도권 상공에서 그 농도가 가장 높았던 반면(적색 점), 카르보닐 황화합물은 중국으로부터 유입된 공기에서 가장 풍부함. VOC 혼합비를 색상에 따라 표현함. KORUS-AQ 캠페인은 서울시를 중심으로 수행되었지만, 한국의 기타 주요 도심들 또한 VOC 배출 및 오존 오염의 영향을 받았음이 밝혀짐(그림 출처: Simpson 등, 2020).

4.3.3 오존 생성에 대한 VOC의 영향:

대부분의 VOC는 대기 중에서 히드록시기 라디칼(OH)과 반응하며, OH와 빠르게 반응하는 VOC는 더 느리게 반응하는 VOC보다 O_3을 형성할 가능성이 더 높다. OH 반응성(Simpson 등, 2020) 및 광화학적 박스 모델링(Schroeder 등, 2020) 등 여러 유형의 계산 기법을 이용해 서울에서 개별 VOC로부터 O_3가 형성될 가능성을 추정했다. OH 반응성은 VOC 농도 및 VOC와 OH의 반응속도(OH 반응속도 상수)를 곱한 값으로 계산된다(그림 4-6).

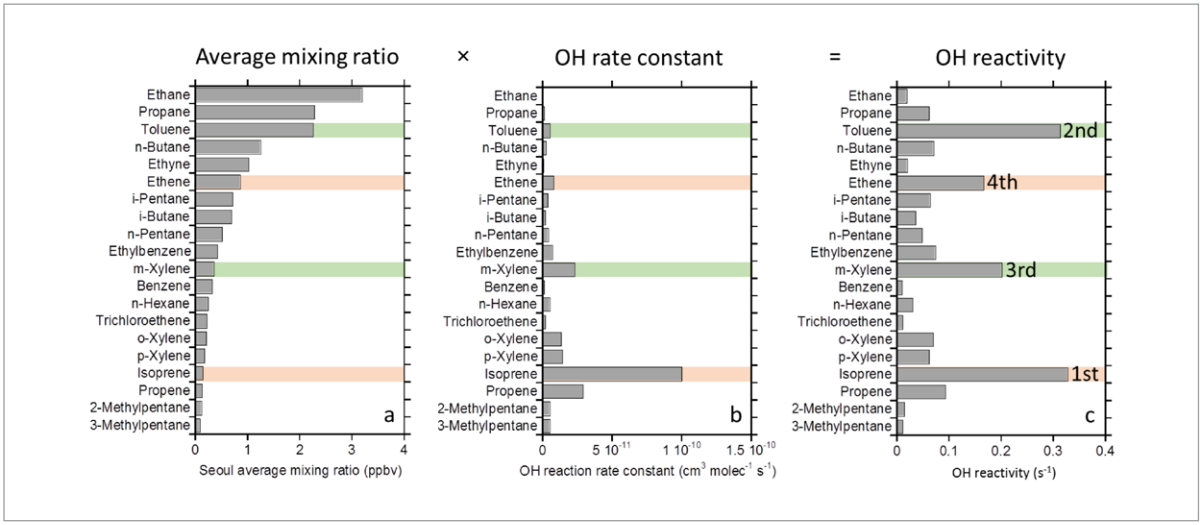


그림 4-6. (a) KORUS-AQ 기간 동안 서울 저고도(<0.5km) 상공에서 측정된 함유량 기준 가장 풍부한 VOC 상위 20종, (b) OH 반응속도 상수, (c) OH 반응성 선택된 방향족은 녹색으로 표시되고 선택된 알켄족은 주황색으로 표시. 패널(c)에 OH 반응성이 가장 높은 상위 4종의 화합물의 순위를 표시(그림 출처: Simpson 등, 2020).

그림 4-6과 같이, VOC는 주로 그 농도가 높거나(예: 톨루엔), OH 반응속도 상수가 크거나(예: 이소프렌) 이들 두 요인이 모두 작용할 경우(예: m-자일렌) OH 반응도(및 그에 따라 O_3을 형성할 가능성)가 높아질 수 있다. OH 반응성 계산에 따르면 전체적으로 이소프렌, 톨루엔, m-자일렌 및 에텐은 KORUS-AQ 기간 중 서울에서 O_3을 형성할 가능성이 가장 높은 개별 VOC로 나타났다. 이는 이보다 앞서 한 해 전에 MAPS-Seoul 캠페인 중 실시한 지상-기반 WAS 측정과도 일치하는 결과(S. Kim 등, 2018).

광화학 박스 모델링은 복잡한 화학 과정을 더 잘 설명하는 모델로서, O_3 형성 가능성을 보다 정밀하게 계산할 수 있다. 그러나 이 모델은 OH 반응성 계산과는 달리 VOC를 개별 VOC 종(톨루엔, 에텐 등) 대신

그룹(방향족, 알켄족 등)으로 취급한다. 그림 4-7은 OH 반응성 대비 상세한 박스 모델 계산을 기준으로 서로 다른 VOC 그룹의 상대적인 O_3 형성 가능성을 비교한 것이다. 이러한 상대 수치는 3장에서 나타난 민감도와는 다르다는 것에 주의한다. 민감도는 CO 및 메탄 등의 다른 주요 전구물질의 산화를 통한 전체 O_3 생성량을 설명한다. 그룹으로 구분했을 때, KORUS-AQ 기간 동안 서울시에서 OH 반응성에 가장 크게 기여한 VOC는 방향족(44%)이며, 그 뒤로 비-이소프렌계 알켄족(19%), 이소프렌(17%), C_4 이상 고분자량 알칸족(16%) 및 C_2-C_3 저분자량 알칸족(5%)이 이어진다(그림 4-7a). 마찬가지로 광화학적 박스 모델링 결과에서도 방향족이 오존 생성에 가장 민감한 것으로 나타났으며(49%), 이소프렌(23%), 기타 알켄족(22%), 고분자량 알칸족(5%) 및 저분자량 알칸족(2%)이 그 뒤를 잇는다(그림 4-7b). 두 기법의 결과가 대체로 잘 일치한다는 측면에서 볼 때, OH 반응성 계산으로부터 VOC종을 구분한 결과는 서울에서의 O_3 형성에 가장 크게 기여하는 인위적 VOC를 결정하는 데 타당하게 사용될 수 있을 것으로 보인다. 이러한 VOC는 향후 VOC 배출 저감 전략의 표적 물질로 삼을 수 있다.

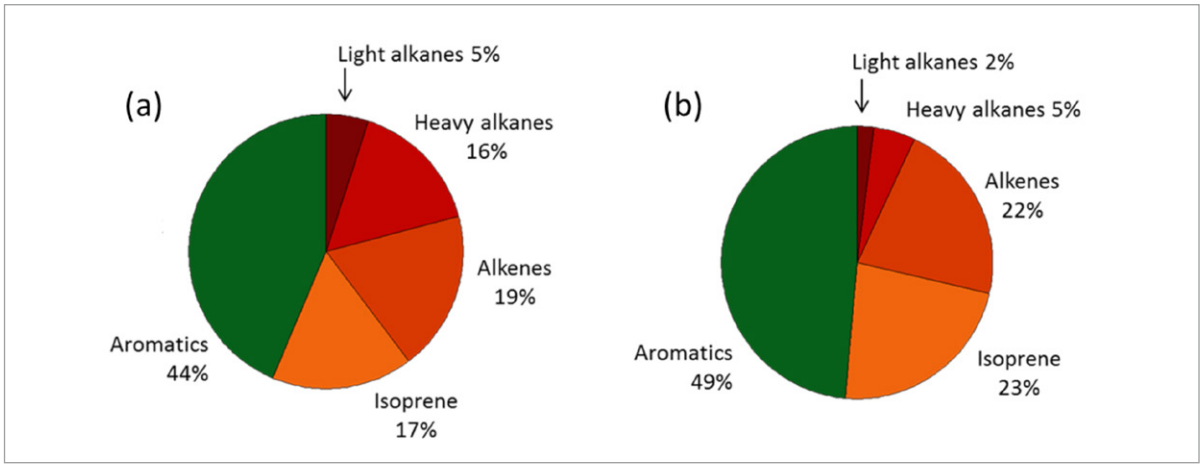


그림 4-7. (a) OH 반응성 계산(Simpson 등, 2020) (b) 광화학적 박스 모델링 계산(Schroeder 등, 2020)을 토대로 KORUS-AQ 기간 동안 서울에서 각 VOC 그룹이 O_3를 형성할 상대 가능성. 저분자량 알칸족은 C_2~C_3를, 고분자량 알칸족은 C_4 이상을 의미함(그림 출처: Simpson 등, 2020).

4.3.4 서울 내 VOC 배출원:

Simpson 등(2020)에서 설명된 여러 기법의 조합을 통해 서울 내 VOC 배출원의 영향을 분석했다. 예를 들어, 톨루엔 대 벤젠 비율(T/B)는 용제 대 차량의 영향을 나타내는 민감한 지표다. 가령 1~2의 T/B비는 주로 차량의 영향을 나타내며, 2 이상의 비는 유기용제의 영향을 의미한다. 서울시에 대한 평균 T/B 비는 7.6 ± 4.9이며 톨루엔 농도가 6ppbv 이상일 때는 10~19로 나타나, 서울의 톨루엔에 대한 유기용제의 영향이 두드러진다는 것을 시사했다. 2016년 6월 2일 서울시 차량 운행에 대해 터널 샘플링을 실시한 결과 T/B 비가 2.2로 확인되었다. 이와 비교해 DC-8이 서울 공군 비행장으로의 missed-approach를 실행할 동안 동시에 측정된 값은 8.4 ± 1.5이다. 이러한 분석은 유기용제가 서울의 톨루엔 수치에 추가적인 영향을 미친다는 사실을 명확히 보여준다.

Simpson 등(2020)에서 설명된 바와 같이, 복잡한 관측 자료세트 내에서 상관관계를 찾는 '배출원 할당(source apportionment)'이라는 기법을 사용해 VOC 배출원에 대한 추가 분석이 실시되었다. 그림 4-8에 나타난 것처럼 이 분석법을 이용해 서울에서 VOC에 대한 5가지의 주요 배출원을 확인했다. 해당 VOC의 가장 주요한 배출원을 주황색(알켄) 및 녹색(방향족)으로 강조 표시했다.

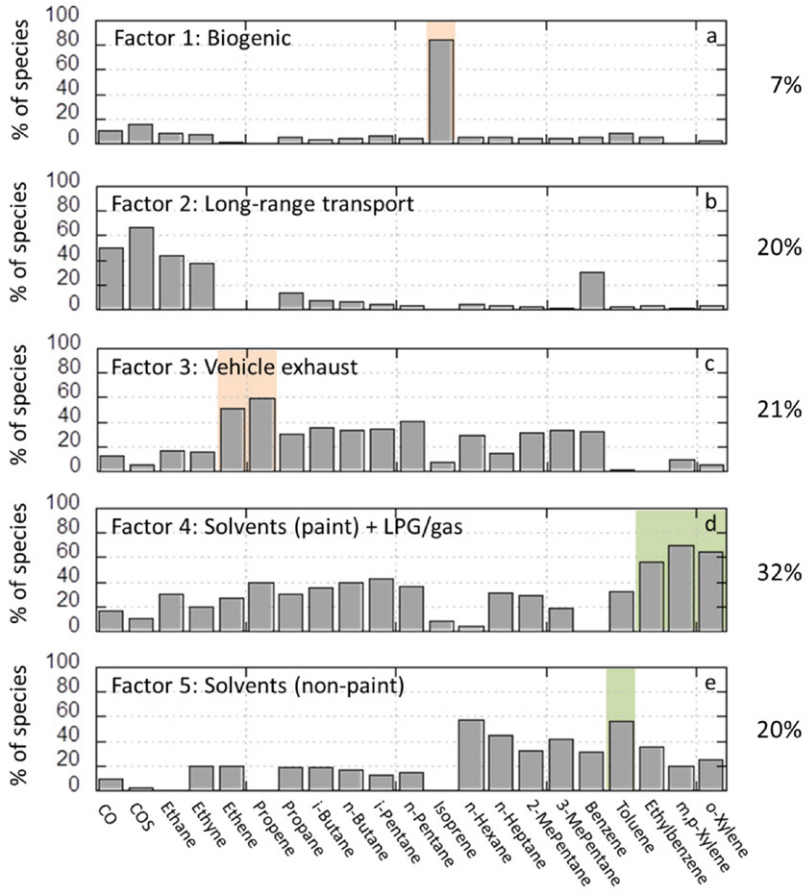


그림 4-8. KORUS-AQ 동안 서울시 상공에서 측정한 선택된 VOC에 대한 소스 할당 결과. 색상으로 강조된 막대는 반응성 알켄(주황색) 및 방향족(녹색)의 주요 배출원을 나타냄(그림 출처: Simpson 등, 2020).

다섯 가지 주요 VOC 배출원은 다음과 같다. (1) 생체 배출원: 이소프렌 등 생체 추적자로 특징지을 수 있으며 소스 할당 결과의 7%를 차지한다. (2) 장거리 이동 배출원: 카르보닐 황화합물(COS)의 중국 추적자 및 CO, 아세틸렌 및 벤젠 등 장수명 연소 추적자로 특징지을 수 있으며, 배출원 할당의 20%를 차지한다. (3) 차량 배기가스 배출원: 에텐 및 프로필렌과 같은 차량 추적자로 특징지을 수 있으며, 배출원 할당의 21%를 차지한다. (4) 페인트-용제 및 청정 연료 배출원: 자일렌 및 에틸벤젠 등 페인트 추적자와 i-펜탄 등 가솔린 추적자 및 프로판과 부탄 등의 액화석유가스(LPG: liquefied petroleum gas) 추적자로 특징지을 수 있으며, 배출원 할당의 32%를 차지한다. 상당 비율의 톨루엔(32%) 또한 이 요인과 관련된다.

(5) 비-페인트 용제 배출원: 톨루엔, n-헥산 및 n-헵탄으로 특징지을 수 있으며, 배출원 할당의 20%를 차지한다.

요약하면, KORUS-AQ 동안 서울에서 측정된 VOC는 식생 배출원(7%), 장거리 이동 배출원(20%), 차량 배기가스 배출원(21%), 페인트 용제 및 청정연료 배출원(32%) 및 비-페인트 용제 배출원(20%)이 혼합된 것으로 계산된다. Simpson 등(2020)에서 논의된 것처럼, CO 및 VOC 20종 선정을 포함해 이러한 분석에는 일부 불확도가 있다는 사실에 유의해야 한다. 그러나 이 결과는 서울에서의 주요 반응성 VOC의 배출원을 파악하는 데 있어 여전히 유용한 지침을 제공한다.

4.3.5 서울에서의 VOC 저감을 위한 권고사항

서울에서 톨루엔, 자일렌 및 에텐은 오존의 주요 전구물질이며(Simpson 등, 2020), 방향족은 SOA 형성에도 기여한다(Nault 등, 2018). 한국에서는 VOC보다 NO_x가 더 빠르게 감소했으며 VOC/NO_x 비가 증가할 경우 서울에서의 대기 오염은 더욱 악화될 수 있으므로(Kim and Lee, 2018), 방향족 및 알켄족은 VOC 배출 저감 전략에 있어 효과적인 표적물질이 될 수 있다. 서울에서 에텐과 프로필렌 배출의 주요 배출원은 차량 배기가스로 확인되었다. 또한 방향족의 주요 배출원은 용제로, 에틸벤젠 및 자일렌의 배출원은 주로 페인트 용제이며 톨루엔의 배출원은 소비재나 인쇄 등에 사용되는 비페인트 용제다(Simpson 등, 2020). 이는 방향족 저감은 페인트 및 비페인트 용제를 모두 포함한 여러 용제 제품에 주안점을 두고 용제를 표적으로 삼을 때 가장 잘 달성될 수 있음을 시사한다. 이를 위해 국내 차량 배기가스 배출 제한을 위한 장기 정책과 아울러, 페인트 내 VOC 함량 제한등 기존의 저감정책을 보완하고 및 확장해야 할 것이다.

유사한 전략이 홍콩에서 성공적으로 적용된 바 있다. 홍콩은 한때 톨루엔에 가장 풍부한 VOC였으나 용제 제품의 VOC 함량을 규제하는 정책을 펼쳐 톨루엔 수준을 감소시킬 수 있었다(Guo 등, 2006; Lyu 등, 2017). 구체적으로, 홍콩 정부는 건축용 페인트, 인쇄 잉크, 소비재, 차량 리피니쉬 코팅제, 선박 및 유람선 코팅제, 접착제 및 실란트, 세척기 용제, 인쇄기 세정제 등 172종의 규제 제품에 대해 VOC 함량 제한을 규정했다(Simpson 등, 2020). 서울을 비롯해 국내 기타 도심지에서의 배출원 샘플링은 최우선 순위 규제대상 VOC 제품을 구체적으로 규명하는 데 일조할 수 있다.

4.4. 점 배출원 배출 평가

핵심 요점

- 세 가지 독립적인 접근법을 통해 대산석유화학단지의 VOC 배출량을 하향식으로 추정한 결과, 현재의 상향식 인벤토리는 2.5~4.0배 정도 과소 추정된 것으로 나타났다.
- 마찬가지로, 대산에서의 포름알데히드 및 그것의 4종의 주요 전구물질(에텐, 프로필렌, 1,3-부타디엔, 1-부텐)의 총량에 대한 하향식 추정치도 상향식 인벤토리에 비해 4.3±1.5배 과소 추정되었다.
- 이와 대조적으로 질소산화물과 이산화황 배출량의 하향식 추정치는 상향식 인벤토리와 유사한 값으로, NO_x 및 SO_2 각각에 대해 0.8~1.3배 및 0.7~1.0배 범위를 보인다.
- 대산에서의 배출량이 과소 추정될 경우 현지 노동자에게 건강상의 위험을 초래하는 '유해 대기오염물질'이 적절히 억제되지 못하며, 해안풍 조건에서는 현지 주민에게 추가적인 위험을 초래한다. 이러한 배출물에 대한 모니터링을 개선하고 감축시키기 위한 노력이 권고된다.

4.4.1 대산공단의 VOC 배출원:

KORUS-AQ 연구기간 중 DC-8은 3일의 샘플링 기간 동안(2016년 6월 2일 목요일, 6월 3일 금요일, 6월 5일 일요일) 4대 서해안 시설(태안발전소, 당진발전소, 현대제철, 대산석유화학 단지)에서 배출된 물질을 측정했다. 대산석유화학 단지로부터의 VOC 배출량이 다른 지역을 압도하므로, 항공 샘플링은 대산에 직접 기인하는 기단에 더욱 집중되었다. 또한 DC-8 관측치를 토대로 한 하향식 분석과의 비교를 위해, KORUSv5 배출 인벤토리로부터 대산의 최근 상향식 배출량 추정치를 얻을 수 있었다.

WAS 샘플링 시스템에 의해 측정된 33종의 개별 VOC에 대한 하향식 배출율과 그 합계를 비롯해 HCHO에 대한 배출율을 물질 수지 접근법을 이용해 계산하였다. 2016년 6월 5일 측정에 대한 이러한 접근법을 그림 4-9에 도식적으로 나타냈다.

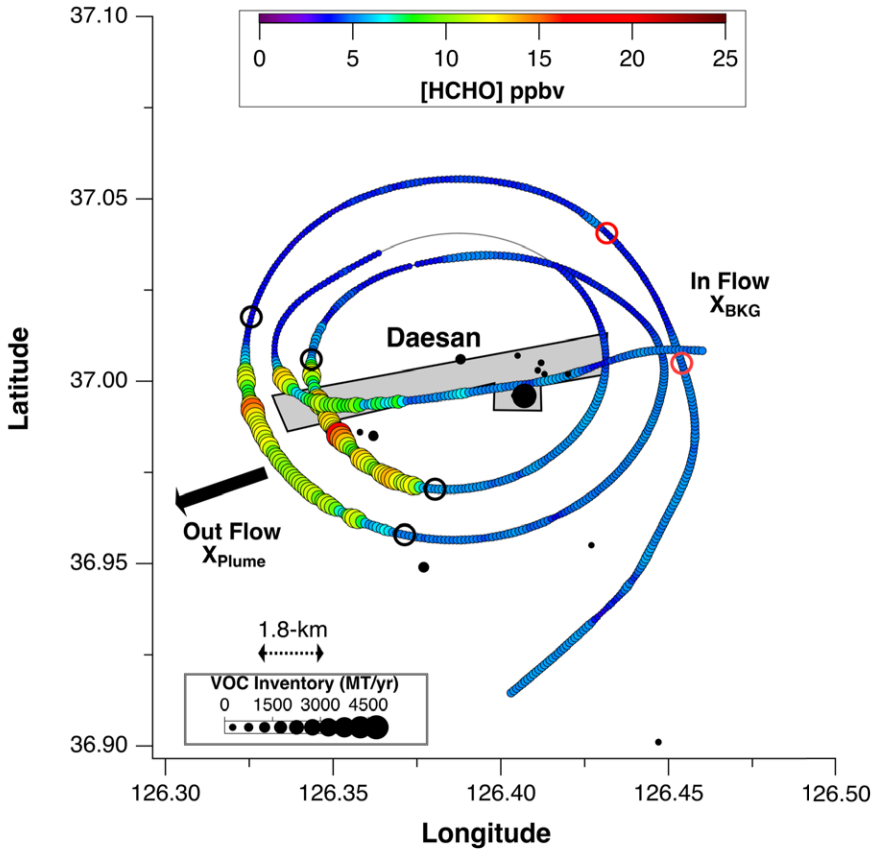


그림 4-9. 2016년 6월 5일 오전 약 10시 50분(현지 시간) 약 300m 고도에서의 비행 경로. 대산 단지는 회색 음영으로 표시했으며, 가장 큰 규모의 개별 VOC 배출원의 크기는 연간 배출량(MT/year) 기준으로 나타냄. 각 비행 구간을 나타내는 부호의 색상과 크기는 DC-8에서 측정한 HCHO 농도에 따라 결정. 검은색 대형 화살표는 DC-8 바람 측정 분석 결과에 따른 평균 풍향(70.7° ± 13.5°) 및 풍속(4.5 ± 0.7m/s)을 나타냄. 여기서 오염물질 유출 경계는 ○ 기호로 표시했으며, 풍상측 유입은 ○ 기호로 표시(그림 출처: Fried 등, 2020).

물질 수지 접근법에서는 전체 오염기단의 폭 및 혼합층 깊이(지표면으로부터 오염물질이 혼합되는 고도까지의 높이)에 대해 매연의 유출(X_{Plume}) 및 유입(X_{BKG}) 간 혼합비 차이를 통합하고 측정된 각 성분에 대한 순간 배출율을 추정하기 위해 풍속을 이용한다. 이 계산에서 33개 WAS 측정치는 C_2-C_{10} 알칸, 메틸기가 대체된 알칸, 시클로알칸, 알켄 및 방향족 등 VOC 화합물의 주요 군을 망라한다.

HCHO, 에탄, 벤젠, 톨루엔, SO_2 및 CO에 대한 연속 고속 측정을 이용해 오염기단 경계층을 정의하고 시간

분해능이 조악할 때 수집된 WAS VOC 측정에 적용하기 위한 보정 계수를 결정했다. Fried 등 (2020)은 이 분석에 대한 폭넓은 세부 사항, 기본 가정 및 상세한 불확도 추정치를 제시했다.

그림 4-10의 패널(a)는 질량 균형 접근법을 토대로 본 연구의 3일의 샘플링 기간 동안 대산에서의 하향식 배출 최종 결과를 Mt/year(연간 메가톤) 단위로 나타낸 것이다. 하향식 측정은 본 연구에서 도출된 33종의 VOC 배출량 합계를 연간 추정치로 외삽한 값을 반영한다. 이 패널에는 최신 상향식 VOC 배출 인벤토리(KORUSv5, Woo 등,2020b, 준비중)도 비교되어 있다. 여러 오염기단에 대한 연구에서 얻은 하향식 추정치는 44,800~82,000MT/year 범위의 지속적으로 높은 값을 보이며, 전체 평균은 61,400±13,700MT/year다. VOC 합계를 기준으로 한 하향식 추정치는 상향식 인벤토리 값인 21,400MT보다 2.9±0.6배 높다. 그림 4-10의 두 패널에 표시한 불확도는 3일의 샘플링 기간에 대해 평균값의 1σ 표준편차로부터 도출되었다. 질량 수지 접근법은 여러 측면에서 체계적 편향이 발생할 수 있는데 이에 대한 보수적인 상한 범위에 포함되는 체계적 불확도 추정치를 추가로 계산해보면 그 비율(하향식/상향식)은 2.9 ± 1.0이 된다. 그림 4-11과 4-12도 동일한 접근 방식을 취했으며, 본문에서 언급된 체계적 편향 가능성을 포함한 불확도가 표시되어 있다.

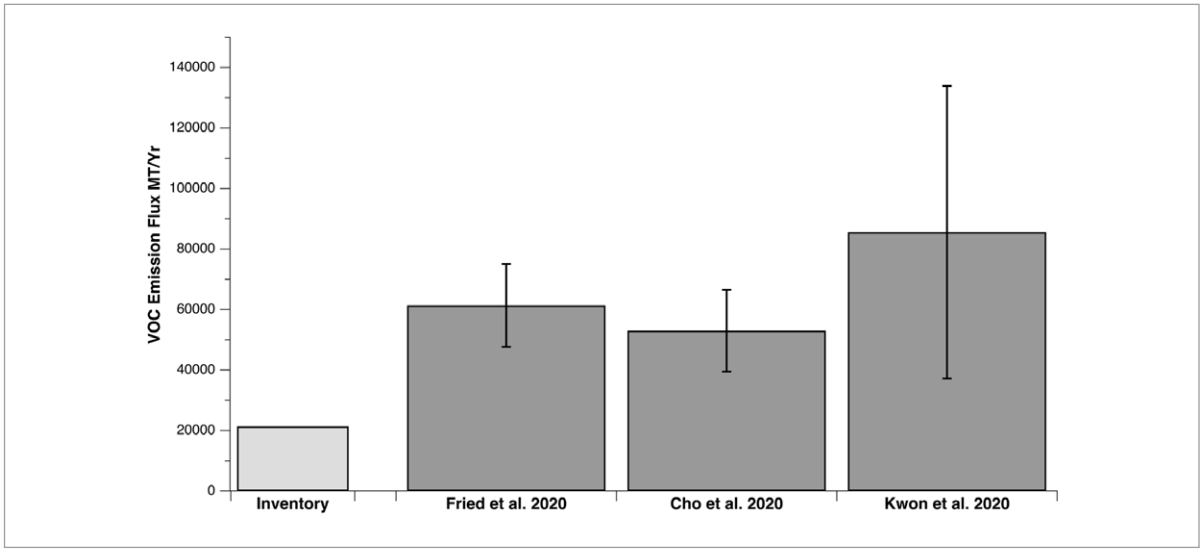


그림 4-10. (A) 대산에서의 연간 총 VOC 배출량 하향식 추정치 및 비교를 위한 상향식 인벤토리 추정치. 오차 막대는 측정 부정확성(1σ 수준)을 나타냄. **(b)** HCHO 및 4가지 주요 전구물질에 대한 유사한 분석.

그림 4-10의 패널(b)는 대산에서의 HCHO 및 4종의 주요 전구물질(에틸렌, 프로필렌, 1,3-부타디엔, 1-부텐) 배출에 대해 실시한 유사한 물질 수지 분석 결과를 나타낸 것이다. HCHO와 4가지 주요

전구물질의 배출량 하향식 추정치는 평균 16,000±5,700MT/year다. 이 추정치는 상향식 추정치인 3,700MT/yr의 4.3±1.5배에 달한다. 체계적 편향의 보수적 상한치를 반영했을 때 이 비율은 4.3 ± 1.9배가 된다.

그림 4-11은 대산의 VOC 배출율에 대해 Fried 등(2020), Kwon 등(2020) 및 Cho 등(2020)의 하향식 추정치를 상향식 인벤토리와 비교한 것이다. Kwon 등 (2020)은 대산 시설을 비롯해 한국 내 여러 지역에서 VOC 배출량 추정치를 계산했다. 이러한 접근 방식에서는 NASA B200 항공기에 탑재된 GeoTASO 기기에서 측정한 HCHO 수직 기주농도와 함께 총 HCHO의 단위 시간 당 순생성량에 대한 GEOS-Chem 시뮬레이션 및 여러 유기 전구물질로부터 산출한 추정 HCHO 양을 조합하여 이용한다. Kwon 등(2020)은 이러한 접근법을 이용해 대산의 VOC 배출 인벤토리가 4.0 ± 2.3배 정도 매우 낮다고 결론 내렸다. 이 값은 Fried 등(2020)이 계산한 값인 2.9 ± 0.6배(상호 오차 범위 내)와 상당히 비슷하다.

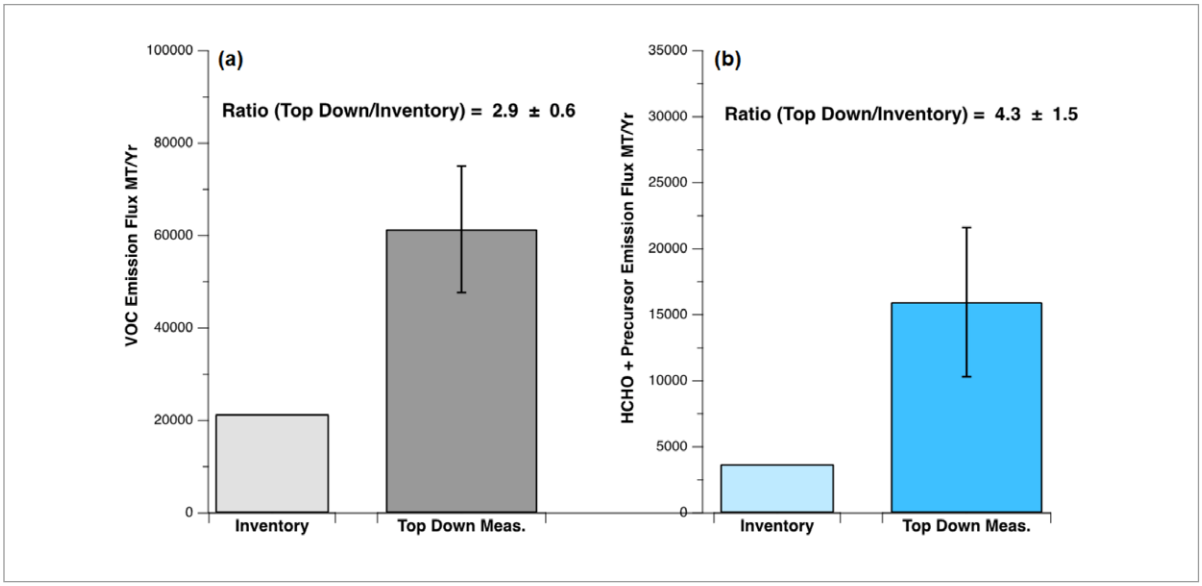


그림 4-11. 2016 KORUS-AQ 연구 중 대산의 VOC 배출 인벤토리 계산 요약(단위: MT/year) 인벤토리 값은 Woo 등 (2020b, 준비 중)으로부터 참고했으며, 다른 3가지 측정에는 1) Fried 등(2020), 질량 수지 접근법을 활용해 2016년 6월 2, 3, 5일 매연 기둥에 대해 DC-8에서 실시한 VOC 측정; 2) Cho 등(2020), HCHO 축적 및 손실에 대한 0-D 박스 모델 분석과 결합해 2016년 5월 22일 한서 킹 에어에서 실시한 HCHO 측정; 3) Kwon 등(2020), 여러 유기 전구물질로부터의 산출량을 가정하여 HCHO 순생성량에 대한 GEOS-Chem 시뮬레이션과 함께 GeoTASO 기기를 이용해 NASA B-200 항공기에서 실시한 HCHO 수직 기주농도 측정이 포함됨. 오차 막대는 각 하향식 측정에 대해 추정된 총 불확도(1σ)를 나타냄.

Cho 등(2020)은 대산의 VOC 배출량에 대해 위와 유사한 하향식 연구를 수행했다. 본 연구에서는 2016년 5월 22일 오후 2시(현지 시간) 즈음 포착된 대산의 풍하측 오염기단에 대해 측정을 수행했으며, 이때 한서 킹 에어에서 측정한 HCHO 축적 및 손실율을 비롯해 이보다 앞서 대략 4.5시간 전에 확보한 DC-8 WAS 측정치의 제한된 세트 및 박스 모델을 토대로 한 간접적 방식이 이용되었다. 이 연구에서는 모 HCHO 전구물질만 고려했을 때 대산 VOC 배출량의 하한을 31,000 ± 4,750MT/year로 추정했다. Cho 등(2020)은 2019년 5월 22일 대산 VOC 배출을 모두 포함해 하향식 값을 대략 53,000 ± 9,000 MT/year로 추정했다. 이는 Fried 등(2020)이 추정한 61,400 ± 16,600 Mt/year의 전체 평균값과 놀랄 만큼 일치하는 값이다.

전체적으로 서로 다른 접근 방식을 취한 3건의 연구에 따르면 대산의 상향식 VOC 인벤토리는 2.5~4.0배 비율로 과소 추정되었다.

Fried 등 (2020) 및 Cho 등 (2020)은 또한 서해 상공에서 풍하측으로 수십 km까지 떨어진 곳으로 이동되는 대산 및 다른 서해안 시설로부터의 오염기단을 분석했다. Fried 등 (2020)은 6월 5일 서해 상공에서 풍하측 44km 지점으로 이동한 HCHO 및 벤젠이 각각 29.4ppb 및 4.6ppb의 혼합비를 가지는 것으로 보고했다. 즉, 해안풍 조건에서 이들 화합물 및 1,3-부타디엔과 이들의 산화물과 같은 기타 유해 대기 오염물질(HAP: Hazardous Air Pollutant)의 수치가 높아질 경우, 배출 인벤토리에서 나타나는 것보다 더 큰 위험이 지역사회에 발생할 수 있다. 따라서 현지 근로자와 그 가족 및 인근 주민을 보호하기 위해 서해안 산업 시설 및 다른 지역에서 발생하는 이러한 배출물의 지속적인 변화를 모니터링하고 감축하기 위한 노력이 적극 요구된다.

4.4.2 서해안 점 배출원에서의 SO_2 및 NO_x:

VOC 배출과 달리 상향식 SO_2 배출 인벤토리는 실제 측정을 토대로 한다는 점에서 신뢰도가 훨씬 더 높다. 대산과 같은 시설에서 VOC는 여러 시설 구성 요소 및 활동(저장 탱크, 복합 단지 내 및 인근 선적 항구를 오가는 운송 라인, 석유 생산 및 취급, 연소 및 플레어)으로부터의 비산 배출을 포함해 다양한 배출원으로부터 배출된다. 반면, 대산의 SO_2 배출량 자료는 시설 굴뚝 내에서 수분 단위로 측정한 실제 SO_2 측정치를 연간 평균한 값을 토대로 한다. 이러한 측정치는 CleanSYS, 즉 연속 배출 모니터링 시스템(CEMS: Continuous Emissions Monitoring System)을 토대로 하며, 그 결과로 한국환경공단에서 1년간 수집한 측정치는 서산시에 대한 2016 CAPSS SO_2 배출 인벤퇴를 도출하는 데 활용된다. 서산의 SO_2 배출은 주로 다음의 세 가지 범주로부터 발생한다. 1) 대산의 산업 가공(황 회수, 석유 생산 및 제조), 2) 대산의 발전, 산업용 보일러 관련 연소 공정, 3) 선박 배출. 그림 4-12는 SO_2 배출 인벤토리를 DC-

8에서 관측한 6개의 매연 기둥의 하향식 추정치와 비교한 결과를 보여준다. 하향식 SO_2 배출량의 전체 평균 및 표준 편차는 13,000 ± 3,800MT/year이며, 이는 인벤토리와 매우 잘 일치한다. 이 결과는 VOC 측정에 적용된 물질 수지 접근법의 신뢰성을 높이고 인벤토리의 VOC 배출량이 과소 추정되었다는 결과를 확인시켜준다. 이전 그래프와 마찬가지로, 체계적 불확도에 대한 보수적 상한치 계산 결과, 하향식 측정값과 전체 불확도는 13,000 ± 5,400MT/year이다.

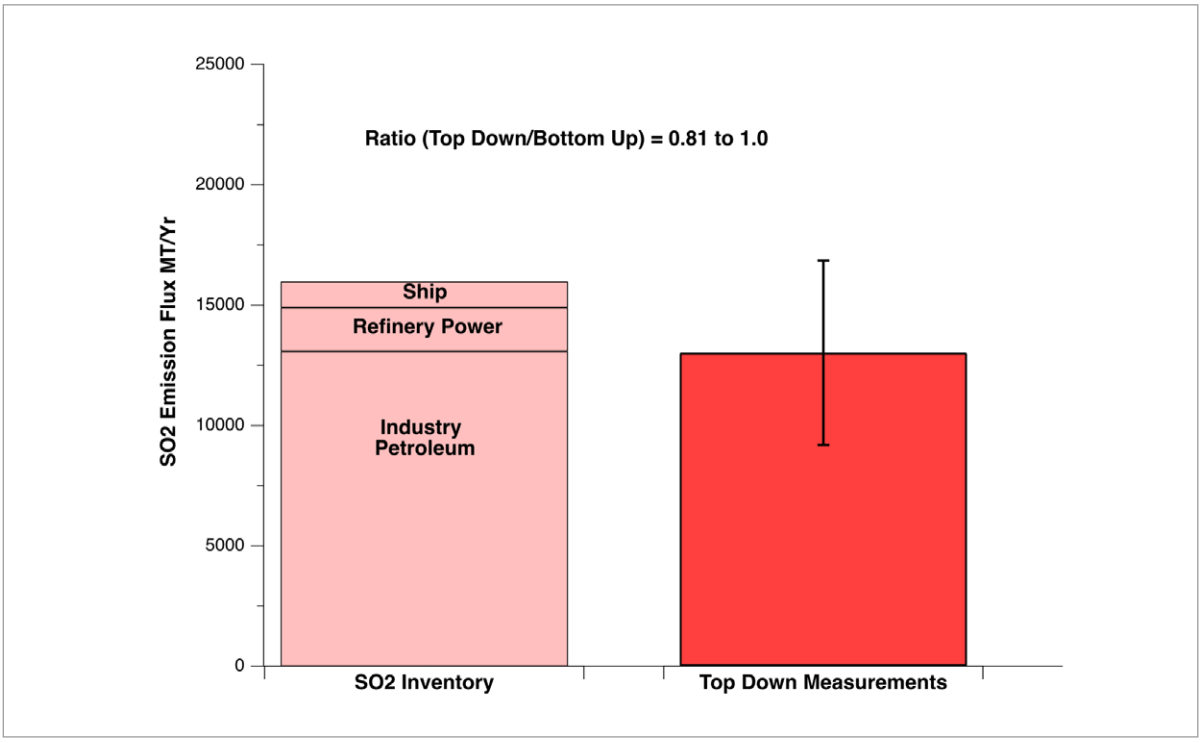


그림 4-12. 대산 오염기단에 대해 3일의 샘플링 기간 동안 DC-8에서 수행한 샘플링 결과를 토대로 산출한 SO_2 연간 배출량 하향식 추정치. 6개의 측정치의 전체 평균은 13,000 ± 3,800MT/Yr(1σ 표준편차)다. 서산시(대산이 소재하고 있는 시 지역)에 대한 2016 CAPSS SO_2 배출 인벤토리는 3가지 범주로 나뉠 수 있으며, 여기에 속하는 항목은 이 지역의 SO_2 배출량의 97%를 차지함.

Park 등(2021)은 NASA DC-8 "굴뚝 주변" 비행 중 항공 측정과 가우시안 분산 모델로 산정한 배출량-기반 농도를 비교함으로써 SO_2 및 NO_x에 대한 주요 대규모 점 배출원 5곳의 상향식 배출량 평가했다(그림 4-13). 그림 4-13b에서 볼 수 있는 것처럼, 이 사례에서 당진 발전소(PP: Power Plant)의 굴뚝은 풍향에 따라 정렬되어 있다. 매연 기둥의 가우시안 모델에서 분산의 규모는 오직 주요 풍향에 대해서만

고려되므로, 모델 농도는 오직 각 배출원 굴뚝으로부터 측정 지점까지의 거리에만 영향을 받는다. 이들 점 배출원에 대한 초기 모델링 결과 당진 PP에서의 결과는 이례적인 것으로 나타났다. 확인해 본 결과 이는 공식 CleanSYS(즉, 연속 배출 모니터링 시스템; CEMS) 배출량 자료에 포함되지 않은 추가적인 생산 용량의 증설 때문이었다. 이 추가 생산 용량(굴뚝이 4개에서 6개로 증가)으로 인해 SO_2 에 대한 모델 추정치는 DC-8 관측치에 비해 0.36배에서 0.74배로 향상되었다. NO_x에 대해서는 0.41배에서 0.83배로 증가했다. 또한, 모델의 농도 프로파일 형태도 추가 굴뚝을 포함시켰을 때 DC-8 측정치와 더 잘 부합했다(그림 4-14 참조).

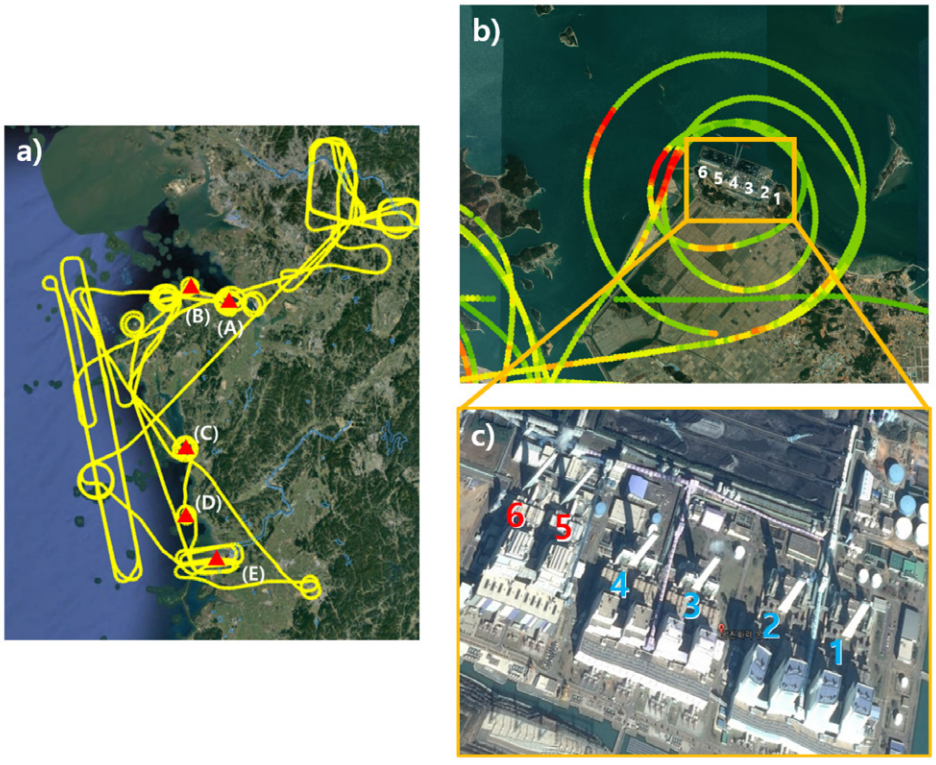


그림 4-13. (A)) DC-8에서 샘플링을 실시한 한국 서해안 주변의 점 배출원(A: 현대제철, B: 당진 PP, C: 보령 PP, D: 서천 PP, E: 군산 IC) (b) 당진 PP 주변의 DC-8 비행 경로. SO_2 농도를 색상으로 표시함(빨간색 점: 70ppb 이상) (c) 근접 촬영한 당진 PP 굴뚝. 1~4번(파란색)은 기존 굴뚝을 나타내며 5~6번(빨간색)은 새로 추가된 굴뚝 설비를 나타냄.

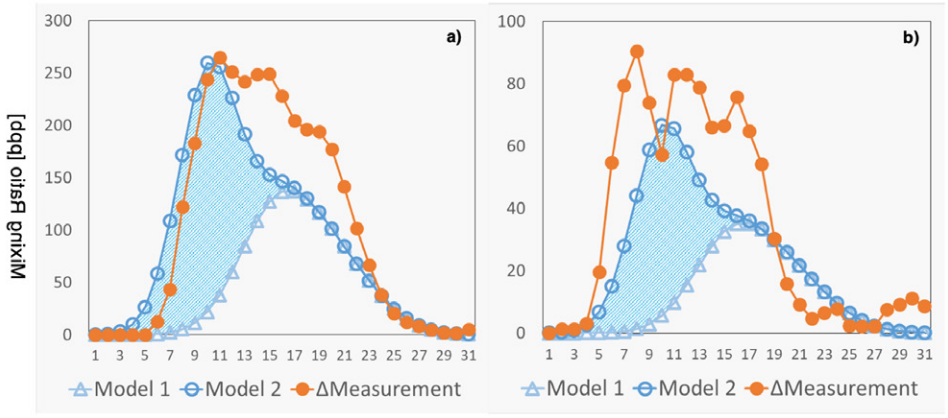


그림 4-14. 당진 PP에서 모델 및 Δ측정치의 상호 비교: (a) NO_x (b) SO_2 농도. '모델 1'은 1~4번 굴뚝만 포함되었을 때의 모델 계산값을 나타내며 '모델 2'는 6개 굴뚝 모두 포함되었을 때의 계산값을 나타냄. 'Δ측정치'는 DC-8 측정 지점에서 풍상측 및 풍하측 측정치의 차이를 의미함. X축은 매연 기둥 전체에 걸친 순차적 DC-8 측정 지점을 나타냄. 그래프의 파란색 음영 부분은 5~6번 굴뚝에서 추가로 배출된 양(즉, 모델 2 - 모델 1)을 나타냄(M. Park 등, 2020, 제출됨).

당진 PP의 생산 용량을 교정한 후에는 다섯 개의 모든 대규모 점 배출원에 대한 모델링 값과 측정 농도의 일치도가 높아졌으며, 그 범위는 NO_x에 대해서는 0.83~1.26, SO_2에 대해서는 0.74~0.91이다(그림 4-14). NO_x 농도는 현대제철, 보령 PP 및 군산 산업단지(IC: Industrial Complex)에서의 Δ측정치(즉, 풍상측 및 풍하측 지점에서의 농도 차이)에 비해 4~26% 과대 추정되었다. 당진 PP 및 서천 PP에서의 NO_x 농도는 13~17% 과소 추정되었다. 모델링 결과 SO_2 농도는 9~26% 과소 추정되었다(M. Park 등, 2021, 준비중).

이러한 결과는 점 배출원에서의 직접 관측을 기반으로 한 CAPSS 배출량에 신뢰성을 더해준다. 그러나 당진 PP 사례는 측정기반 분석을 수행할 때 최신 상향식 정보의 업데이트 필요성을 강조한다. VOC 추정치는 배출원의 다양성과 충분한 측정치 부족을 고려할 때 계속해서 고심하고 개선해야 할 문제로 남을 것이다.

4.5. 진행 중인 평가에 대한 권고사항

KORUS-AQ는 한국의 대기질 결과를 측정하는 데 있어 배출물질이 미치는 역할을 검사하고 이해하기 위한 훌륭한 기회를 제공했다. 본 연구 중에는 인구 밀도가 높은 서울 대도시권에 특히 중점을 두고 관찰 및 분석을 시행했다. KORUS-AQ 배출물질 연구의 구체적인 결과로부터 다음의 논지가 도출된다. 1) VOC 배출 감축을 위한 정책은 방향족 화합물, 특히 톨루엔과 자일렌에 우선 순위를 두어야 한다. 2) 대산에서의 배출량 분석을 볼 때, 산업 시설 점 배출원의 VOC 배출은 상당히 과소 추정될 수 있다. 3) 위성(6장 참조) 및 현장 관측을 모두 사용한 하향식 배출량 분석은 배출 인벤토리의 오류를 식별하는 데 효과적이다.

한국에서 널리 관측되는 고반응성 방향족 화합물은 미세입자 및 오존 모두를 생성하는 화학 공정에서 두드러진 역할을 한다. 이는 관측 기반 모델링을 통해 직접 검증될 수 있다. 이들 화합물이 식별된다고 해도, 배출 인벤토리에서 이 물질의 구체적인 출처를 정확히 파악하기 어렵다. 앞서 언급한 바와 같이, 홍콩의 VOC 규제 정책은 VOC 배출을 일으키는 172종의 제품을 대상으로 했는데, 이러한 화합물을 제어하기 위해서는 VOC 배출의 원인이 되는, 현재 팔리거나 사용되고 있는 제품의 양 및 거래 규모를 파악해야 한다. **따라서 VOC 배출량 저감 정책을 수립하기 위해서는 VOC를 대상으로 서울에서의 현장 배출원 샘플링 프로그램 및 제품 조사를 추진하여 방향족 화합물의 수많은 배출원을 규명할 것이 권고된다.**

독립적인 세 가지 분석 결과 대산산업단지로부터의 VOC 배출량은 상당히 과소 추정된 것으로 나타난 한편, 발전소로부터의 연소물질(SO_2, NO_x 등)배출은 관측을 통해 대부분 확인되었다. 이는 산업시설 점 배출원이 과소 추정되었을 수 있음을 시사한다. 이들 VOC 배출은 배출시설이 다루고 있는 다양한 화학 공정으로부터 유래한 여러 화합물이 혼합된 결과이고, 이러한 배출물들은 각각 고유한 조성을 보이므로 이 조성을 지문(fingerprint)으로 활용할 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 이러한 화합물은 대다수가 유해 물질이므로 작업자 및 현지 지역사회에 대한 노출이 우려되며, 산업단지의 배출물질이 인구밀도가 더 높은 지역으로 이동할 가능성이 있으므로 배출량이 과소 추정되는 경우를 고려해 주의를 기울일 필요가 있다. 최근 태안 반도에 서산 연구 측정소가 설립되면서 대산을 비롯한 주변 점 배출원이 현지 지역사회에 미치는 영향을 측정하기 위한 장기적 관측을 시행할 길이 마련되었다. **대산 분석 결과를 토대로, 다른 산업분야 배출원에 대해서도 항공 현장 관측 및 물질 수지 접근법을 채용한 하향식 평가를 시행할 것이 권고된다. 이를 통해 여러 유형의 시설로부터 나온 배출물질이 일관되게 과소 추정되었는지 확인하고 추가적인 저감 활동이 필요한지 여부를 결정하는 데 일조할 수 있다.**

KORUS-AQ 분석 결과, 원격측정법을 기반으로 한 하향식 배출량 추정이 상향식 추정을 효과적으로 보완하는 것으로 나타났다. GeoTASO를 통한 HCHO 항공 원격 감지 및 NO_x 위성 관찰을 이용해 NO_x

및 VOC에 대한 배출 인벤토리의 불일치를 효과적으로 진단했다. GEMS의 발사로 한반도를 비롯한 주변 국가 전역에 걸쳐 전례 없는 공간 및 시간 분해능으로 배출물질을 상향식 평가하는 일이 가능해질 것이다(추가 논의는 6장 참조). GEMS에서 식별된 배출의심지역에 대해 항공기를 활용한 현장 측정 및 원격 측정을 통하여 보다 정밀한 샘플링을 수행할 수 있다. **GEMS 자료를 적극적으로 활용하여 주기적인 하향식 배출 평가를 수행함으로써 미래의 NO_x 및 VOC 배출 저감 활동을 추적 및 검증하기 위한 강력한 연구 프로그램이 권고된다.**

5장 대기질 모델링

핵심 포인트:

- 대기질 모델은 오염물질 수준을 낮추기 위해 효과적인 전략을 개발하기 위한 필수적인 도구로 자리 잡았다. 모델은 배기가스, 역학 관계, 화학 작용의 결합된 영향을 처리하기 때문에, 국지적, 지역적, 세계적인 요인으로 인해 국지적인 대기질이 어떻게 영향을 받는 지와 이러한 범위에서 배기가스 발생원의 변화에 대한 민감도의 정량적 평가가 가능하다.
- 최근 과학적 이해와 모델링 기법의 발전에 따라 국지, 지역, 세계적 범위에서 수 시간부터 수일까지 시간에 따른 대기질의 변화를 더욱 효과적으로 예측할 수 있다.
- 구체적인 답안이 아닌 정량적 평가의 한계를 설정하려면 다양한 범위(지역적 범위 부터 세계적 범위까지) 모델의 계층 구조, 해상도, 복잡성이 필요하다.
- 다양한 강점과 약점을 지닌 여러 개별 모델을 적용한 앙상블 모델 결과를 종합하면 대부분의 개별 모델보다 대기 성분을 정확하게 관찰할 수 있다.
- 대기질 예측 향상을 위해서는 배출 인벤토리 개발과의 긴밀한 협력을 통한 지속적인 모델 개발 및 평가가 필요하다.

KORUS-AQ 캠페인 시 한반도와 인근 해역의 항공 관측을 위한 5일간 대기질 예측을 보여주기 위해 다양한 3-D 대기 화학 모델이 사용되었다. 이러한 예측들은 대기오염 플룸 및 관찰 샘플링을 목적으로 한 기타 특성을 파악하는 데 매우 유용했다. KORUS-AQ 관측과 함께 이러한 모델들은 관측된 오염의 배출원 및 그 변화에 대한 이해와 더불어 모델 및 배출에서 개선해야 할 점을 파악하기 위해 사용될 것이다. PM 및 오존 오염을 정확하게 예측하려면 모델링의 근거로 사용되는 배출량, 모델의 기상학, 미세먼지 및 오존 등 2차 오염물질을 생성하는 화학적 프로세스를 정확히 적용해야 한다. 모델은 오염물질 배출원과 오염 간 인과관계를 파악하는 기본적인 수단이기도 하다.

5.1. 배출가스 평가

RSSR에서 제기된 중요한 질문 중 하나는 “KORUS-AQ 연구가 현재 배기가스의 규모 및 부문별 추정을 얼마나 효과적으로 지원하는가?”이다. 모델링 분석은 원격 감지 및 현장 측정과 결합되어 한국의 인위적 배출을 평가하는 데 적용되었다. Miyazaki 등(2019), Goldberg 등(2019), Gaubert 등(2020)의 연구에서는 위성 결과와 화학 수송 모델(Chemical Transport Models, CTMs)을 결합한 하향식 방식을 사용하여 한국의 배출목록을 평가했다. Oak 등(2019)의 연구에서는 항공 관측에 대한 모델 평가를 수행하여 한국의 상향식 배출가스 추정을 제한했다. 이러한 연구 결과 한국의 KORUSv5 목록에서 NO_x 및 CO 배출이 각각 40-50%, 83% 증가해야 하는 것으로 나타났다. 예를 들어 Goldberg 등(2019) 연구에서 인용한 그림 5-1에서는 KORUSv1 배출목록에서 NO_x 배출을 2배로 늘리자 WRF-Chem 결과가 DC-8의 NO_x 및 NO_y 농도 관측 결과에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. KORUSv5 배출량 인벤토리에서 업데이트 내용은 부분적으로 이러한 여러 연구에 따른 것이다. 또한 KORUSv5를 사용한 모델 결과를 보면 캠페인 시 지표면 공기의 오존 및 $PM_{2.5}$ 농도 관측의 개선된 비교를 확인할 수 있다(그림 5-2). 각각의 특정한 강점과 약점을 가진 여러 개별 모델을 결합한 모델 앙상블 결과는 관측된 대기 성분을 더욱 정확히 보여준다. 발전소와 같은 점 오염원(Point Source)은 수도권 지역 대기질에 상당한 영향을 미칠 수 있는 특정한 배출 카테고리이다. 하지만 KORUS-AQ 동안의 조건과 관측은 이러한 영향을 정량화하기에는 적절하지 못하였다. 향후 점 오염원 주변의 관측과 모델 시뮬레이션을 결합하여 점 오염원이 대기질에 미치는 기여도에 대한 연구가 필요하다.

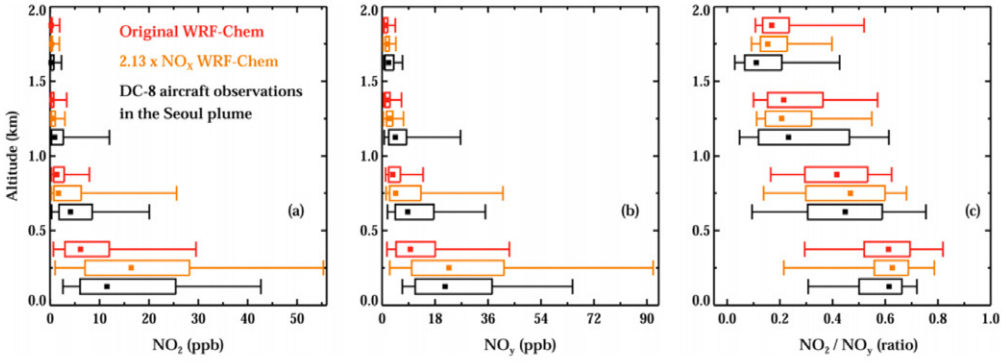


그림 5-1. DC-8 항공기에서 관측한 해발 고도 별(bin, 검정색으로 표시) 서울 플룸 측정치(남서부 끝: 37.1°N, 127.05°E; 북서부 끝: 37.75°N, 127.85°E). 동일한 고도 bin 내 공존하는 WRF-Che(항공기 관측이 원래 시뮬레이션의 경우 빨간색, 2.13 × NO_x 배출 시뮬레이션의 경우 주황색으로 표시됨, 관찰에서 수직 상쇄). 정사각형 점은 중간 값을 나타냄. 직사각형은 25번째와 75번째 백분위수를 나타내며 양쪽의 짧은

선은 5번째와 95번째 백분위수를 나타냄. NO_2와 NO_y를 동시에 측정할 수 있는 경우 (a) NO_2, (b) NO_y, (c) NO_2–NO_y 비율을 비교한 결과(Goldberg 등, 2019 그림 인용).

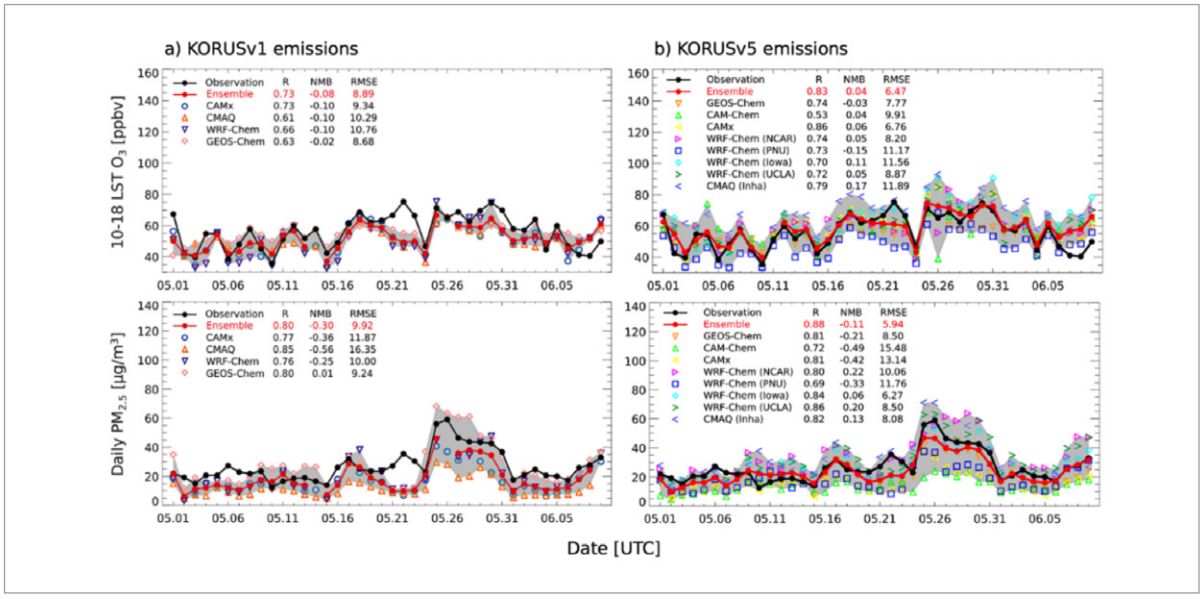


그림 5-2. 서울시, 부산시, 인천시, 광주시, 여수시, 강원도에 위치한 대기오염측정망 지상 측정소의 낮 시간 평균(8시간 평균) O_3(상부) 및 일간 $PM_{2.5}$(하부) 농도 시뮬레이션 및 관측 결과. 관측 결과는 검정색 실선으로, 개별 모델은 각각 다른 색상으로, 앙상블 모델 평균치는 빨간색 실선으로 표시. 모델 범위는 회색 그림자로 표시. 각 모델 및 앙상블 모델의 피어슨 상관계수(R), 정규화된 평균 편차(NMB), 평균 제곱근 오차(RMSE)는 좌측 상단 코너에 표시(R. Park 등, 2020 그림 인용).

5.2. 오존 관측 결과 통합에 대한 모델링의 역할

전국에서 NO_x 또는 VOC가 O_3 발생에 미치는 영향을 파악하기 위해 현장 및 원격 감지 측정을 통한 관측 결과를 근거로 하여 제약조건이 적용된 화학 수송 모델(CTMs)이 사용되었다. Schroeder 등(2020)의 연구에서는 관측이 제한된 광화학 상자 모델을 사용하여 다양한 전구물질 VOC에 따른 O_3 발생의 변화를 정량화 했다. 그 결과 제3장 그림 3-2와 같이 O_3 발생에 가장 큰 영향을 미치는 물질은 향료이며 이소프렌과 인공적인 알켄 물질이 그보다는 적지만 주목할 만한 영향을 미치는 것으로 나타났다. Oak 등(2019)의 연구에서 3-D CTM을 사용하여 한국에서 NO_x 및 VOCs 배출량의 변화가 O_3 발생에 어떤 영향을 주는지를 조사한 결과 특히 주요 대도시 지역에서 O_3 오염을 줄이기 위해서는 NO_x 와 VOC 배출을 동시에 저감하는 것이 중요한 것으로 나타났다(제3장 그림 3-3 참조).

5.3. 미세먼지(PM) 관측 결과 통합에 대한 모델링의 역할

KORUS-AQ에서 $PM_{2.5}$ 농도 관측 결과는 종관 기상학에서 지정하는 특유의 시간에 따른 특성을 나타냈으며(Peterson 등, 2020), 이동기간에는 $PM_{2.5}$ 농도가 높으며 전국적으로 순환기간에는 $PM_{2.5}$ 농도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다(Jordan 등, 2020). 대기오염측정망 전체에 걸친$PM_{2.5}$ 평균 농도의 시간에 따른 변화는 그림 5-2에 나타난 모델을 통해 정확히 파악되어 이 모델을 통해 대규모의 종관적인 영향을 재현할 수 있음이 입증되었다.

종관적 상황에 따라 $PM_{2.5}$의 질량 농도뿐 아니라 화학적 성분도 달라졌다. 다시 그림 2-2(제2장)를 보면, 주요 무기 이온 물질 농도의 증가가 이동기간에 서울의 KIST 관측소에서 관측된 높은 PM_1 농도의 주요 원인이었다. 유기 미세먼지 또한 이동기간 중 높은 PM_1 농도의 원인이 되지만 PM_1에 대한 상대적인 영향은 특히 2차 유기 미세먼지(SOA)로 인해 정체기간에 가장 높다(H. Kim 등, 2018). Nault 등(2018)의 연구에서는 관측이 제한된 상자 모델을 사용하여 KORUS-AQ 중 각 VOC 클래스에서 SOA 발생을 계산한 결과 SOA 대부분이 반응성 방향족과 반휘발성/중간 휘발성 유기 화합물(S/IVOC)로 인해 발생하는 것으로 나타났다(제2장 그림 2-4 참조). 중간 휘발성 유기 화합물의 배출량 추정치는 추가적인 심층 조사가 필요하지만, 낮 시간 동안 수명이 짧은(4시간 미만) 두 가지 화합물이 서울 전체에서 시뮬레이션 된 총 SOA의 최대 70%를 차지하며, 그 중 대부분은 국지적인 배출에서 비롯되는 것으로 나타났다(Nault 등, 2018).

종관적 상황에 따른 PM 농도 및 그 화학적 성분의 변화를 살펴보면 한국의 PM 대기질을 좌우하는 요인을 파악할 수 있다. 몇몇 연구에서는 대기질 모델을 사용하여 배출원이 한국의 PM 노출량에 미치는 영향을 정량적으로 추정했는데, 이는 아래 명시하였다. 하지만 하나 또는 몇 가지 모델을 사용하는 경우 정량적 추정의 불확실성이 크다. 그림 5-2와 같이, 이러한 한계를 극복하려면 다중 모델 앙상블을 사용하는 것이 바람직하다.

R. Park 등(2020)의 연구에서는 캠페인 기간 중 항공기 플랫폼 및 지상 관측망의 관측 결과를 사용하여 캠페인을 위한 대기질 시뮬레이션을 평가하고 상호 비교했다. 여러 모델을 포괄적으로 연구하여 KORUS-AQ 캠페인을 위해 화학 성분 관찰 결과를 재현할 수 있는지 파악했다. 그림 5-3은 캠페인 기간 동안 관측 결과와 서울에 위치한 한국과학기술연구원(KIST) 지상 관측소에서 시뮬레이션한 PM_1 화학 성분 결과를 비교한 것이다. 우선 시간에 따른 PM_1 질량 농도를 관측한 결과, 이동기간에는 높고 순환기간에는 낮은 것으로 농도 변화가 모델 앙상블에 잘 나타났지만 모델간 차이가 큰 것으로 드러났다. 또한 시뮬레이션 결과 정체기간의 SOA 농도는 관측 결과만큼 높지 않았기 때문에, 일반적으로 다른 상황에서는 관측 결과가 실제보다 높게 나타나는 모델 앙상블에서 PM_1 농도가 실제보다 낮게 나타났다. 이동기간에 주요

무기 이온으로 인해 PM_1이 크게 증가하는 상황은 모델에서 효과적으로 재현되었다.

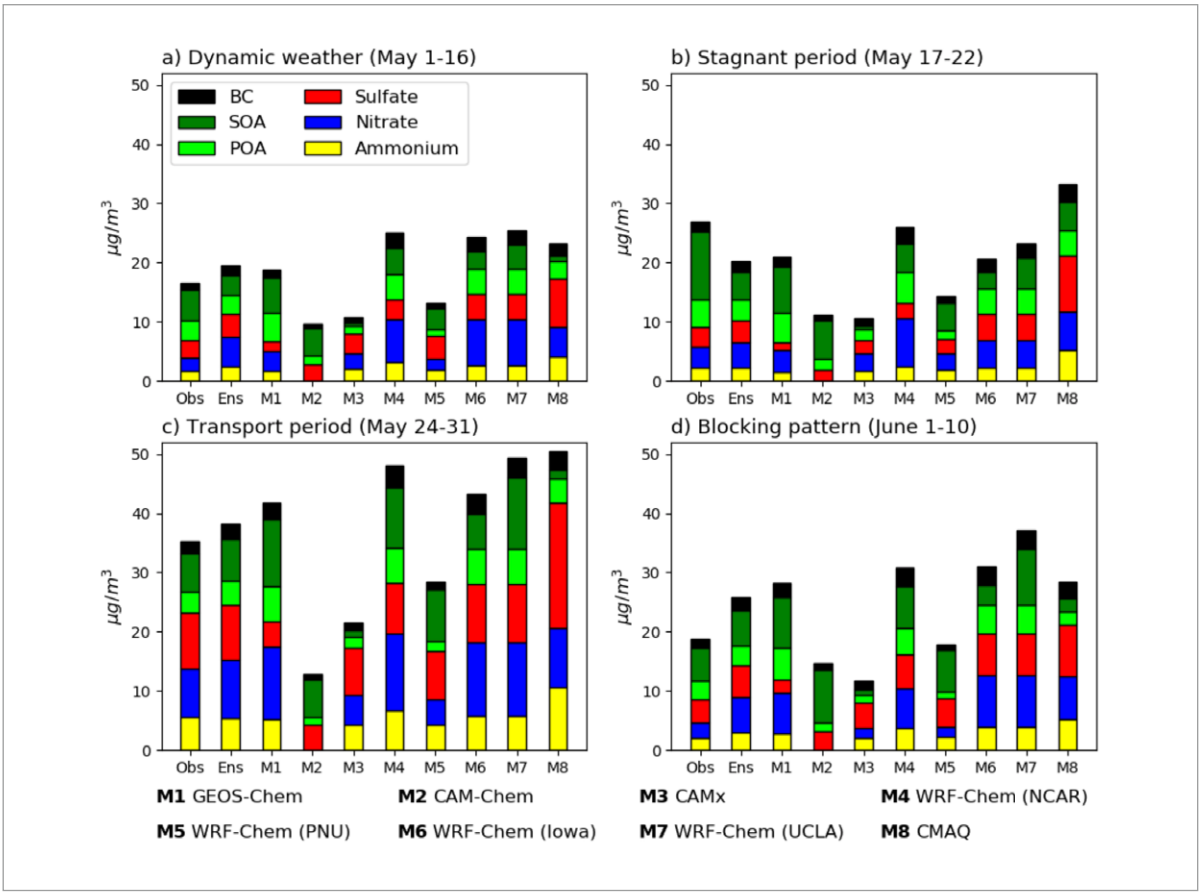


그림 5-3. 캠페인 기간 중 다양한 종관적 상황에 따른 지표면 공기의 PM_1 화학 성분의 평균 시뮬레이션과 관측 결과 비교. 각 화학 성분마다 다른 색상으로 표시되어 있으며 관측 결과는 한국과학기술연구원 지상 관측소AMS(127.045°E, 37.601°N)에서 제공. 가장 낮은 모델 레이어에서 얻은 모델 결과는 관측 결과와 함께 코히런트 샘플링이 적용(R. Park 등, 2020에서 그림 인용).

5.4. 배출원 영향의 상관관계 파악

KORUS-AQ 캠페인이 해결하고자 했던 대표적인 과학적 과제 중 하나는 지역의 대기질에 미치는 월경성 및 국지적 영향을 정량화 하는 것이었다. 여러 연구에서 CTM, 역궤적 분석, 위성 원격 측정을 통해 한국의 대기질에 영향을 미치는 대기오염물질이 발생하는 배출원 지역을 파악하여 배출원 상관관계를 분석했다. 이러한 연구 중 일부가 표 5-1에 요약되어 있지만 각 연구에서는 단일 모델 또는 기법을 사용하여 다양한

매개변수를 측정했다. 또한 이들 중 어떤 연구에서도 최종 KORUSv5 배출 목록을 사용하지 않았다. 이 요약에서는 기상학적 조건으로 인해, 그리고 어떤 매개변수($PM_{2.5}$, BC, CO, 오존)를 연구하는지에 따라 배출원의 영향이 크게 달라질 수 있음을 보여준다.

J. Choi 등(2019)의 연구에서는 KORUSv2 배출에 기반한 수반 모델을 사용하여 다양한 종관적 패턴에 따라 지역별 배출원이 한국 내 $PM_{2.5}$에 미치는 영향을 계산했다. 연구 결과, 동쪽 방향으로의 빠른 수송에 수반된 극심한 오염 발생 시(5월 24-31일) 중국의 배기가스가 총 68%를 차지한 반면 차단기간(6월 1-10일)에는 국내 요인의 중요성이 더 높아져(최대 57%) 공기 오염물질의 월경성 이동을 파악하는 데 있어 종관적 기상학이 중요한 역할을 수행하는 것으로 나타났다(표 5-1). Tang 등(2019)의 연구에서는 태그 CO 시뮬레이션을 사용하여 5월 31일 플룸 발생 시(이동기간) 중국이 한국 CO에 미친 영향이 5월 31일 플룸 발생 시(이동기간)에는 44-64%, 6월 5일(차단기간)에는 11-20%였음이 밝혀졌다. Miyazaki 등(2019)의 연구에서는 중국의 NO 배출을 0으로 설정한 모델 실험을 통해 중국 발 오존의 영향을 추정했다. 이동이 강력했던 날(5월 25일)의 결과에 따르면 서울 전체의 오존 약 25ppb가 중국의 배출가스로 인한 것일 가능성이 있는 것으로 나타났다. Lamb 등(2018)의 연구에서는 역궤적 모델을 사용하여 수직으로 성장된 블랙 카본(BC, Black Carbon)에 대한 지역적 영향을 파악했다. CTM 기반 연구와 마찬가지로, 이동기간 중 400-900hPa 사이의 지배적인 영향은 중국으로부터 온 것으로 밝혀졌다. 정지궤도 위성이 이동기간 동아시아 지역의 미세먼지 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)를 관측한 결과 중국 중동부에서 발생한 대기오염물질이 큰 원인이라는 근거가 밝혀졌다(Lee 등, 2019).

단일 3-D 대기질 모델을 사용한 CO, 오존, PM 배출원의 정량적 추정은 모델의 기상학적, 화학적, 물리적 프로세스가 부정확하게 나타나기 때문에 불확실성이 큰 경향이 있다. 앞서 언급된 바와 같이, 모델 앙상블이 여러 개별 모델보다 관측 결과를 재현하는 데 효과적이기 때문에, 배출원의 영향을 더욱 정확하게 정량화 하기 위해서는 다중 모델 앙상블을 사용하여 지역별 배출원이 한국의 PM 및 오존 농도에 미치는 영향을 추정해야 한다.

표 5-1. KORUS-AQ 기간 동안 다양한 오염물질 및 측정지표에 따라 배출원이 한국 오염에 미친 영향[%]

오염물질 또는 측정지표	한국	동아시아 (한국 제외)	방식, 참고 자료
$PM_{2.5}$에 대한 기간별 인구 노출 (population exposure) 순환기간: 정체기간: 극심한 오염 기간: 차단기간:	 50 34 26 57	 46 63 71 37	KORUSv2.1 배출을 기반으로 한 수반 모델, J. Choi 등, 2019
서울 상공 DC-8 항적이 850hPa 미만인 경우 한국 전역 CO(항시):	11-24	39-71	여러 배출가스 조합에서 3D 모델 태그 CO, Tang 등, 2019(표 2)
GOCI AOD 및 역궤적	16-64	30-61	GOCI, Lee 등, 2019 연구의 그림 10(서울 R1과 R2+R3+R4 비교)
5월 25일 O_3	n/a	25	NO 배출을 0으로 설정한 모델 Miyazaki 등, 2019 그림 3

5.5. 결론

대기질 및 대기 성분 모델링은 기상학, 화학, 배출량을 포함한 실제 상황의 정확한 재현에 따라 크게 달라진다. KORUS-AQ 기간 중 발생한 기상 패턴 변동을 통해 이러한 기상 패턴이 오염물질의 양 및 분산에 미치는 영향을 알 수 있다. 좀 더 구체적으로는, 해륙풍이 불면 서울 전체의 오존 및 $PM_{2.5}$의 양이 빠르게 변화했다. 서울 주변의 복잡한 지형 또한 기상학과 그에 따른 대기질을 시뮬레이션 하는 데 어려움이 되었다. KORUS-AQ를 통한 과학적 발견에 따라 한국의 인위적 배출량에 대한 이해도가 향상되어 오존 및 PM 관측 결과와 모델의 일치율이 높아졌다. 하지만 배출량을 정량적으로 추정하려면 높은 PM 발생률의 원인이 되는 일부 전구물질(NH_3, S/IVOCs 등)에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 한국의 PM 농도는 여전히 주요 무기 이온으로 인해 주로 발생하지만, 특히 전구물질의 국지적인 배출로 인해 SOA의 중요성이 점차 커지고 있다. SOA 발생은 복잡한 화학 작용으로 이루어지는데, 대기질 모델에서는 이러한 화학 작용이 아직 정확한 매개변수로 나타나지 않았다. 대기질 예보의 정확도를 높이기 위해서는 배출 인벤토리 작성과 화학 및 기상학에 대한 과학적 이해 증진을 통해 지속적인 모델 개발 및 평가가 이루어져야 한다.

6장 위성 원격 측정

핵심 포인트

- KORUS-AQ 기간 중 NO_2 및 HCHO의 항공 매핑 원격 측정 분광기 관측 결과는 GEMS 관측 결과의 원형으로, 공간 해상도가 높은 일상적인 시간별 GEMS 자료에서 제공될 혁신적인 대기질 정보를 강조한다.
- VOC 또는 NO_x가 오존 기주농도 형성에 미치는 영향의 지표로 흔히 사용되는 HCHO 대 NO_2 대류권 기주농도 비율은 측정 방식과 모델링 관점에 따라 크게 달라진다.
- 높은 공간 해상도 항공 원격 측정 결과는 점 오염원의 높은 SO_2 및 NO_x 배출량과 이로 인한 풍하 지역 플룸의 공간적 범위를 명확히 보여준다. 다양한 기상학적 상황에서 장기적인 GEMS 관측 결과의 평균장으로부터 이러한 배출원의 특성을 파악할 수 있을 것이다.
- 역궤적 분석을 통한 정지궤도 위성 관측 결과는 미세먼지의 장거리 이동(LRT, Long-range Transport)에 대한 유용한 근거를 제공한다. 중국 동부 중간지역의 경계층에서 발생하는 LRT 현상은 일반적으로 한국의 높은 AOD(에어로솔 광학깊이) 농도에 영향을 미치지만, 중국 북부와 몽골의 경계층으로부터 오는 기단은 한국의 높은 AOD와 관련이 없는 것으로 나타났다.
- GOCI 및 AHI를 통한 위성 원격 측정은 높은 시간적 해상도를 통해 미세먼지의 공간적 분포와 플룸 이동 추적에 대한 광역적 모습을 보여준다. GeoTASO는 GEMS를 통해 기체상 오염물질 농도를 측정할 수 있음을 성공적으로 보여주었다. 하지만 원격 측정을 통해 제공되는 기주농도 정보는 지표면 농도와 다르기에 완전한 해석을 위해서는 현장 측정과 화학 수송 모델을 통한 보완이 필요하다.

KORUS-AQ의 일환으로 위성, 항공, 지상 장비 등 다양한 관점에서 원격 측정이 이루어졌다. 목표는 GEMS 시대와 함께 시작될 통합 관측 및 모델링 시스템의 원형을 개발하는 것이었다. GEMS는 300-500nm의 광도 스펙트럼을 0.6nm의 분광 해상도로 측정하는 자외선-가시광 대역 분광기이다(J. Kim 등, 2020). 하루에 여러 번 GEMS를 통한 고해상도 관측을 실행하면 혁신적인 정보를 얻을 수 있을 것이라는 사실은 분명하지만, GEMS 관측 결과를 최대한 활용하려면 상호 보완적인 지표면 측정 결과, 그리고 가능한 경우 연직 방향 분포 측정 결과를 사용하여 관측 결과를 해석해야 한다는 사실 또한 분명하다. KORUS-AQ 기간 중 항공 GEMS와 유사한 항공 측정 결과를 사용한 연구 결과는 체계적인 GEMS 관측 결과를 통해 GEMS 관측영역 전체에 걸쳐 NO_2, HCHO, SO_2에 대한 개선된 하향식 배출량 제한을 제공해

줄 수 있음을 잘 보여주었다. AHI, AMI, GOCI 등의 기존 인공위성센서를 통한 미세먼지 관측 결과는 이동되거나 국지적으로 배출된 미세먼지 오염을 구분할 수 있음을 보여준다.

6.1. 항공 분광 영상기 측정 결과를 통한 원형 GEMS 관측 결과

GeoTASO(Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization) 장비를 갖춘 NASA King Air는 규칙적인 격자 패턴으로 비행하며 GEMS를 통해 측정될 두 가지 핵심 물질인 NO_2와 HCHO에 대해 처음으로 하루 최대 4회까지 지속적으로 높은 공간 해상도의 지도를 제공했다. 이러한 자료는 수도권 지역 전체에 걸친 오존 및 미세먼지 형성에 대한 중요 전구 물질 분포의 공간 및 시간에 따른 변동을 최초로 보여준다. KORUS-AQ는 하루 동안의 수도권 지역 매핑 관측 결과를 2일에 걸쳐 제공했다.

6월 9일은 수도권 지역의 북쪽 부분이 이른 아침부터 늦은 오후까지 4회 매핑된 유일한 날이다(그림 6-1). GEMS와 유사한 시간대에 관측이 이루어졌지만 항공기가 각 맵에 나타난 영역을 관측하는 데는 2시간이 소요되었기 때문에 관측 빈도는 GEMS의 시간별 관측의 절반 밖에 되지 않았다. 이 때는 KORUS-AQ 캠페인의 후반대에 속하는 시기였으며 기상학적인 차단 패턴이 사라지게 된 원인인 약한 한랭전선을 따라가 어느 정도 높은 O_3 및 PM 수준을 특성으로 하는 약한 이동시기로 간주되었다(Peterson 외, 2019). 그림 6-1의 흰색 화살표는 00:00 UTC(09:00 LT) 및 06:00 UTC(15:00 LT)에 GDAS(Global Data Assimilation System)에서 지상고도 최저 500m를 통해 평균이 계산되어 6시간 간격의 바람장을 나타낸다. Judd 등(2018)의 연구에서 언급된 바와 같이, 오전에 비교적 가벼운 바람이 불면 국지적인 산업화 지역의 배출원과 이동 경로를 반영하는 NO_2 패턴이 나타난다. 이른 오전부터 늦은 오전까지 NO_2 수치는 일반적으로 증가하고, 이는 NO_2 제거 과정보다 배출 과정이 더 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 이른 오후까지 대기경계층 고도가 높아지고 지표면 NO_2가 더욱 깊은 층까지 혼합되면서 NO_2 분포는 국지적인 배출원 지역을 나타내는 대신 수도권 지역 대부분에서 더욱 폭넓은 증가 추세를 보이며, 전반적인 기주농도는 계속해서 증가했다. 풍속이 증가하고 서쪽으로 이동하며, 서해안의 NO_2 수치가 감소하고 수도권 지역 중앙부의 수치가 증가하는 것으로 보아 바람이 전체적으로 이러한 폭넓은 오염 플룸을 동쪽으로 이동하기 시작한다는 사실을 알 수 있다. 늦은 오후가 되면 NO_2 최대량이 수도권 지역의 동쪽으로 더욱 이동하여 태화산 학술림 관측소까지 이른다.

총 VOC 농도의 지표로 흔히 사용되는 HCHO는 6월 9일, NO_2의 작용과 유사한 일간 작용을 보이지만 중요한 차이점도 있다. 이른 오전의 HCHO 농도는 수도권 영역 전체에 걸쳐 비교적 균일하지만 서쪽 수도권 지역(인천, 김포 지역 등)에서 NO_2 증가와 함께 몇몇 고립된 지역적 증가를 보이는데, 이는

인위적인 배출원을 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 점점 균질화 되는 수도권 지역 플룸에서 HCHO 기주농도 값이 최대 약 4배까지 증가한다. 이는 NO_2 일변화 패턴과 유사하지만 HCHO 최대값은 훨씬 남쪽에 위치하며 NO_2 최대값과 함께 나타나지 않는다. 태화산 지역을 포함한 동쪽으로 더 치우친 지역에서는 오후 늦게까지 HCHO의 최대값이 감소했다. HCHO는 다양한 VOC 전구 물질로 인한 광화학 생성에 따라 달라지기 때문에 국지적인 증가의 원인이 개별 배출원이라고 보기 어렵다. HCHO 분포는 배출량, 기상장, NO_2 등의 화학반응으로부터 분명한 영향을 받지만 두 물질은 하루 동안의 변화 양상이 다르기 때문에 이로 인한 오존 생성을 추정하는 일이 쉽지 않다.

5월 17일에도 GeoTASO는 수도권 지역을 오전과 오후에 매핑했다. 이 날 비행은 훨씬 넓은 지역에 걸쳐 수도권 지역의 서쪽, 동쪽, 남쪽으로 더욱 확장되어 오전에 매핑 1회, 오후에 매핑 1회가 수행되었다(그림 6-2). KORUS-AQ 캠페인이 3분의 1 정도 진행된 시점인 이 날은 지속적인 고기압 상태에서 기상학적으로 정체기간에 속했기 때문에 연구 기간 중 오존 수치가 가장 높았던 날에 속한다(Peterson 등, 2019). 영역 내 서쪽 부분에선 오전에 지표면 가까이 약한 남풍이 불었으며, 이로 인해 대규모 점 오염원으로부터 배출된 해안 부근의 NO_2 플룸은 명확히 북쪽 방향으로 흘렀다(SO_2에서 관측된 이러한 대규모 점 오염원에 관한 자세한 내용은 그림 6-4(b) 및 6-4(c) 참조). 영역 중앙부에서는 아침 바람이 정체되어 있어 NO_2 최대값이 배출원에 매우 가까운 위치에 발생했다.

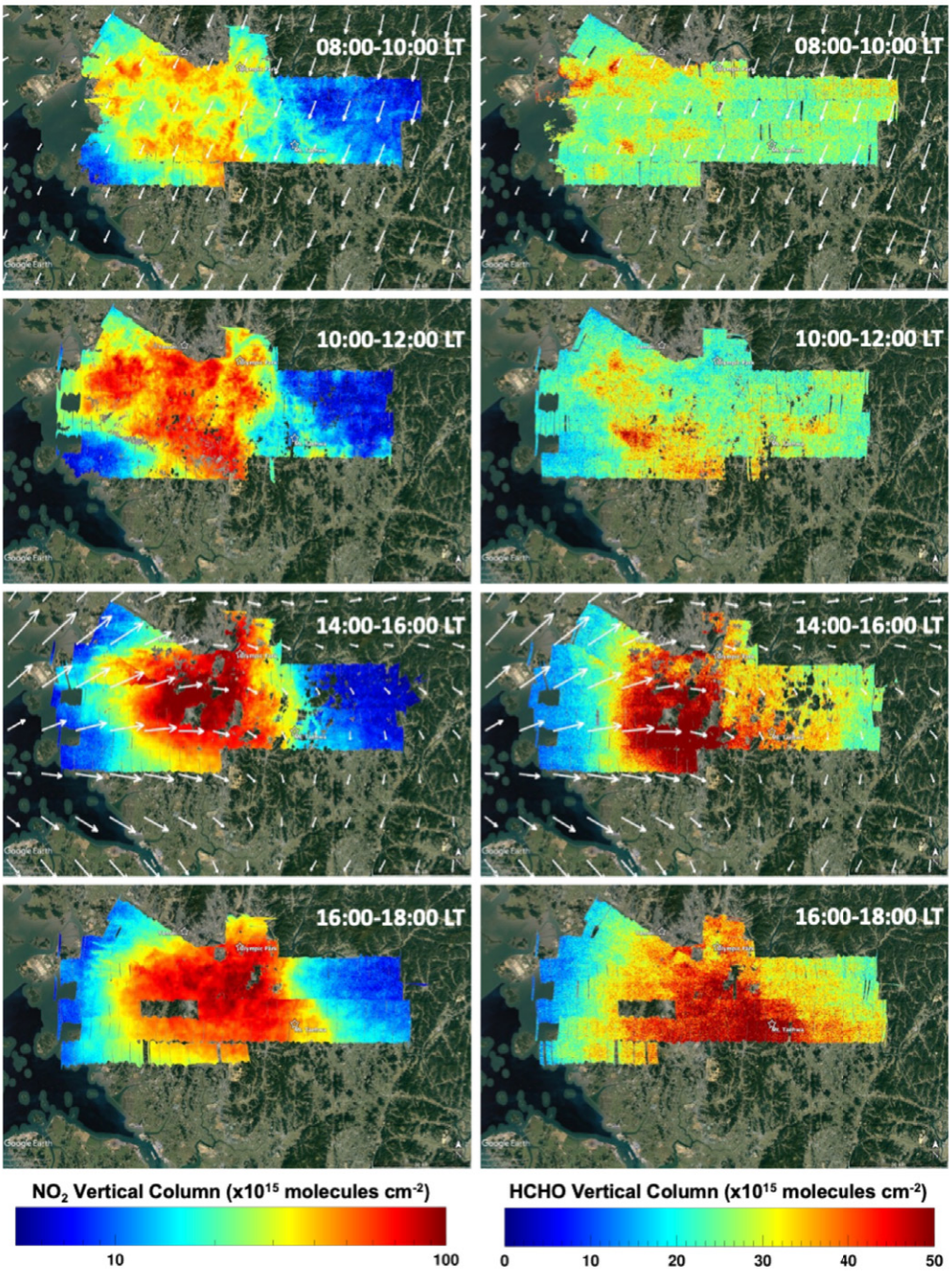


그림 6-1. 2016년 6월 9일 GeoTASO의 NO_2(좌) 및 HCHO(우) 대류권 수직 기주농도 관측 결과. 이른 오전(위)부터 늦은 오후(아래)까지 일간 변화를 4회 관측(Judd 등, 2018에서 그림 인용).

오후에는 바람이 북서풍으로 바뀌며 NO_2 분포도가 급격히 증가하며 균일성도 증가했으며 도시 플룸이 서울 중심부에서 태화산을 지나 남동쪽 방향으로 확장되었다. 주목할 만한 또 다른 특성은 태화산의 남동쪽 대규모 화학 제조 시설이 위치한 바로 근처에서 개별적인 플룸이 발생했다는 점이다.

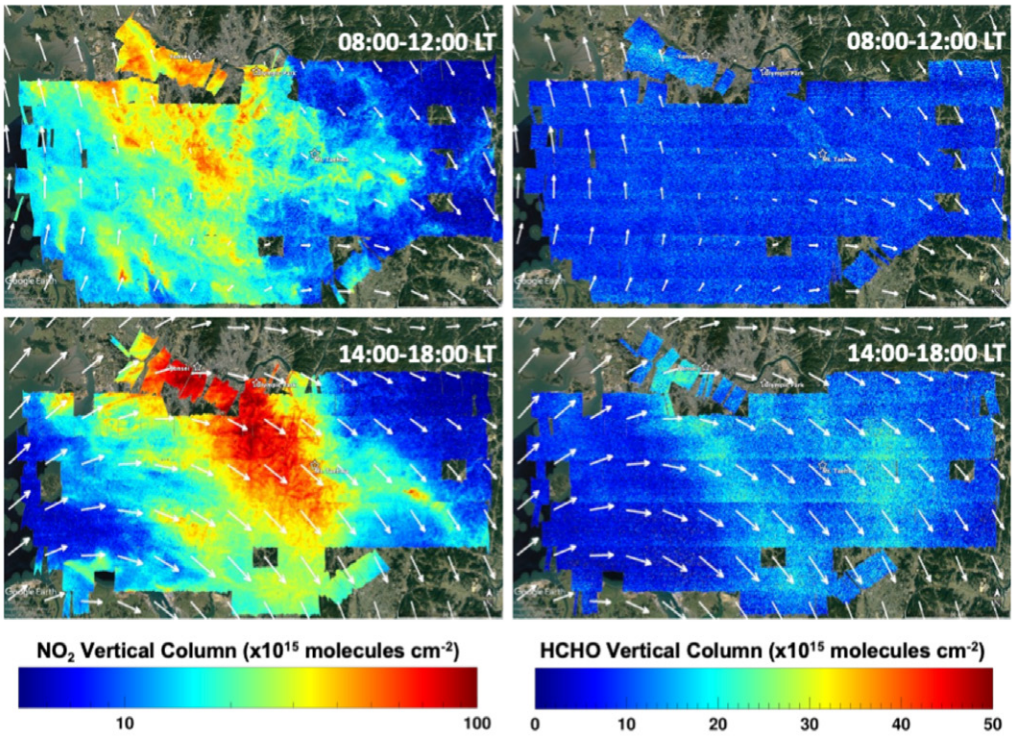


그림 6-2. 2016년 5월 17일 GeoTASO의 NO_2(좌) 및 HCHO(우) 대류권 수직 기주농도 관측 결과. 오전(위) 및 오후(아래)에 넓은 수도권 지역 영역에 걸쳐 관측(Judd 등, 2018에서 그림 인용).

5월 17일의 HCHO 양상은 6월 9일과 매우 다르다. 오전에는 전체 수도권 지역 영역에 걸쳐 기주농도가 6월 9일 오전보다 균일하게 2-3배 낮다. 5월 17일 오후에는 서울 남동쪽으로 폭넓게 약 2배까지 증가하며, NO_2 플룸 농도의 최대값과 일치하지 않는다(오히려 HCHO 최소량에 해당).

5월의 "기준" HCHO 농도값이 6월보다 훨씬 낮게 나타난 것은 온도 또는 광화학 복사에너지 플럭스와 함께 HCHO에 대한 생물성 VOC 전구 물질이 증가하게 되는 온도 또는 일광 시간의 직접적인 영향인 것으로 보인다. 올림픽 공원 및 태화산 관측소(표시되지 않음)의 GeoTASO 관측 결과를 보면 5월

1일부터 6월 10일까지 HCHO가 균일하게 증가했음을 알 수 있다(올림픽 공원 최대 3배, 태화산 최대 4배). 5월 17일과 6월 9일 모두 한국의 오존 수치가 기준을 초과했으며 두 날의 오존 수치가 유사하게 나타났다(Peterson 등, 2019, 그림 3). 두 날의 NO_2 수치는 비슷했지만 HCHO로 나타난 VOC 수치는 매우 달랐다는 점에서, 이러한 오존 수치의 광범위한 유사성은 주목할 만하다.

6.2. 서울 내 오존 생성: NO_x 제한 또는 VOC 제한

오존 생성 민감도는 RSSR의 핵심 과제 중 하나였다. 수도권 지역의 남동쪽(거리 55km)에 위치한 태화산 학술림의 HCHO 및 NO_2 기주농도의 기주농도의 패턴을 조사하여 원격 측정을 통해 오존 민감도를 분석했다. Schroeder 등(2020) 연구에서는 관측 결과에 따른 모델 계산 결과, KORUS-AQ 기간 동안 서울과 태화산 지역은 VOC가 제한된 기후특성에 속한다고 보고했다. 하지만 세부적인 현장 관측 결과가 없었기 때문에 이 $HCHO/NO_2$ 비율은 VOC 및 NO_x 전구 물질 배출에 대한 오존의 비선형 민감도를 위한 프록시(대리자료)로 간주되어 왔다.

여러 선행 연구에서는 $HCHO/NO_2$ 기주농도 비율을 지표면(surface) 오존 민감도의 지표(index)로 사용했으며 연구 지역과 관측 자료에 따라 광화학적 기후특성의 기준 수치를 다르게 설정했다(Tonnesen 및 Denis, 2000, Martin 등, 2004, Duncan 등, 2010, Choi 등, 2012, Chang 등, 2016, Jin 및 Holloway, 2015). Martin 등(2004) 연구에서는 북미, 동아시아, 유럽의 GEOS-Chem 및 OMI 관측 결과를 분석하여 오존 민감도 임계값 전환점은 $HCHO/NO_2$ 기주농도 비율이 1인 지점이라고 추정했다. 후속 연구 결과, 이 전환점이 실제로는 조건에 따라 수치가 상당히 달라질 수 있는 전환 범위라는 점이 밝혀졌다. 또한 Schroeder 등(2017) 연구 결과, 현장 관측 결과(0.9 - 1.8)를 기주농도(1.1 – 3.0)에 비교 분석 시 전환 범위가 변경될 수도 있다고 나타났다. Schroeder 외 연구에서는 하루 중 시간에 따라 이 비율이 크게 달라진다는 사실도 강조하며 하루 중 특정 시간의 위성 관측 결과를 사용하여 민감도를 진단하는 방식의 실효성에 의문을 제기했다.

그림 6-3은 교외지역 여주/태화산 학술림(Taehwa Research Forest, TRF) 관측소에서 현장 관측 결과, 지상 및 위성 원격 측정, 모델링 결과, GeoTASO 원격 측정 등 다양한 관점에 걸친 HCHO 및 NO_2 대류권 기주농도 및 기주농도 비율($HCHO/NO_2$) 변화를 보여준다. 대부분의 $HCHO/NO_2$ 수치는 1 – 3의 모호한 전환 범위 내에 속하며, 이 범위를 벗어나는 수치는 모두 1 미만의 낮은 수치, 즉 VOC가 제한된 조건임을 나타낸다. DC-8 측정 결과에 따르면 VOC 제한 조건의 양이 정오에 1 미만으로 가장 강력한 전환을 보여주며 변경된다. 반대로, Pandora 기주농도 측정 결과는 대부분이 전환 범위에 속하며 시간이 흐름에

따라 수치가 NO_x 제한에 가까워진다. 오후에는 수치의 3/4분위수가 3을 초과하여 명백히 NO_x 제한에 속하게 된다. 이렇게 광화학적 기후특성이 일관되지 않은 이유는 특히 기온이 높은 오후에 Pandora HCHO 기주농도가 DC-8 통합 기주농도보다 16% 높기 때문이다(Spinei 등, 2020, Spinei 등, 2018). GeoTASO 측정 결과는 시간 경과에 따라 VOC 제한 조건에 대한 반대의 경향을 보인다. GeoTASO의 경우에는 수치의 약 절반이 1 미만, 즉 명백히 VOC 제한에 속한다. 위성 관측 결과의 경우, 정오 근처에 관측된 OMI 자료는 모두 전환 범위에 속했지만 GOME-2B의 오전 자료는 VOC 제한 특성을 보였다. OMI와 GOME-2B 간 관측 시간 및 픽셀 크기의 차이로 인해 결과가 달라질 수 있다. GEOS-Chem, WRF-Chem, CAM-Chem의 HCHO 기주농도 결과는 오전에서 오후에 걸쳐 증가하는 유사한 결과를 보였다. 하지만 모델마다 NO_2 양상이 매우 다르기 때문에 HCHO/NO_2 비율도 서로 달랐다. GEOS-Chem 및 WRF-Chem은 VOC 제한에 가까워지지만 WRF-Chem 데이터는 전환 범위 영역으로, 일부 자료는 NO_x 제한 특성으로 이동했다. KORUS-AQ 기간 중, 시간이 경과함에 따라 온도 또한 상승하면서 HCHO 대류권 기주농도가 점진적으로 증가했다. HCHO에 대한 관측 결과와 모델 결과는 대체적으로 일관적이다. 하지만 관측 결과와 모델 간 NO_2 대류권 기주농도의 차이는 HCHO 대류권 기주농도의 차이보다 훨씬 크다. 이렇게 NO_2 대류권 기주농도 패턴이 일관적이기 않기 때문에 다양한 관측과 모델링 관점 간 HCHO/NO_2 기주농도 수치에 차이가 발생한다. 샘플링 특성이 다르다는 점 또한 명백한 NO_2 수치 차이의 원인 중 하나이다. 모델 결과는 해당 기간 내내 항상 균일하게 샘플링될 수 있지만 항공기 자료는 비행이 가능한 날과 시간에만 수집할 수 있으며 Pandora 자료와 위성 자료는 지속적으로 제공되지만 구름 또는 품질 검사로 인한 공백이 발생할 수 있다. 그럼에도 불구하고 여러 모델 간 차이의 정도는 여러 관측 결과 간 차이의 정도와 다르지 않다.

오존 생성 평가에 대한 일반적인 원격 측정, 접근 방식 중 하나가 무엇이었는지의, 차이에 따라 모델 기주농도 및 지표면 측정 결과를 포함하는 더욱 포괄적인 통합 전략을 통해 관측 결과를 평가해야 하는 방식이 결정된다.

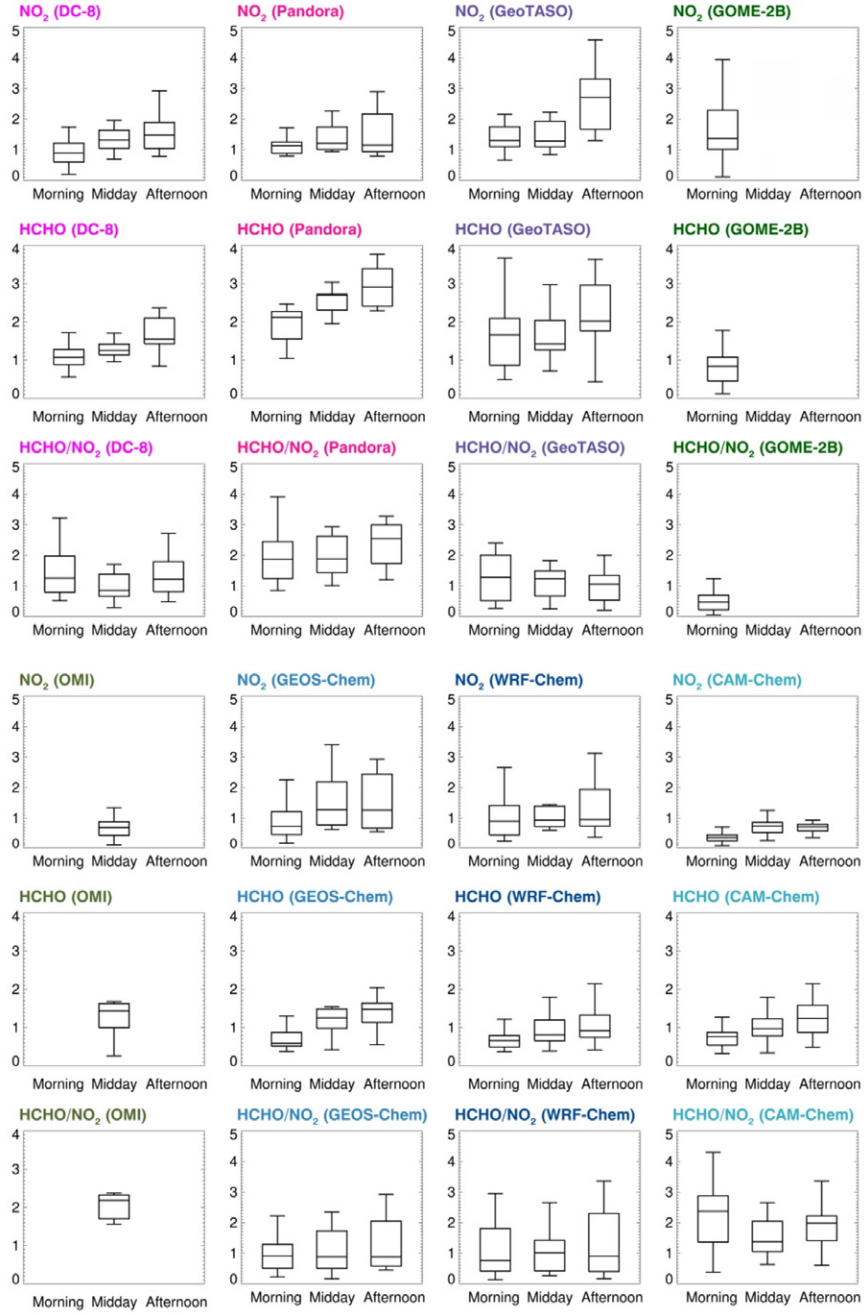


그림 6-3. 태화산 학술림 지역에서 측정 시간에 따른 NO_2, $HCHO/NO_2$ 기주농도에 대한 DC-8 관측 결과, 지상 및GeoTASO 및 위성 원격 측정, 모델 시뮬레이션 비교. 위에서 3번째 행까지는 DC-8, Pandora, GeoTASO, GOME-2B의 NO_2, HCHO, $HCHO/NO_2$ 비율, 그 아래 3개 행은 GEOS-Chem, WRF-Chem, CAM-Chem의 OMI 측정 결과 및 모델 결과(Koo 외 작성 중 논문에서 인용).

6.3. 서해안의 대규모 점 오염원 측정

KORUS-AQ 기간 중 GeoTASO 항공 측정 결과에 따른 SO_2 지도를 작성함으로써 고해상도 원격 측정을 통해 SO_2 배출원을 감지할 수 있음이 성공적으로 증명되었다(Chong 등, 2020). 250m x 250m의 높은 공간 해상도를 갖춘 GeoTASO 측정 결과를 통해 여러 관측 결과를 통합할 필요 없이 한 번의 비행만으로도 소규모 SO_2 배출원과 배출된 플룸을 감지할 수 있다. GeoTASO에서 SO_2 기주농도를 산출하여 서해안, 특히 충청남도(충남) 북부의 점 오염원에서 배출되는 SO_2의 2차원 스냅샷을 제공한다(그림 6-4). 일반적으로 가장 높은 SO_2 기주농도 수치는 TMS(Stack Tele-Monitoring) 기기가 높은 SO_2 배출량을 측정한 위치의 산업 시설 주변에서 관측된다. GeoTASO 관측 결과에 따르면 점 오염원 주변 SO_2 농도의 공간적 분포가 바람의 상태에 따라 크게 달라질 수 있어 이러한 배출원에서 배출되는 SO_2가 주변 대기질에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어 5월 17일 오전(그림 6-4b)에 SO_2 플룸은 경기도 남부 근처까지 도달했지만 SO_2 기주농도는 6번 배출원에서 1km 이동 시 1/e배 만큼 감소한다. 직하점 시계(Nadir-Viewing) 항공 원격 측정 장비로 자주, 그리고 장기적으로 관측할수록 이러한 점 오염원이 수도권 지역의 대기질에 미치는 영향을 평가하는 데 유용한 정보를 얻을 수 있다. 본 보고서 제4장에 언급된 바와 같이, 장기적인 GEMS 관측 결과를 통해 시간 경과에 따른 배출 목록 평가에 유용한 하향식 구속 조건을 확보할 수 있다.

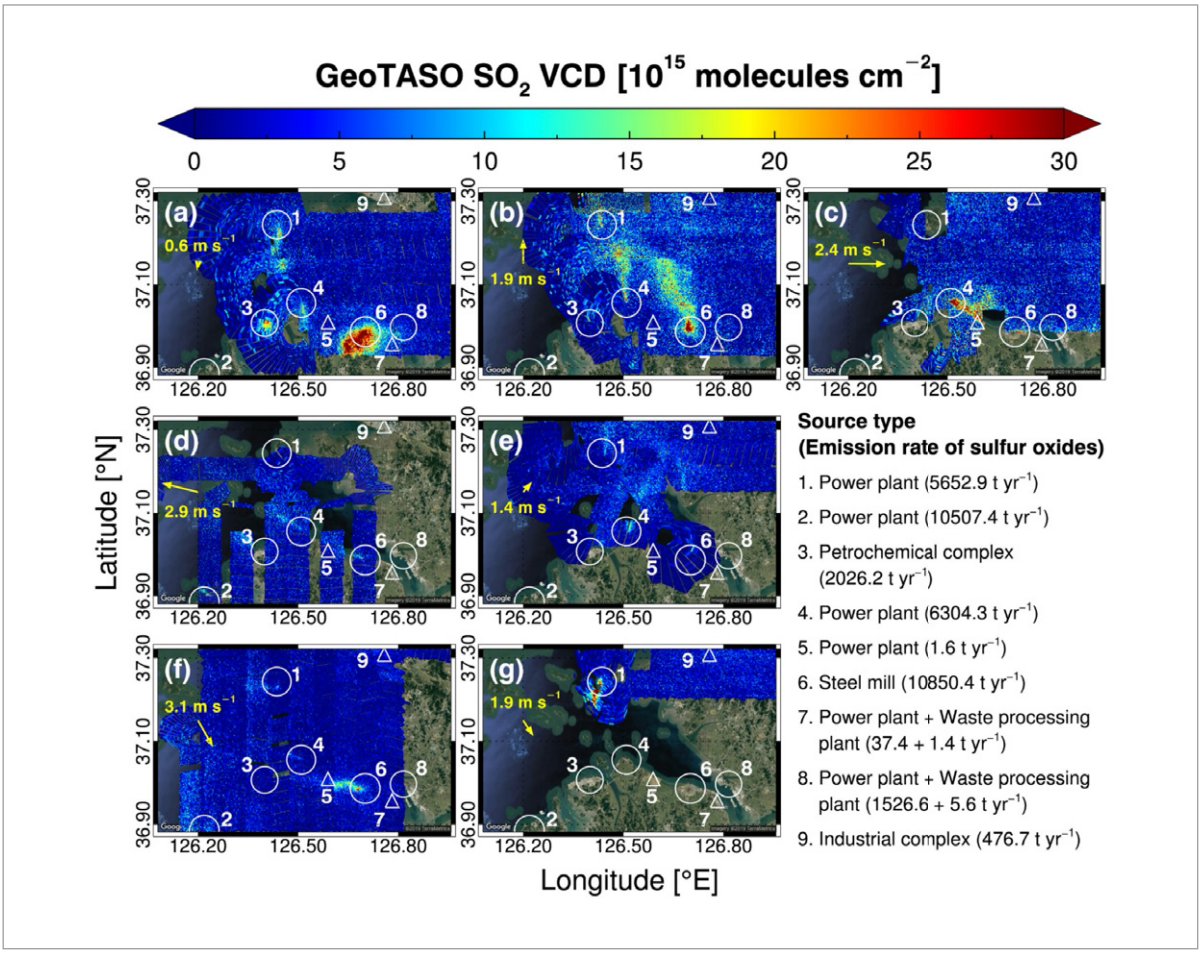


그림 6-4. 충남 북부 지역에서의 GeoTASO SO_2 관측 결과 확대 모습. 이 지역에서 7회, 즉 (a) 5월 11일 08:58-11:23 LT, (b) 5월 17일 08:39-11:05 LT, (c) 5월 17일 14:10-16:31 LT, (d) 5월 22일 09:52-11:52 LT, (e) 6월 2일 10:19-11:47 LT, (f) 6월 5일 13:26-16:55 LT, (g) 6월 9일 07:48-11:51 LT 관측 결과. 이 지역에서 각 GeoTASO 비행 중 데이터로부터 수집한 평균 풍속 및 풍향은 노란색으로 표시. 이 지역에 대한 TMS(Stack Tele-Monitoring) 보고서에 나열된 SO_2 배출원 9곳은 번호가 매겨져 원과 삼각형으로 표시. 원은 2015-2017년 평균 SO_x 배출량이 1kt yr-1을 초과하는 SO_2 배출원을 나타내며 삼각형은 같은 기간 동안 평균 SO_x 배출량이 1kt yr-1 이하인 배출원을 나타냄. 각 원의 반지름은 2015-2017년 Stack TMS 기기가 각 시설에서 측정한 평균 SO_x 배출량의 로그값에 비례함. 번호가 매겨진 각 배출원의 배출 유형과 Stack TMS 보고서의 해당 3년 간 평균 SO_x 배출량이 표시되어 있음(지도는 Google Earth Imagery를 통해 생성됨.) (Chong 등, 2020 연구에서 그림 인용).

6.4. 지역, 대륙, 반구 범위에 따라 배출원에서 발생하는 미세먼지 대기 오염 이동

지역, 대륙, 반구 범위에 따라 배출원에서 발생하는 대기오염물질 이동이 서울에 미치는 영향이라는 문제 또한 핵심적인 RSSR 질문 중 하나로, 위성 관측 결과를 통해 부분적으로 해결할 수 있다. 정지궤도 위성은 미세먼지와 미량 기체의 하루 중 변화를 모니터링할 수 있다는 장점이 있다.

KORUS-AQ 기간 동안 다양한 위성 센서를 통해 정확도가 높은 미세먼지 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD) 결과를 사용하여 동아시아 지역의 공간-시간에 따른 미세먼지 분포를 모니터링할 수 있었다(M. Choi 등, 2019, Gupta 등, 2019). 공간-시간적 해상도가 높은 정확한 미세먼지의 광학적 속성 자료를 수집하는 수단의 하나로 위성 자료 융합을 고려할 수 있다(Lim 등, 2018, M. Choi 등, 2019, Lim 등, 2020). 2단계 위성 융합 제품을 통해 다양한 장비와 알고리즘에서 생성된 여러 결과를 사용하여 AOD를 더욱 정확하게 추정할 수 있다. KORUS-AQ에서는 AHI(Advanced Himawari Imager) 및 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager) 자료를 각각 AMI(Advanced Meteorological Imager) 및 GOCI-2 자료의 융합 결과에 대한 프록시(대리자료)로 사용했다.

그림 6-5는 Peterson 등(2019) 연구에서 지정한 캠페인 기간 동안 4가지 대표적인 기상학적 상황별로 융합 결과를 수송 평가에 활용한 것이다. 우선 차단기간의 경우(우측 하단)에는 중국 동부 지역의 AOD가 다른 기상학적 지역에 비해 높게 나타났다. 한편 정체기간의 경우(우측 상단)에는 러시아에서 일본 홋카이도 지역으로 이동된 산불 미세먼지가 정체되어 AOD 수치가 높게 관측되었다. 산불 미세먼지 플룸의 대부분이 계속 동쪽으로 태평양까지 이동했으며 플룸 일부는 넓은 고기압권에 혼입되어 다시 한반도로 돌아왔다. 하지만 이동 거리와 상대적으로 약하면서 낮은 풍속으로 인해 연구 지역에 도달하는 잔여 연기 입자는 분산되어 현지 오염물질과 골고루 혼합되었다. 이동기간의 경우(좌측 하단)에는 중국에서 관측된 AOD가 기상학적 바람장(검정색 화살표)과 동일한 방향으로 한반도를 거쳐 일본으로 이동되고 있었다. 이러한 자료 융합 과정을 통해 동북아시아 지역 AOD 측정 결과의 정확도를 높임으로써 자료 동화에 더욱 정확한 자료를 사용할 수 있다.

이동기간 동안에는 DIAL/HSRL을 통한 소멸도(extinction) 수직분포의 항공 LIDAR 측정 결과를 GOCI AOD 관측 결과와 결합하면 그림 6-6과 같이 2016년 5월 25일 장거리에 걸쳐 이동된 미세먼지의 3차원 구조를 파악할 수 있다. 황해 상 경도 124°E를 따라 남-북 방향 단면의 미세먼지 소멸도 수직분포를 보면 이동된 미세먼지 플룸이 경계층 고도 1.5km 높이에 갇혀 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 지도에 나타난 GOCI AODs는 해당 기상학적 이동기간 동안 중국에서 한반도로 이동된 미세먼지 플룸을 나타낸다.

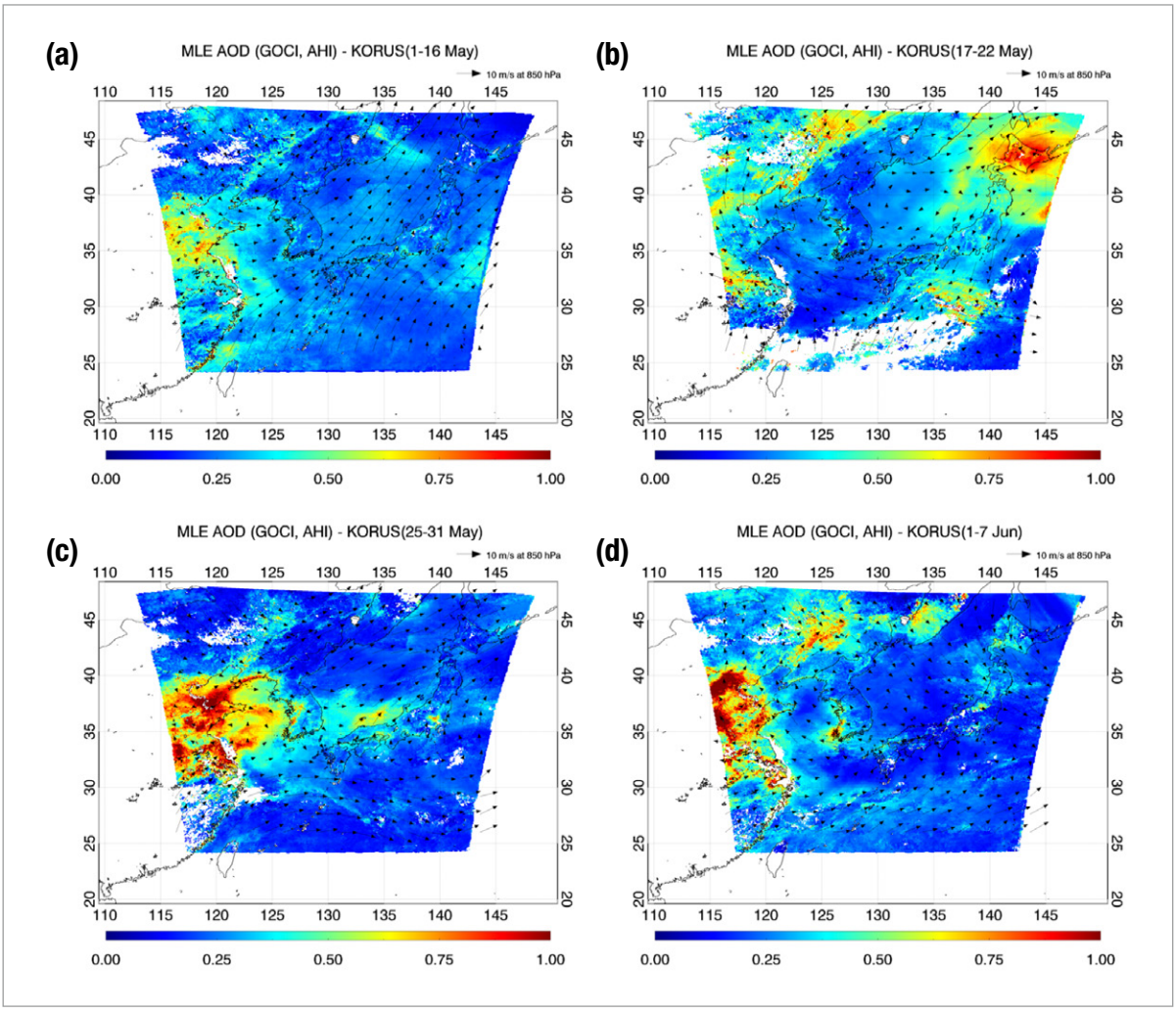


그림 6-5. KORUS AQ 캠페인 기간 중 AHI 융합 AOD 평균(좌측 상단: 순환기간(dynamic period), 우측 상단: 정체기간(stagnant period), 좌측 하단: 이동기간(transport period), 우측 하단: 차단기간(blocking period))(Kim, Al-Saadi 등 작성 중 논문에서 그림 인용).

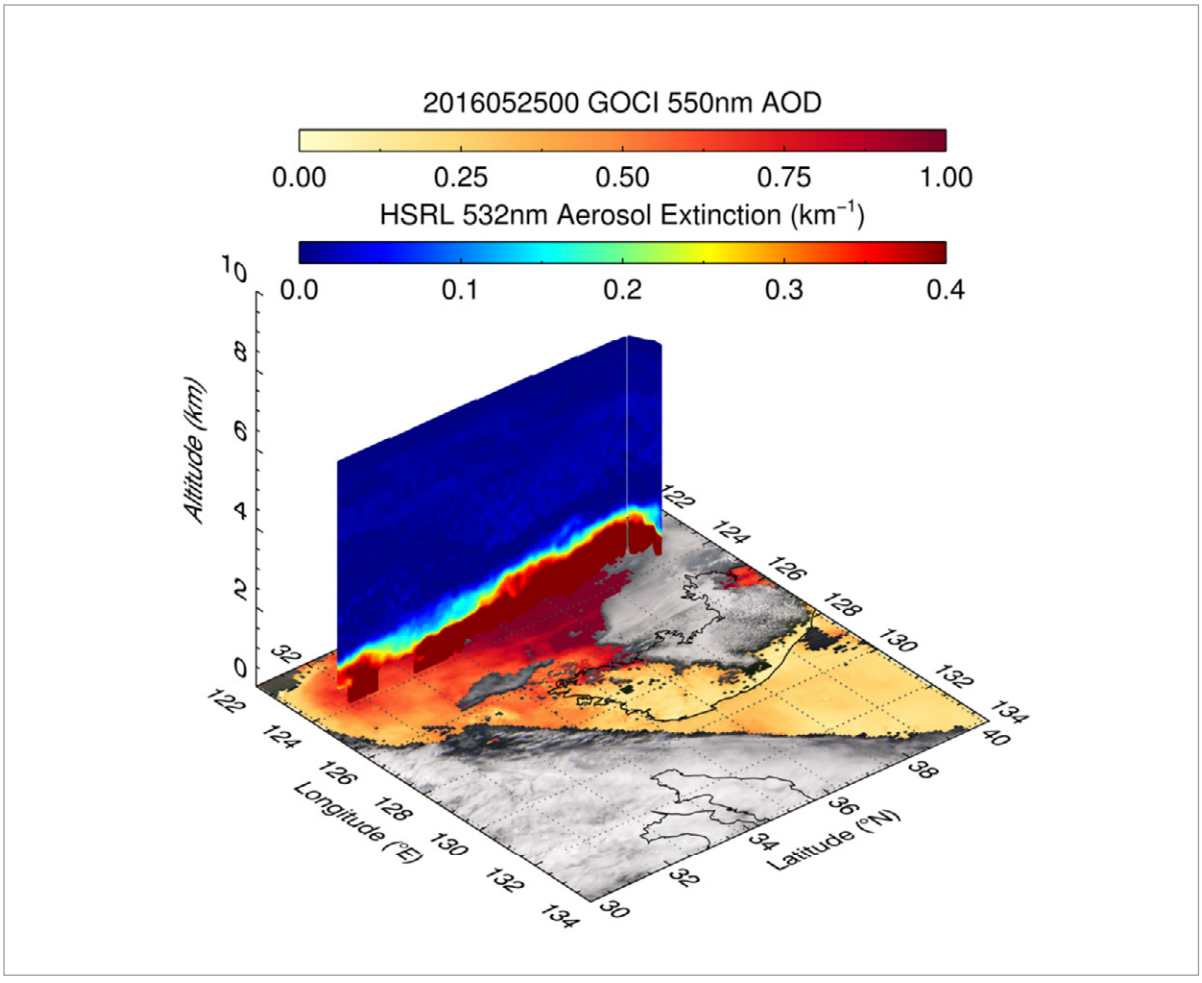


그림 6-6. 2016년 5월 25일 서해 상 남북 절단면을 통한 소멸도(extinction) 수직분포의 항공 LIDAR 측정 결과 및 일 평균 GOCI AOD 관측 결과(Kim, Al-Saadi 등 작성 중 논문에서 그림 인용)

GOCI 위성 AOD를 한반도의 기상학 자료 및 역궤적 자료와 함께 사용하여 KORUS-AQ 캠페인 기간 중 미세먼지의 장거리 이동의 특성을 조사했다(Lee 등, 2019). 그림 6-7을 보면 바람장이 표시된 GOCI AOD 영상을 바람장과 합성하면 미세먼지 농도가 높은 경우와 낮은 경우 간의 명확한 차이를 확인할 수 있다. AOD가 가장 높은 5일의 경우, 서해 상 무거운 미세먼지 플룸이 중국 중동부에서 서풍을 타고 이동되었다. 반대로, AOD가 가장 낮은 5일에 대한 GOCI AOD를 합성해 보면 서해 상공 월경성 이동의 진행과 경과가 나타나지 않았다. 중국 중동부의 경계층 내부를 따라 미세먼지가 장거리 이동되는 경우 이로 인해 한국의 AOD가 증가하는 반면, 중국 북부와 몽골의 경계층 상부의 기단은 전반적으로 한국의 높은 AOD와 상관관계가 없다. 이러한 관측된 이동 현상은 국지적인 미세먼지 생성에 영향을 주어 한국의 미세먼지

오염이 더욱 악화될 수 있다는 점에 주목해야 한다(자세한 내용은 제2장 참조).

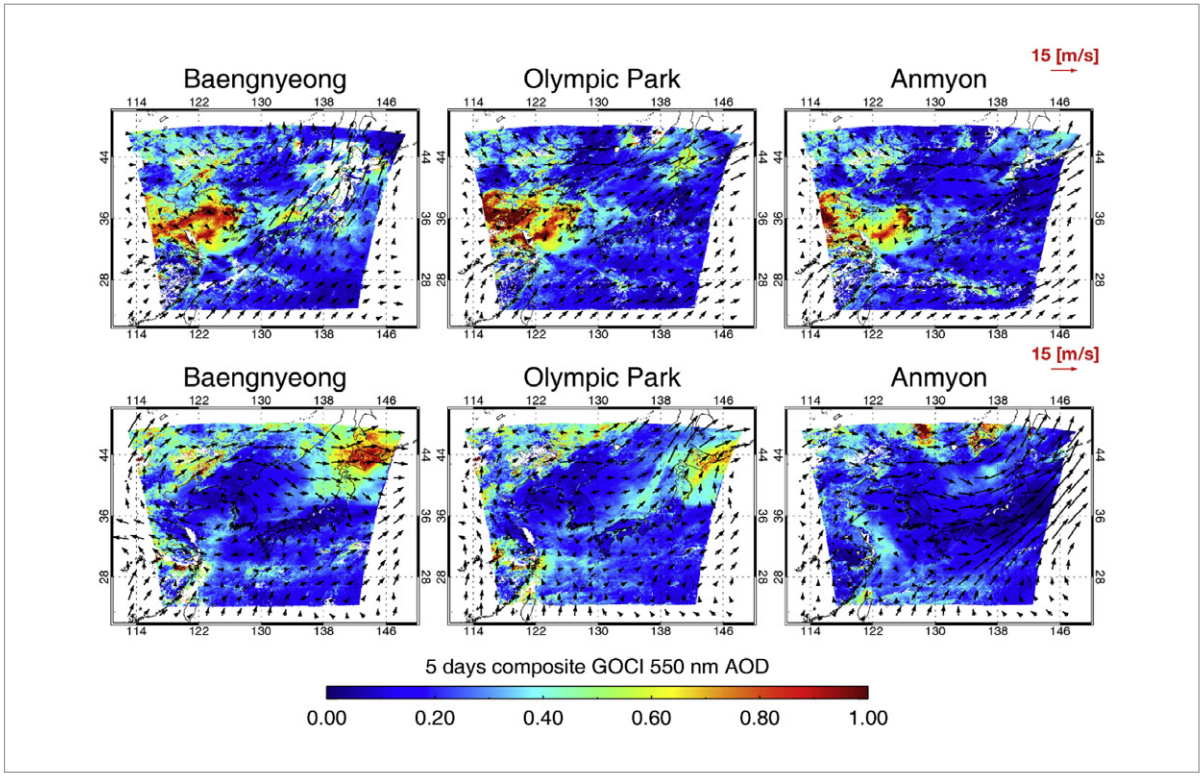


그림 6-7. KORUS-AQ 기간 중 백령도, 올림픽 공원, 안면도 지역에서 AOD가 가장 높았던 5일(위)과 AOD가 가장 낮았던 5일(아래)의 기압면 고도 850-hPa에서의 바람 벡터 및 GOCI AOD 합성장(Lee 등, 2019에서 그림 인용).

그림 6-8과 같이 시간에 따른 미세먼지 이동을 정량적으로 분석하기 위해 자오선 기준 경도 0.02도 간격으로 관측위도대에 걸쳐 평균을 구하는 방식으로 한반도의 서쪽 절반과 서해(35-38 °N, 123-128 °E)의 GOCI AOD에 대한 Hovmöller 다이어그램을 구성했다(M. Choi 등, 2019). 5월 25일 기상학적으로 이동량이 낮은 상황에서 09:30 LT 당시 최고 수치는 123.5°E에서 나타났으며 16:30 LT까지 계속해서 동쪽을 향해 126.3°E로 이동했다. 이러한 이동은 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 세계 기후 대류권 재분석 5세대 자료(ERA5, Copernicus Climate Change Service, 2017)에 나타난 850hPa에서의 서쪽 방향 대상풍과 일치한다. 미세먼지가 서해를 건너 이동됨에 따라 한반도(126–129.5 E)의 AOD 수치가 점진적으로 증가했으며, 특히 서부 지방의 127ºE 영역에서는 0.3에서 0.8로 증가했다. 반대로, 2016년 6월 5일에는 기상학적 차단 패턴 동안 매우 다른 양상을 보였다.

2016년 6월 5일에는 서해와 한반도의 전반적인 AOD 수치가 낮았으며(0.1–0.2) 오전에 GOCI에서 측정한 수도권 지역(Seoul Metropolitan Area) 37°N, 127°E 근처의 ADO는 약 0.4–0.6으로 나타났다. 여기서 주목해야 할 점은, 오후에는 수도권 지역 AOD가 1.0까지 증가하여 주변 지역으로 전파되어 수도권 지역 서쪽 지역에 도달했다는 사실이다. 또한 Lennartson 등(2018) 연구 결과, GOCI, 지상 기반 AERONET, WRF-Chem 모델을 통해 하루 동안 미세먼지 농도가 지속적으로 변화함을 확인할 수 있었다. 하루 동안의 AOD 변화를 살펴보면 이른 오전과 늦은 오후에 AOD 수치가 가장 높고 정오에 AOD가 가장 낮은데, 이를 교통, 관측소 위치, 부지 유형, 장거리 이동의 영향으로 보았다. 해안에 위치한 관측소와 내륙에 위치한 관측소 간에 이러한 경향은 유사한 것으로 나타났다. 옹스트롬 지수 또한 대부분의 관측소에서 오후 2시경 최대치를 보였다(즉, 미세입자). 단, 예외적으로 안면도, 백령도, 고산에 위치한 해안 어촌 지역 관측소에서는 반대의 경향을 보였다. 이른 오전과 늦은 오후에는 옹스트롬 지수가 감소한다(즉, 조대입자).

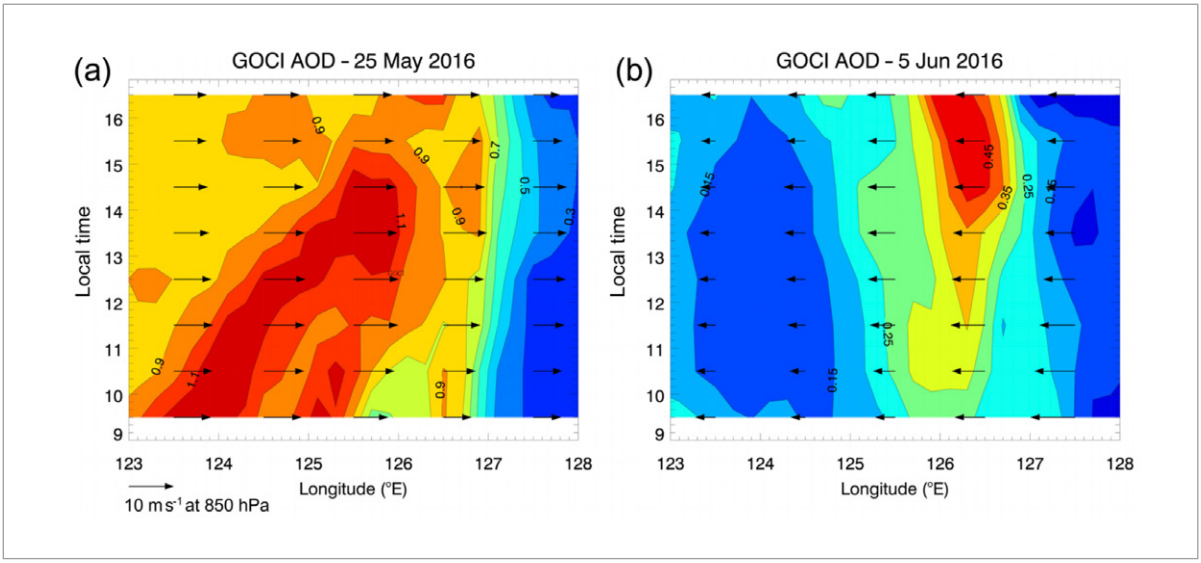


그림 6-8. 2016년 (a) 5월 25일과 (b) 6월 5일 경도 0.25도 간격으로 측정한 서해 및 한반도(35–38°N, 123–128°E) 지역의 자오선 기준 관측위도대의 평균. 화살표는 850hPa에서 평균 바람장을 자오선 기준으로 나타낸 것(M. Choi 등, 2019에서 그림 인용).

KORUS-AQ 현장 캠페인 기간 중 AERONET에서 675nm에서 측정한 AOD 시계열과 연세대학교 관측소(서울 중심부)에서 측정한 미세 모드의 부피 평균 반경은 그림 6-9(a)와 같다. 2016년 5월 17–23일 정체기간은 회색 그림자로 표시되어 있고 5월 말 주요 월경성 이동기간은 파란색으로 표시되어 있다. 이동기간 동안에는 전선 통과가 약하고 중국으로부터 오염이 이류되어 한반도 대부분의 영역에서

운량(Cloud Fraction, CF)이 높게 나타났다. 이동기간에는 AOD와 부피 평균 반경 둘 다 급증하는 경향을 보였다. RH가 높으면 흡습성이 증가하기 때문에 오염 이동 기간에는 입자 부피가 10배 이상으로 커졌다(그림 6-9(b)). 제2장에서 언급한 바와 같이, 이렇게 흡습성이 증가하면 국지적인 배출기체가 입자로 변환되는 속도가 빨라지는 경향이 있기 때문에 이동 기간에는 미세먼지 오염이 더욱 악화되었다. 흡습성의 증가로 인해 미세먼지 크기와 AOD가 변화하면서 미세먼지 오염 예보를 위해 위성에서 수집한 AOD 자료의 동화에도 영향을 준다. Saide 등(2020) 연구 결과, AOD 자료 동화로 인해 $PM_{2.5}$ 수치가 실제보다 2배 이상 높게 예측될 수 있는 것으로 나타났다. 이는 입자 크기 분포, 화학 성분, 흡습성에 관련된 미세먼지의 광학적 특성을 모델이 정확히 재현하지 못하기 때문이다. 따라서 위성과 모델 간 정보를 정확히 해석하는 데 있어 현장 관측 결과의 필요성이 더욱 커지게 된다.

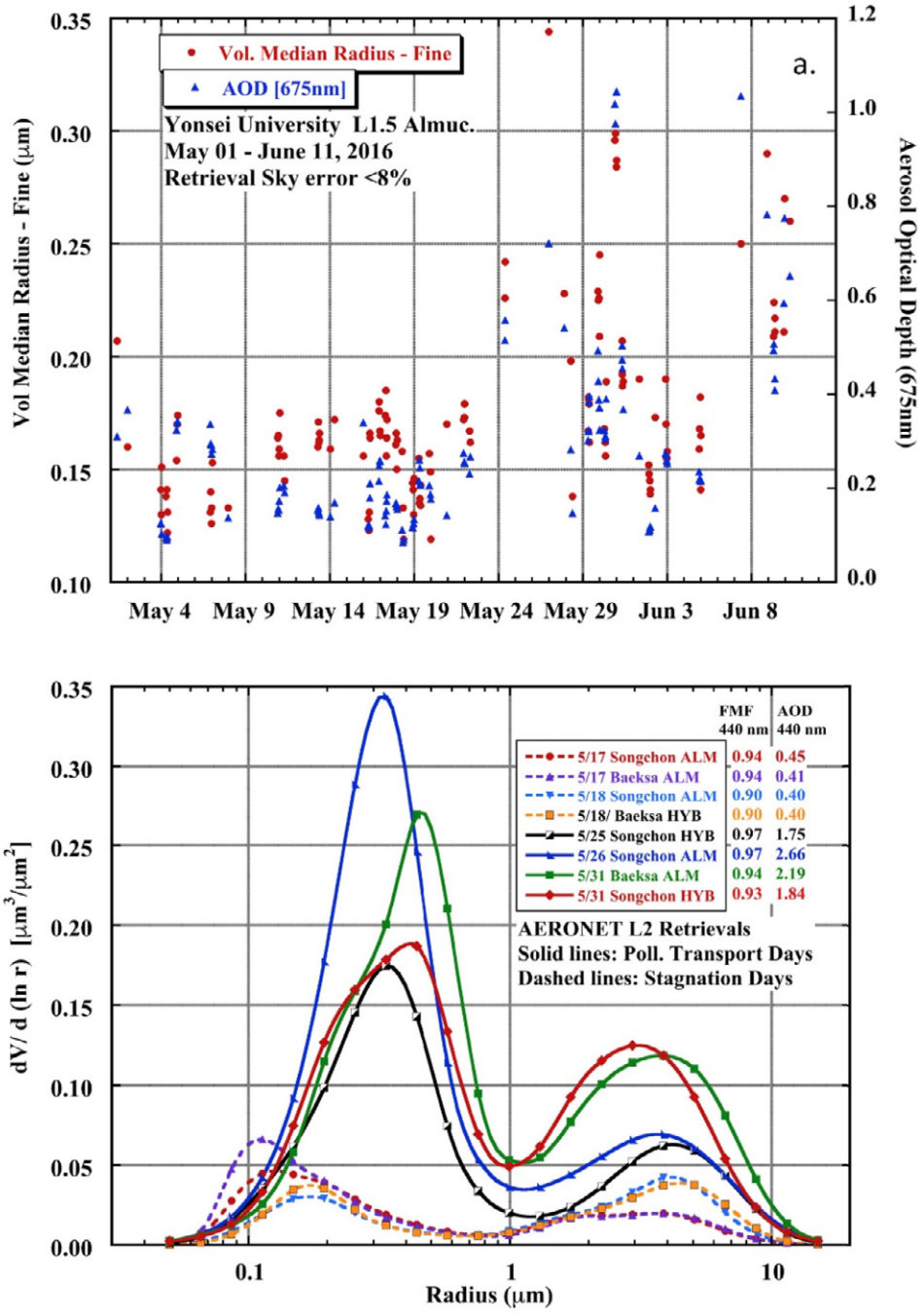


그림 6-9. (a) 2016년 5월 1일부터 6월 10일까지 부피 반경 중앙값의 AERONET 고도권 산출 결과 시계열과 서울 중심부에 위치한 연세대학교 관측소에서 675nm에서 측정한 AOD. (b) AERONET 크기 분포 산출 결과에는 주로 국지적인 배출원, 낮은 RH, 구름이 없는 상태를 보이는 정체 기간(5월 17,

18일)에 비해 오염 이동 기간(5월 25, 26, 31일)의 미세먼지 부피가 10배 증가. 이는 부분적으로 RH 수치가 높은 오염 이동 기간 동안 미세먼지의 수분이 증가하기 때문임(Eck 등, 2020에서 그림 인용).

결국 위성 미세먼지 관측 결과는 한반도 주변의 더욱 광범위한 영역의 AOD의 공간적 분포 자료를 측정할 수 있는 유일한 수단이다. 정지 궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO) 위성 관측 결과는 미세먼지 플룸의 경로를 더욱 높은 시간해상도로 보여주며 플룸이 바람장과 만나는 경우 이동의 변화에 관한 정보를 제공했다. 이러한 유용한 정보를 모델에 연결하면 한국에 영향을 주는 오염원 예측과 상관관계 파악에 도움이 될 것이다.

6.5. 결론

위성 원격 측정은 지표면 또는 항공 측정 결과에 접근할 수 없는 지역을 비롯하여 광범위한 영역에서 측정을 수행하는 데 있어 명백한 장점을 가지고 있다. 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성은 전 세계를 아우르는 일별 정보를 제공할 수 있다. 정지 궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO) 위성은 광화학, 기상학적 변화, 배출량 변화로 인한 하루 동안의 대기오염물질 변화를 조사할 수 있어 특정 영역의 세부적인 수치를 제공한다.

GOCI 및 AHI를 통한 위성 원격 측정은 캠페인 기간 동안 미세먼지의 공간적 분포와 그 변화에 대한 포괄적인 영상을 제공했다. 위성 AOD를 역궤적과 통합하여 높은 시간해상도로 플룸 이동 경로를 추적할 수 있었다. GeoTASO를 통해 GEMS는 미세먼지뿐 아니라 전구 기체를 성공적으로 관측할 수 있었다. 하지만 이러한 원격 감지 관측 결과는 미세먼지 소멸 및 기체 농도에 관한 기주농도 정보를 제공하지만 결정적인 지표면 농도 정보를 제공하지 않는다. 지표면의 기체 농도 측정 결과와 혼합층 고도 정보(운고계 등 사용)를 결합하고 화학 수송 모델을 통해 보완하면 이러한 한계를 극복할 수 있다. 또한 기계 학습(machine learning) 알고리즘을 사용하여 기주농도 측정 결과를 지표면 농도로 변환하는 기법을 개발할 수 있다(S. Park 등, 2020 등).

GEMS는 2020년 2월 19일 프랑스령 기아나의 쿠루(Courou)에서 발사되었으며 GEO-KOMPSAT-2B(GEOstationary KOrea Multi-Purpose SATellite-2B)에 장착되어 있다. GEMS 스펙트럼에서 미세먼지, 오존, 그 전구물질(NO_2, SO_2, HCHO, CHOCHO)의 기주농도 자료를 제공한다. GEMS는 예보, 하향식 배출량 추정, 자료 동화, 공공 서비스 등 다양한 대기질 관리 분야를 확대할 대기오염물질에 대한 GEO 관측의 새로운 시대를 열고 있다.

위성에서 관측한 미량 기체 수치를 활용하여 하향식 접근 방식을 통해 기존 배출 목록을 평가할 수 있다. 예를 들어 KORUS-AQ 기간 동안 OMI NO_2 관측 결과를 통해 추정된 NO_x 배출량을 보면 서울의 현재 상향식 NO_x 배출량이 실제보다 낮게 나타난다는 사실을 알 수 있다(Goldberg 등, 2019). SO_2와 같은 기타 가스종의 배출량을 분석하는 데에도 이러한 하향식 접근 방식을 적용할 수 있다. 장기간에 걸친 위성 자료 세트가 축적되면 이를 사용하여 상향식 목록에서 누락된 배출원을 파악할 수도 있다. 결국 위성을 사용하여 배출 목록의 하향식 분석과 누락된 배출원 측정을 실행하면 대기질 모델의 성능이 향상된다. 위성을 통한 미량 기체 관측 결과를 사용하면 자료 동화를 통해 대기질 모델링 개선에도 도움이 된다. 이러한 접근 방식은 위성 자료의 공간 및 시간해상도가 높아 성능이 뛰어나기 때문에 GEMS는 대기질 예측에 크게 기여할 것으로 기대된다.

위성에 기반한 관측 결과를 통해 공간-시간적 특성과 미세먼지의 장기간 이동에 관한 정보를 파악하고 미세먼지 모델링의 불확실성을 축소함으로써 대기질에 대한 이해를 증진할 수 있었다. 위성 자료를 통한 자료 동화 및 역모델링을 적용하여 결과 예측의 정확성을 높일 수 있었다(Saide 등, 2014, Saide 등, 2020, Pang 등, 2018). 최근 미세먼지 및 미량 기체 관측을 위한 한국의 정지 궤도 위성 센서가 발사됨에 따라, 자료 융합, 하향식 배출량 추정, 자료 동화를 통해 한국뿐 아니라 아시아 전체에 걸친 더욱 넓은 범위의 대기질 측정 및 모델링에 기여할 것으로 기대된다(그림 6-10).

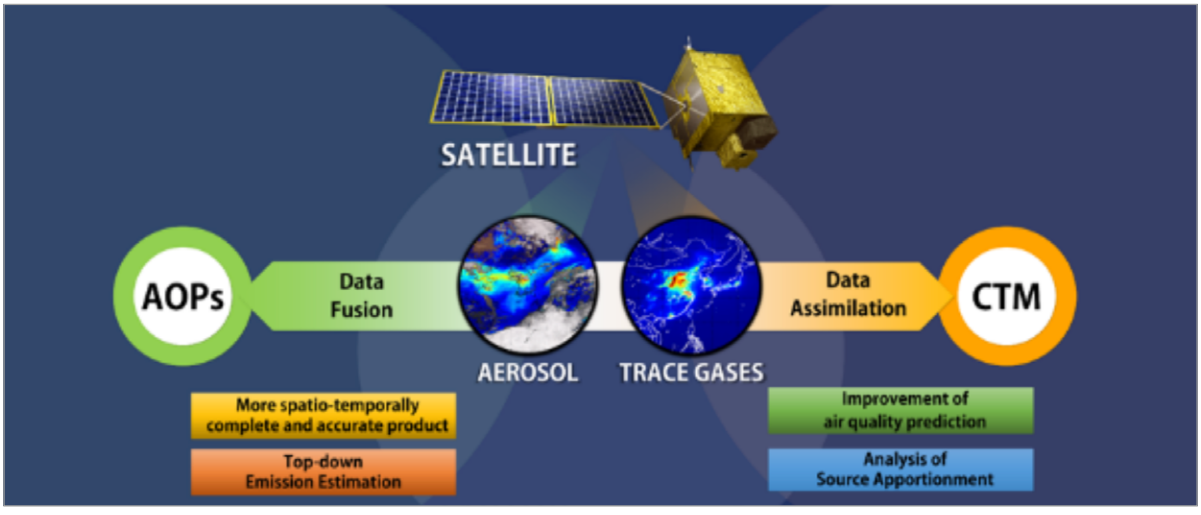


그림 6-10. 대기질에 대한 위성 관측 결과 적용의 프레임워크

7장 정책 제언

7.1. 한국의 대기질 관리 활동

7.1.1 한국의 대기질 및 배출 저감 목표

한국 정부는 CO, SO_2, NO_2, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, Pb, 벤젠 등 8가지 오염물질에 대한 국가적 차원의 대기질 기준, 즉 대기오염물질 기준을 수립했다. 대기질 기준 초과 횟수와 사람의 건강에 미치는 영향을 고려할 때 가장 우려되는 2가지 오염물질은 $PM_{2.5}$와 O_3이다.

2020년 현재 한국 대기 중 $PM_{2.5}$ 및 O_3에 대한 국가 기준은 다음과 같다.

$PM_{2.5}$	연평균 15 μg/m^3, 24시간 평균 35 μg/m^3
O_3	8시간 평균 60 ppbv, 1시간 평균 100 ppbv

2016년에는 모든 도시 지역 대기 측정소의 측정 결과가 대기 중 $PM_{2.5}$ 및 O_3에 대한 국가 기준을 충족하지 못했기 때문에 이와 같은 기준을 장기적인 목표로 설정했다. 환경부에서는 2017년 9.26 미세먼지 관리 종합대책(9.26 대책)을 발표하고 잠정적인 $PM_{2.5}$ 목표를 수립하였다.

서울 연평균 농도	18 μg/m^3(2016년 26 μg/m^3)
24시간 평균이 50 μg/m^3를 초과하는 일수	전국적으로 78일(2016년 258일)

9.26 대책의 배출 저감 목표는 2022년까지 30%로 설정되었다. 배출 저감의 대상이 되는 오염물질에는 $PM_{2.5}$뿐만 아니라 2차 $PM_{2.5}$ 생성의 원인이 되는 NO_2, SO_2, VOC도 포함된다. 포괄적인 완화 정책에는 배출 기준 강화, 연료 전환, 금전적 보상 제도화, 대기오염 제어 기술 도입이 포함되었다.

9.26 대책은 직, 간접적으로 $PM_{2.5}$를 배출하는 4가지 부문인 발전, 산업, 수송, 누출오염원에 중점을 두었다. 부문별 $PM_{2.5}$ 배출 저감 목표는 발전 25%, 산업 43%, 수송 32%, 누출오염원 15%이다. 공업 부문이 총 배출 저감의 51%를, 수송 부문이 28%를 차지하였다.

7.1.2 한국의 새로운 미세먼지 규제 - 미세먼지 계절관리제

미세먼지 오염은 오랫동안 한국의 가장 심각한 대기오염으로 인식되어 왔다. 2003년 환경부에서 공포한 수도권 대기환경개선에 관한 특별법은 이후 10년 간 PM_{10} 수치가 크게 개선되는 데 큰 도움이 되었다.

$PM_{2.5}$가 인체에 미치는 영향에 대한 대중의 우려가 커지고, 과학적 연구결과 등이 축적됨에 따라 2015년 $PM_{2.5}$ 기준이 발표되었다. $PM_{2.5}$ 기준이 시행되면서 환경부에서는 국가 기준을 수립하고 $PM_{2.5}$ 모니터링 방식을 개발했으며 $PM_{2.5}$ 질량 측정망, $PM_{2.5}$ 화학성분 조성 측정망, 권역별 대기환경연구소(구 대기오염집중측정소)를 구축했다.

2016년 발표된 6.23 대책에서는 $PM_{2.5}$ 배출 저감 목표를 13%로 설정하였다. 이 대책이 9.26 미세먼지 관리 종합대책으로 대체되면서 $PM_{2.5}$ 배출 저감 목표를 더 높은 30%로 설정하였다. 계속해서 높아지는 대중의 우려와 $PM_{2.5}$ 배출 저감의 효과에 대한 기대를 반영하여, 9.26 대책은 2018년 연평균 $PM_{2.5}$ 기준을 25μg/m^{3}에서 15μg/m^{3}로, 24시간 평균 $PM_{2.5}$ 기준을 50μg/m^{3}에서 35μg/m^{3}로 강화하였다.

$PM_{2.5}$ 정책 수립 및 시행이 구체화되면서, 미세먼지 문제 해결을 가속화하기 위해 2019년 미세먼지 계절관리제(이하 계절관리제)가 수립 및 시행되었다. 12월부터 3월까지는 주거용 난방으로 인해 동북아시아 지역의 $PM_{2.5}$ 및 전구물질 배출량이 증가하고 중국발 $PM_{2.5}$ 및 전구물질 이동이 다른 계절에 비해 더 빈번히 발생한다. 이런 지역적인 영향과 더불어, 국지적 대기 정체 현상과 낮은 지표면 온도로 인해 복사역전이 더 자주 발생한다. 2018년 이 시기의 $PM_{2.5}$ 농도는 연평균에 비해 15~30% 높으며 수도권 $PM_{2.5}$ 경보 19건 중 18건이 이 시기에 발생했다.

계절관리제는 석탄 발전소 설비 가동률 제한, 노후된 석탄 발전소 가동 중단, 서울 시내 노후 디젤 차량 금지, 대형 사업장의 자발적 감축 협약, 드론 등 첨단 감시 장비를 이용한 불법 배출 감시, 항만 배출 저감을 위한 저유황유 사용 의무화, 노후 건설 장비 관련 규정을 통해 $PM_{2.5}$ 배출을 추가적으로 20% 저감했다.

계절관리제 시행 첫 해인 2020년 미세먼지 시즌 동안 $PM_{2.5}$ 농도의 전국 평균은 27% 개선되었으며 50μg/m^{3}를 초과하는 일수가 전년 대비 18일에서 2일로 감소했다. 모델링 분석 결과 이러한 개선의 원인은 미세먼지 계절관리제뿐 아니라 동풍이 지배적이었던 기상조건, 풍상 지역에서 COVID-19으로 인한 배출 활동의 감소의 영향을 받은 것으로 분석되었다.

$PM_{2.5}$ 저감을 위한 이러한 모든 노력은 2016년 KORUS-AQ 캠페인 이후에 이루어졌기 때문에

이를 평가하고 기상조건이 한국의 미세먼지 오염의 변화 관측 결과에 미치는 영향의 특성을 파악하려면 추가적인 연구가 필요하다.

7.2. KORUS-AQ 연구 결과의 정책 적용

다음 내용은 KORUS-AQ 연구 결과를 요약한 것이다. 자세한 내용은 각 주제에 해당하는 장에서 확인할 수 있다. 본 제언은 $PM_{2.5}$ 및 오존 오염을 개선하기 위한 국지(내)적인 조치에 중점을 두고 있다. 국지적 배출량을 확실히 줄이기 위해선 그 지역의 협력을 통한 노력이 필요하다.

1) $PM_{2.5}$ 및 오존 오염을 개선하려면 NO_x와 VOCs을 동시에 저감해야하며, 특히 고분자(C_7 이상) 방향족 화합물의 양을 줄여야 한다.

KORUS-AQ 결과 분석을 통해 NO_x와 VOCs가 $PM_{2.5}$ 및 오존 농도 상승에 큰 역할을 하지만 그 효과가 나타나는 방식은 다양하다는 사실이 드러났다.

$PM_{2.5}$의 경우, 성분이 기상조건에 따라 유기물질 중심에서 무기물질 중심으로 바뀌는 것으로 관측되었다. 하늘이 맑고 일사량이 높아 국지적인 VOC 배출의 광화학 작용이 활발히 일어나는 정체기간에는 유기 미세먼지가 $PM_{2.5}$ 성분의 상당 부분을 차지한다. 반대로, 월경성 오염의 영향 증거를 보이는 이동/연무 조건에서는 습도가 높을 때 국지적 배출가스의 가스-입자 비균질 작용이 활발해져 무기 미세먼지 성분이 지배적이다. 국지적 NO_x 배출로 인해 발생하는 질산염 미세먼지 때문에 미세먼지 수분량이 증가하여 미세먼지가 더욱 많이 생성된다.

오존의 경우, NO_x와 VOC 배출은 복잡한 방식으로 함께 작용하는데, VOC 배출이 오존 생성 양에 영향을 크게 미치며, NO_x는 오존 생성의 광역적 범위에 큰 영향을 준다. NO_x의 양이 충분한 조건일 때, 서울의 오존 생성량은 만약 VOC의 양만 감소할 경우, 오존 생성량은 감소한다. 하지만 한반도 규모의 오존 생성량 저감을 위해서는 NO_x 저감이 필요하다. 서울에서는 NO_x의 과도한 양으로 인해 오존 형성의 촉매 화학작용이 억제되기 때문에 초기에는 NO_x 저감이 VOC 저감 영향을 상쇄하고 단기적으로 도시 지역의 오존량이 증가한다. 거기에 더해 NO_x 배출이 감소함에 따라 화학 작용이 더욱 활발히 일어나 NO_x 수명이 단축됨으로써 대기 중 농도가 배출량보다 더 빠른 속도로 감소된다.

관측 제약 모델링에 의해 C_7 이상의 방향족 화합물(톨루엔, 자일렌 등)의 중요성이 확인되었다. 이러한 VOCs에 속하는 화합물이 유기 미세먼지와 오존 생성의 3분의 1을 차지하는 것으로 나타났다.

NO_x 및 VOCs가 저감되면 $PM_{2.5}$ 수치가 즉각적으로 개선되지만 오존에는 NO_x와 VOCs 저감 간 비율이 중요하다. NO_x가 VOCs보다 빠른 속도로 감소하면 특히 도시 지역의 오존이 증가할 가능성이 높다. 이러한 제약이 있기 때문에 지속적인 저감이 장기적으로 성공할 것이라는 인내와 확신을 가져야 한다.

2) 현재 배출량에 대한 개선된 추정치는 배출량에 대한 더 많은 정보를 추가로 제공하지만, 효과적인 저감 전략을 수립하기 위해서는 특정 고분자(C_7 이상) 방향족 화합물의 배출원을 파악하는 것이 매우 필요하다.

미세먼지 관리 종합계획 배출량이 정확히 파악된 상태에서만 효과를 발휘할 수 있다. KORUS-AQ 연구의 중요한 성과는 배출 인벤토리의 개선이다.

위성 관측 및 모델을 사용한 하향식 평가를 통해 NO_x 배출량이 과소평가되었다는 사실이 처음으로 드러났다. 따라서 이후 정확성이 향상된 PEMS(Portable Emissions Measuring System)의 배출계수를 기반으로 한 상향식 평가 결과, 도로의 자동차 배출량이 높아졌다. 이를 통해 현재 NO_x 관리 전략으로 달성할 수 있는 결과를 정확히 파악할 수 있다.

VOCs의 경우, 배출원 프로파일이 개선된 결과, 반응성이 높은 VOCs의 질량이 높아지고 모델이 관측과 비교했을 때 방향족 화합물을 더욱 정확하게 재현하게 되었다. 하지만 이러한 화합물의 배출원은 광범위하게 분산되어 있으며 세부정보 파악이 어렵다. 관측기반 배출원 할당 분석 결과, 용제 사용이 서울의 높은 방향족 화합물 수치의 주요 원인이 되며, 그 중 톨루엔은 비도료 용제에서, 자일렌은 도료 용제에서 주로 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 이 두 물질이 결합하면 다양한 물질이 발생할 수 있다. 저감이 필요한 특정 물질에 대한 파악이 필요하다.

3) 산업 시설 점 오염원에서 배출되는 VOC 양이 크게 과소평가되기 때문에 철저한 검토와 검증이 필요하다.

KORUS-AQ에서는 한국의 북서쪽 해안을 따라 분포되어 있는 점 오염원에 대해 배출가스를 수차례 채취/분석했다. NO_x 및 SO_2 배출의 하향식 분석 결과는 CEMS(Continuous Emissions Monitoring System) 관측 결과를 바탕으로 한 CAPSS 배출량과 대부분 일치했다. 반대로, 대산 화학 단지 관측 결과를 수차례에 걸쳐 하향식으로 분석한 결과 VOC 배출량이 약 2.5 - 4분의 1로 과소평가된다는 사실이 드러났다. 다양한 HAPs(Hazardous Air Pollutants)와 산화 생성물을 포함하는 화학물질 혼합물은 구조가 복잡하기 때문에 배출량이 과소평가되면 근로자와 지역 주민에 대한 위험이 가중된다. VOC 배출량은 NO_x와 SO_2 배출량과 차이가 크다. 이러한 현상은 저장 탱크, 단지 전체와 근처의 선적항을 오가는 수송관, 석유 생산

및 취급, 연소 및 플레어링 작업 등 다양한 시설 구성요소 및 활동으로 인한 누출로 발생한다. 따라서 근처에 위치한 태안반도에 최근 서산 대기오염 측정소가 설립된 것은 바람직하다고 볼 수 있다. 하지만 대산 단지에서 발생하는 오차로 인해 한국의 다른 시설에서도 그 정도의 유사한 과소평가가 존재하는지 의문을 가지게 된다. 점 오염원의 하향식 항공 조사가 이러한 과소평가의 범위를 파악하는 가장 효율적인 방법이 될 수 있다.

4) 정책 의사결정을 지원하기 위하여 불확도의 이해와 최고의 설명을 얻기 위해 대기질 모델 시뮬레이션에 모델 계층구조를 적용해야 한다.

KORUS-AQ는 연구의 기획, 실행, 조사 과정을 지원할 다양한 대기질 모델링 팀을 구성했다. 이러한 팀에서는 오존 및 PM 형성 처리 시 다양한 해상도와 복잡성으로 지역적-국제적 영역을 아우르는 여러 모델의 계층 구조를 사용했다. 모델은 배출 측정치를 평가하고 관측 결과와 비교할 수 있도록 배출 인벤토리를 대기 중 농도로 변환하여 제공하는 등의 중요한 역할을 한다. 각자 장·단점이 다른 여러 모델의 평균은 일반적으로 개별 모델보다 관측 결과와의 일치율이 높다. 따라서 대기질에 영향을 미치는 요소를 파악하고 정량적 평가의 불확실성을 파악하는 데 여러 모델을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다. 배출량 관리에 대한 정책을 지원하고 대기질 예보를 개선하기 위해서는 지속적인 모델 개발을 통해 오존 및 2차 미세먼지 형성 시뮬레이션의 정확성을 높여야 한다.

7.3. 향후 계획

7.3.1 모니터링

광역적인 에어코리아 모니터링 네트워크와 시간단위로 획득되는 GEMS 및 GOCI-II의 결합을 통해, 한국은 지금까지 가져보지 못했던 한국과 아시아 전역의 영향을 평가할 수 있는 연속모니터링 자료를 획득할 수 있을 것이다. 이러한 정보는 예보 개선, 하향식 배출 추정치, 배출량 제어 평가, 대기질에 영향을 미치는 요인에 대한 본질적인 이해를 도울 것이다. 그럼에도 불구하고, 모니터링 관측 결과에서 수집한 정보의 해석에 도움이 될 추가적인 투자가 몇 가지 있다.

국지(국내)적 영향과 월경성 영향의 비교 분석이 지속적으로 필요하기 때문에 CO 및 CO_2의 고해상도 측정이 필요하다. 이를 통해 한국과 중국의 연소 효율성의 큰 차이에 근거한 월경성 영향의 강도에 관한 지속적인 정보를 얻을 수 있다. 에어로졸 화학조성에 대한 연구 수준의 연속모니터링은 국지적인 2차 미세먼지 생성률 변화를 더욱 정확하게 파악하는 데 필요한 정보를 제공할 것이다. 습도가 높은 상태와

건조 상태의 미세먼지를 규칙적으로 관측하면 미세먼지 안의 수분량을 계산하여 연무를 발생시키는 종합적인 화학 및 기상 작용에 대한 이해를 증진할 수 있다. 마지막으로, 고해상도 암모니아 측정은 무기 에어로졸 생성, 미세먼지 산도, 반응경로 분석 평가에 존재하던 모델의 제한점을 해결할 것이다. 이러한 측정들이 서울의 한 지역에서 이루어졌다면, $PM_{2.5}$ 발생 요인 이해와 관련한 KORUS-AQ 결과물들을 이용하여 그 사이의 연관성에 대한 연구를 더 확장시킬 수 있었을 것이다. 마지막으로, $PM_{2.5}$의 혼합층 움직임을 파악하기 위해, 기존에 운영되고 있는 운고계 네트워크 실시간 혼합고 자료를 개선 시켜 지표 근처의 오염물질 혼합 및 환기의 연속적인 일별 주기에 관한 정보를 제공해야 할 것이다.

7.3.2 배출 목록

상향식 배출은 대기질 관리 정책에 있어 중요한 역할을 수행한다. 한국에서는 지난 20년간 상향식 배출량을 파악하고 정리하기 위해 많은 노력을 기울였다. KORUS-AQ 분석에서는 모델링 결과를 현장 측정 결과와 비교하고 주로 대기질 모델링을 위한 배출 인벤토리(KORUS 배출)를 작성하여 CAPSS, 한국의 상향식 배출량, 중국의 배출량에 대해 면밀히 검토하였다.

개발과 목표 간의 차이로 인해 KORUS 배출량을 CAPSS에 직접 비교할 수는 없을 것이다. 여러 대기질 모델링 결과 간의 차이는 모델링 용도뿐만 아니라 KORUS-AQ 배출량의 검증을 저해한다. 하지만, KORUS 배출량 개발을 가능케 한 CAPSS 배출량에 대한 평가는 CAPSS의 향후 개선 방향을 알게 해주었다는데 의미가 있다. 이것은 하향 방식을 통해 이동 오염원 NO_x 및 점 오염원 VOC 배출량 감소가 과소되었음을 짐작하게 해준다. 관리 정책 추진을 통해 배출량이 지속적으로 변화하고, GEMS 관측이 지속적으로 이루어진다면, 하향식 평가가 상향식 평가를 검증 하는데 중요한 역할을 할 것이다.

7.3.3 모델링

한국의 오존 및 PM 오염 연구에는 다양한 첨단 대기질 모델(WRF-Chem, CMAQ, CAMx, GEOS-Chem)이 사용되고 있으며 추가적인 개발과 평가를 위한 지원이 계속되어야 한다. 대기질 예보를 개선하려면 화학 작용에 대한 향상된 과학적 이해와 서울과 전국에 영향을 주는 복잡한 기상조건을 기반으로 한 지속적인 모델 개선이 필요하다. KORUS-AQ 기간 동안 인벤토리를 작성하는 팀과 모델 간의 지속적이고 긴밀한 협업이 이루어졌으며, 이를 통해 향후 배출량과 모델이 개선될 수 있을 것으로 기대된다. 대기질 예보의 신뢰도가 높아지면 대기질 예보에 따른 교통 통제 등의 실시간 정책 조치를 고려할 수 있을 것이다.

7.3.4 US-KOREA 협력의 다음 단계

2018년 12월, NIER와 NASA는 “오염 연구, 교정, 검증에 대한 협력”에 관련한 양해 각서를 체결했다. 그 이후로 2020년 2월 GEMS가 발사되었으며 2022년 발사될 TEMPO로 인해 더 개선된 대기질 위성 관측 결과를 산출할 수 있을 것이다.

이 협약은 대기질 예보를 위한 정보를 제공하고, 이해를 증진하며, 의사 결정에 가치를 더하기 위해 GEMS와 TEMPO 관측 결과의 교정 및 검증, 그리고 더욱 중요하게는 이러한 위성으로부터 수집한 정보의 해석에 있어 한국과 미국 간 지속적인 협력을 약속하는 협약이다.

또한 PAN(Pandora Asia Network)이 구축되면서 PGN(Pandora Global Network) 멤버십을 통해 아시아 전역 및 전 세계로 협력을 확대하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 노력은 과학계의 협력을 도모하며, KOICA와 UNESCAP(United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific)의 후원을 통해 PAN은 아시아 전역의 대기질에 미치는 국지적 및 공동의 영향에 대한 논의에 대한 의사 결정권자의 참여를 유도한다.

이미 진행 중인 GEMS 검증을 위한 GCAS 계측기 비행의 현재 계획과 함께 지속적인 현장 연구가 필요하다. 가까운 장래에 계획된 기타 프로젝트로는 ACCLIP(Asian Summer Monsoon Chemical & CLimate Impact Project), GMAP(GEMS MAP of Air Pollution), SIJAQ(Satellite Integrated Joint Monitoring of Air Quality)가 있다. 더 장기적으로는, 한국과 미국의 과학자들이 현장 연구 협력을 위한 지속적인 탐구과 논의를 통해 각 국가의 목표를 달성하기 위해 노력하면서 배출량 및 그로 인한 대기질 변화의 추이를 분석할 예정이다.

References

Bachmann, J. (2007). Will the circle be unbroken: a history of the U.S. National Ambient Air Quality Standards. *Journal of the Air & Waste Management Association* , *57*(6), 652–697. https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.6.652

Beirle, S., Borger, C., Dörner, S., Li, A., Hu, Z., Liu, F., Wang, Y., & Wagner, T. (2019). Pinpointing nitrogen oxide emissions from space. *Science Advances*, *5*(11), eaax9800. https://doi.org/10.1126/sciadv.aax9800

Carter, W. P. L. (2000). Documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment. *Report to the California Air Resources Board*. http://www.cert.ucr.edu/~carter/absts.htm#saprc99

Chang, C.-Y., Faust, E., Hou, X., Lee, P., Kim, H. C., Hedquist, B. C., & Liao, K.-J. (2016). Investigating ambient ozone formation regimes in neighboring cities of shale plays in the Northeast United States using photochemical modeling and satellite retrievals. *Atmospheric Environment*, *142*, 152–170. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.058

Cho, C., S. Jeong, J. Liao, G.M. Wolfe, J.M. St. Clair, D. il Kang, J. Choi, M.-H. Shin, J. Park, T.F. Hanisco, and K.-E. Min. (2020). Volatile organic compounds (VOCs) emission rates estimation using airborne in-situ formaldehyde (HCHO) observation from a petrochemical complex in Korea, in preparation.

Choi, Y., Kim, H., Tong, D., & Lee, P. (2012). Summertime weekly cycles of observed and modeled NO_x and O_3 concentrations as a function of satellite-derived ozone production sensitivity and land use types over the Continental United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *12*(14), 6291–6307. https://doi.org/10.5194/acp-12-6291-2012

Choi, J., Park, R. J., Lee, H.-M., Lee, S., Jo, D. S., Jeong, J. I., Henze, D. K., Woo, J.-H., Ban, S.-J., Lee, M.-D., Lim, C.-S., Park, M.-K., Shin, H. J., Cho, S., Peterson, D., & Song, C.-K. (2019). Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on PM2.5 exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign. *Atmospheric Environment*, *203*, 196–205. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.008

Choi, M., Lim, H., Kim, J., Lee, S., Eck, T. F., Holben, B. N., Garay, M. J., Hyer, E. J., Saide, P. E., & Liu, H. (2019). Validation, comparison, and integration of GOCI, AHI, MODIS, MISR, and VIIRS aerosol optical depth over East Asia during the 2016 KORUS-AQ campaign. *Atmospheric Measurement Techniques*, *12*(8), 4619–4641. https://doi.org/10.5194/amt-12-4619-2019

Chong, H., Lee, S., Kim, J., Jeong, U., Li, C., Krotkov, N. A., Nowlan, C. R., Al-Saadi, J. A., Janz, S. J., Kowalewski, M. G., Ahn, M.-H., Kang, M., Joiner, J., Haffner, D. P., Hu, L., Castellanos, P., Huey, L. G., Choi, M., Song, C. H., … Koo, J.-H. (2020). High-resolution mapping of SO2 using airborne observations from the GeoTASO instrument during the KORUS-AQ field study: PCA-based vertical column retrievals. *Remote Sensing of Environment*, *241*, 111725. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111725

Duncan, B. N., Yoshida, Y., Olson, J. R., Sillman, S., Martin, R. V., Lamsal, L., Hu, Y., Pickering, K. E., Retscher, C., Allen, D. J., & Crawford, J. H. (2010). Application of OMI observations to a space-based indicator of NO_x and VOC controls on surface ozone formation. *Atmospheric Environment*, *44*(18), 2213–2223. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.010

Eck, T. F., Holben, B. N., Kim, J., Beyersdorf, A. J., Choi, M., Lee, S., Koo, J.-H., Giles, D. M., Schafer, J. S., Sinyuk, A., Peterson, D. A., Reid, J. S., Arola, A., Slutsker, I., Smirnov, A., Sorokin, M., Kraft, J., Crawford, J. H., Anderson, B. E., … Park, S. (2020). Influence of cloud, fog, and high relative humidity during pollution transport events in South Korea: Aerosol properties and PM2.5 variability. *Atmospheric Environment*, *232*, 117530. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117530

Fried, A., et al. (2020). Airborne Formaldehyde and VOC Measurements over the Daesan Petrochemical Complex on Korea's Northwest Coast During the KORUS-AQ Study: Estimation of Emission Fluxes and Effects on Air Quality. Elem. Sci. Anth. 8(1), 121. https://doi.org/10.1525/elementa.2020.121

Gaubert, B., Emmons, L. K., Raeder, K., Tilmes, S., Miyazaki, K., Arellano, A. F., Jr., Elguindi, N., Granier, C., Tang, W., Barré, J., Worden, H. M., Buchholz, R. R., Edwards, D. P., Franke, P., Anderson, J. L., Saunois, M., Schroeder, J., Woo, J.-H., Simpson, I. J., … Ren, X. (2020). Correcting model biases of CO in East Asia: impact on oxidant distributions during KORUS-AQ. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions: ACPD*. https://doi.org/10.5194/acp-2020-599

Gil, J., Kim, J., Lee, M., Lee, G., Lee, D., Jung, J., An, J., Hong, J., Cho, S., Lee, J., and Long, R. (2021).

The role of HONO in O3 formation and insight into its formation mechanism during the KORUS-AQ Campaign. Atmos. Env. 247. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118182

Goldberg, D. L., Lu, Z., Streets, D. G., de Foy, B., Griffin, D., McLinden, C. A., Lamsal, L. N., Krotkov, N. A., & Eskes, H. (2019). Enhanced Capabilities of TROPOMI NO2: Estimating NOx from North American Cities and Power Plants. *Environmental Science & Technology*, *53*(21), 12594–12601. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04488

Guo, H., Wang, T., Blake, D. R., Simpson, I. J., Kwok, Y. H., & Li, Y. S. (2006). Regional and local contributions to ambient non-methane volatile organic compounds at a polluted rural/coastal site in Pearl River Delta, China. *Atmospheric Environment*, *40*(13), 2345–2359. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.011

Gupta, P., Levy, R. C., Mattoo, S., Remer, L. A., Holz, R. E., & Heidinger, A. K. (2019). Applying the Dark Target aerosol algorithm with Advanced Himawari Imager observations during the KORUS-AQ field campaign. *Atmospheric Measurement Techniques*, *12*(12), 6557–6577. https://doi.org/10.5194/amt-12-6557-2019

Halliday, H. S., DiGangi, J. P., Choi, Y., Diskin, G. S., Pusede, S. E., Rana, M., Nowak, J. B., Knote, C., Ren, X., He, H., Dickerson, R. R., & Li, Z. (2019). Using Short-Term CO/CO_2 Ratios to Assess Air Mass Differences Over the Korean Peninsula During KORUS-AQ. *Journal of Geophysical Research, D: Atmospheres*, *124*(20), 10951–10972. https://doi.org/10.1029/2018JD029697

Jang, Y., Lee, Y., Kim, J., Kim, Y., & Woo, J.-H. (2019). Improvement China Point Source for Improving Bottom-Up Emission Inventory. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, *56*(1), 107–118. https://doi.org/10.1007/s13143-019-00115-y

Jin, X., & Holloway, T. (2015). Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the Ozone Monitoring Instrument. *Journal of Geophysical Research, D: Atmospheres*, *120*(14), 7229–7246. https://doi.org/10.1002/2015JD023250

Jordan, C., Crawford, J. H., Beyersdorf, A. J., Eck, T. F., Halliday, H. S., Nault, B. A., Chang, L.-S., Park, J., Park, R., Lee, G., Kim, H., Ahn, J.-Y., Cho, S., Shin, H. J., Lee, J. H., Jung, J., Kim, D.-S., Lee, M., Lee, T., … Schwarz, J. P. (2020). Investigation of factors controlling $PM_{2.5}$ variability across the South Korean

Peninsula during KORUS-AQ. *Elem Sci Anth*, *8*(1), 28. https://doi.org/10.1525/elementa.424

Judd, L., Al-Saadi, J., Valin, L., Pierce, R. B., Yang, K., Janz, S., Kowalewski, M., Szykman, J., Tiefengraber, M., & Mueller, M. (2018). The Dawn of Geostationary Air Quality Monitoring: Case Studies from Seoul and Los Angeles. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, *6*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00085

Kim, H., Choi, W.-C., Rhee, H.-J., Suh, I., Lee, M., Blake, D. R., Kim, S., Jung, J., Lee, G., Kim, D.-S., Park, S.-M., Ahn, J., & Lee, S. D. (2018). Meteorological and Chemical Factors Controlling Ozone Formation in Seoul during MAPS-Seoul 2015. *Aerosol and Air Quality Research*, *18*(9), 2274–2286. https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0445

Kim, H., Zhang, Q., & Heo, J. (2018). Influence of intense secondary aerosol formation and long-range transport on aerosol chemistry and properties in the Seoul Metropolitan Area during spring time: results from KORUS-AQ. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(10), 7149–7168. https://doi.org/10.5194/acp-18-7149-2018

Kim, H., Gil, J., Lee, M., Jung, J., Whitehill, A., Szykman, J., Lee, G., Kim, D.-S., Cho, S., Ahn, J.-Y., Hong, J., & Park, M.-S. (2020). Factors controlling surface ozone in the Seoul Metropolitan Area during the KORUS-AQ campaign. *Elem Sci Anth*, *8*(1), 46. https://doi.org/10.1525/elementa.444

Kim, J., Jeong, U., Ahn, M.-H., Kim, J. H., Park, R. J., Lee, H., Song, C. H., Choi, Y.-S., Lee, K.-H., Yoo, J.-M., Jeong, M.-J., Park, S. K., Lee, K.-M., Song, C.-K., Kim, S.-W., Kim, Y. J., Kim, S.-W., Kim, M., Go, S., … Choi, Y. (2020). New Era of Air Quality Monitoring from Space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS). *Bulletin of the American Meteorological Society*, *101*(1), E1–E22. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0013.1

Kim, S., Jeong, D., Sanchez, D., Wang, M., Seco, R., Blake, D., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S., Jung, J., Kim, D., Lee, G., Lee, M., Ahn, J., Lee, S.-D., Cho, G., Sung, M.-Y., Lee, Y.-H., & Park, R. (2018). The Controlling Factors of Photochemical Ozone Production in Seoul, South Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, *18*(9), 2253–2261. https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0452

Kim, Y. P., & Lee, G. (2018). Trend of Air Quality in Seoul: Policy and Science. *Aerosol and Air Quality Research*, *18*(9), 2141–2156. https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0081

Kim, J., Al-Saadi, J., et al. Remote Sensing of air quality around Korea during the KORUS-AQ, in preparation.

Koo et al., Comparison of HCHO/NO_2 from the multiple observations during the KORUS-AQ, in preparation.

Kwon, H.-A., R.J. Park, Y. Oak, C.R. Nowlan, S.J. Janz, M.G. Kowalewski, A. Fried, J. Walega, K. Bates, J. Choi, D.R. Blake, and A. Wisthaler. (2021). Top-down estimates of anthropogenic emissions in South Korea using formaldehyde vertical column densities from aircraft platforms during the KORUS-AQ campaign. Elem. Sci. Anth. 9(1), 00109. https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00109

Lamb, K. D., Perring, A. E., Samset, B., Peterson, D., Davis, S., Anderson, B. E., Beyersdorf, A., Blake, D. R., Campuzano-Jost, P., Corr, C. A., Diskin, G. S., Kondo, Y., Moteki, N., Nault, B. A., Oh, J., Park, M., Pusede, S. E., Simpson, I. J., Thornhill, K. L., … Schwarz, J. P. (2018). Estimating Source Region Influences on Black Carbon Abundance, Microphysics, and Radiative Effect Observed Over South Korea. *Journal of Geophysical Research, D: Atmospheres*, *123*(23), 295. https://doi.org/10.1029/2018JD029257

Lee, S., Kim, J., Choi, M., Hong, J., Lim, H., Eck, T. F., Holben, B. N., Ahn, J.-Y., Kim, J., & Koo, J.-H. (2019). Analysis of long-range transboundary transport (LRTT) effect on Korean aerosol pollution during the KORUS-AQ campaign. *Atmospheric Environment*, *204*, 53–67. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.020

Lennartson, E. M., Wang, J., Gu, J., Castro Garcia, L., Ge, C., Gao, M., Choi, M., Saide, P. E., Carmichael, G. R., Kim, J., & Janz, S. J. (2018). Diurnal variation of aerosol optical depth and $PM_{2.5}$ in South Korea: a synthesis from AERONET, satellite (GOCI), KORUS-AQ observation, and the WRF-Chem model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(20), 15125–15144. https://doi.org/10.5194/acp-18-15125-2018

Lim, H., Choi, M., Kim, J., Kasai, Y., & Chan, P. W. (2018). AHI/Himawari-8 Yonsei Aerosol Retrieval (YAER): Algorithm, Validation and Merged Products. *Remote Sensing*, *10*(5), 699. https://doi.org/10.3390/rs10050699

Lim, H., Go, S., Kim, J., Choi, M., Lee, S., Song, C.-K., & Kasai, Y. (2020). Integration of GOCI and AHI Yonsei Aerosol Optical Depth Products During the 2016 KORUS-AQ and 2018 EMeRGe Campaigns. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1–32. https://doi.org/10.5194/amt-2020-336

Lyu, X. P., Zeng, L. W., Guo, H., Simpson, I. J., Ling, Z. H., Wang, Y., Murray, F., Louie, P. K. K., Saunders, S. M., Lam, S. H. M., & Blake, D. R. (2017). Evaluation of the effectiveness of air pollution control measures in Hong Kong. *Environmental Pollution* , *220*(Pt A), 87–94. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.025

Martin, R. V., Fiore, A. M., & Van Donkelaar, A. (2004). Space-based diagnosis of surface ozone sensitivity to anthropogenic emissions. *Geophysical Research Letters*, *31*(6). https://doi.org/10.1029/2004GL019416

Miyazaki, K., Sekiya, T., Fu, D., Bowman, K. W., Kulawik, S. S., Sudo, K., Walker, T., Kanaya, Y., Takigawa, M., Ogochi, K., Eskes, H., Boersma, K. F., Thompson, A. M., Gaubert, B., Barre, J., & Emmons, L. K. (2019). Balance of Emission and Dynamical Controls on Ozone During the Korea-United States Air Quality Campaign From Multiconstituent Satellite Data Assimilation. *Journal of Geophysical Research, D: Atmospheres*, *124*(1), 387–413. https://doi.org/10.1029/2018JD028912

Nault, B. A., Campuzano-Jost, P., Day, D. A., Schroder, J. C., Anderson, B., Beyersdorf, A. J., Blake, D. R., Brune, W. H., Choi, Y., Corr, C. A., de Gouw, J. A., Dibb, J., DiGangi, J. P., Diskin, G. S., Fried, A., Huey, L. G., Kim, M. J., Knote, C. J., Lamb, K. D., … Jimenez, J. L. (2018). Secondary organic aerosol production from local emissions dominates the organic aerosol budget over Seoul, South Korea, during KORUS-AQ. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(24), 17769–17800. https://doi.org/10.5194/acp-18-17769-2018

NIER & NASA. (2017). *KORUS-AQ Rapid Science Synthesis Report*. https://espo.nasa.gov/sites/default/files/documents/KORUS-AQ-ENG.pdf https://espo.nasa.gov/sites/default/files/documents/KORUS-AQ-RSSR.pdf

Oak, Y. J., Park, R. J., Schroeder, J. R., Crawford, J. H., Blake, D. R., Weinheimer, A. J., Woo, J.-H., Kim, S.-W., Yeo, H., Fried, A., Wisthaler, A., & Brune, W. H. (2019). Evaluation of simulated O_3 production efficiency during the KORUS-AQ campaign: Implications for anthropogenic NO_x emissions in Korea. *Elementa Science of the Anthropocene*, *7*(1), 56. https://doi.org/10.1525/elementa.394

Pang, J., Liu, Z., Wang, X., Bresch, J., Ban, J., Chen, D., & Kim, J. (2018). Assimilating AOD retrievals from GOCI and VIIRS to forecast surface PM2.5 episodes over Eastern China. *Atmospheric Environment*, *179*, 288–304. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.02.011

Park M., Y. Kim, A. Fried, I. J. Simpson, H. Jin, A. Weinheimer, G. Huey, J. Crawford, H. Hu, and J. -H. Woo. (2020). Evaluating South Korean large point source emissions using a NASA KORUS-AQ aircraft field campaign. *Elementa*, *submitted*.

Park, R.J., Oak, Y.J., Emmons, L.K., Kim, C.-H., Pfister, G.G., Carmichael, G.R., Saide, P.E., Cho, S.-Y., Kim, S., Woo, J.-H., Crawford, J.H., Gaubert, B., Lee, H.-J., Park, S.-Y., Jo, Y.-J., Gao, M., Tang, B., Stanier, C.O., Shin, S.S., Park, H.Y., Bae, C., Kim, E. (2021). Multi-model inter-comparisons of air quality simulations for the KORUS-AQ campaign. Elem. Sci. Anth. 9(1), 00139. https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00139

Park, S., Lee, J., Im, J., Song, C.-K., Choi, M., Kim, J., Lee, S., Park, R., Kim, S.-M., Yoon, J., Lee, D.-W., & Quackenbush, L. J. (2020). Estimation of spatially continuous daytime particulate matter concentrations under all sky conditions through the synergistic use of satellite-based AOD and numerical models. *The Science of the Total Environment*, *713*, 136516. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136516

Park, Taehyun, Jihee Ban, Gyutae Park, Seokwon Kang, Kyunghoon Kim, Beom-Keun Seo, Jongho Kim, Soobog Park, Taehyoung Lee. (2020). The physico-chemical evolution of atmospheric aerosols and the gas-particle partitioning of inorganic aerosol during KORUS-AQ. *Atmospheric Environment, in preparation*.

Peterson, D. A., Hyer, E. J., Han, S.-O., Crawford, J. H., Park, R. J., Holz, R., Kuehn, R. E., Eloranta, E., Knote, C., Jordan, C. E., & Lefer, B. L. (2019). Meteorology influencing springtime air quality, pollution transport, and visibility in Korea. *Elementa Sci Anth*, *7*(1), 57. https://doi.org/10.1525/elementa.395

Saide, P. E., Kim, J., Song, C. H., Choi, M., Cheng, Y., & Carmichael, G. R. (2014). Assimilation of next generation geostationary aerosol optical depth retrievals to improve air quality simulations: Geostationary AOD improves simulations. *Geophysical Research Letters*, *41*(24), 9188–9196. https://doi.org/10.1002/2014GL062089

Saide, P. E., Gao, M., Lu, Z., Goldberg, D. L., Streets, D. G., Woo, J.-H., Beyersdorf, A., Corr, C. A., Thornhill, K. L., Anderson, B., Hair, J. W., Nehrir, A. R., Diskin, G. S., Jimenez, J. L., Nault, B. A., Campuzano-Jost, P., Dibb, J., Heim, E., Lamb, K. D., … Crawford, J. H. (2020). Understanding and improving model representation of aerosol optical properties for a Chinese haze event measured during KORUS-AQ. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(11), 6455–6478. https://doi.org/10.5194/acp-20-6455-2020

Schroeder, J. R., Crawford, J. H., Fried, A., Walega, J., Weinheimer, A., Wisthaler, A., Müller, M., Mikoviny, T., Chen, G., Shook, M., Blake, D. R., & Tonnesen, G. S. (2017). New insights into the column CH_2O/NO_2 ratio as an indicator of near-surface ozone sensitivity. *Journal of Geophysical Research, D: Atmospheres*, *122*(16), 8885–8907. https://doi.org/10.1002/2017JD026781

Schroeder, J. R., Crawford, J. H., Ahn, J.-Y., Chang, L., Fried, A., Walega, J., Weinheimer, A., Montzka, D. D., Hall, S. R., Ullmann, K., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Chen, G., Blake, D. R., Blake, N. J., Hughes, S. C., Meinardi, S., Diskin, G., Digangi, J. P., … Wennberg, P. (2020). Observation-based modeling of ozone chemistry in the Seoul metropolitan area during the Korea-United States Air Quality Study (KORUS-AQ). *Elementa Science of the Anthropocene*, *8*(1), 3. https://doi.org/10.1525/elementa.400

Simpson, I. J., Blake, D. R., Blake, N. J., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S. C., Fleming, L. T., Crawford, J. H., Diskin, G. S., Emmons, L. K., Fried, A., Guo, H., Peterson, D. A., Wisthaler, A., Woo, J.-H., Barré, J., Gaubert, B., Kim, J., Kim, M. J., … Zeng, L. (2020). Characterization, sources and reactivity of volatile organic compounds (VOCs) in Seoul and surrounding regions during KORUS-AQ. *Elem Sci Anth*, *8*(1), 37. https://doi.org/10.1525/elementa.434

Spinei, E., Whitehill, A., Fried, A., Tiefengraber, M., Knepp, T. N., Herndon, S., Herman, J. R., Müller, M., Abuhassan, N., Cede, A., Richter, D., Walega, J., Crawford, J., Szykman, J., Valin, L., Williams, D. J., Long, R., Swap, R. J., Lee, Y., … Poche, B. (2018). The first evaluation of formaldehyde column observations by improved Pandora spectrometers during the KORUS-AQ field study. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*(9), 4943–4961. https://doi.org/10.5194/amt-11-4943-2018

Spinei, E., Tiefengraber, M., Müller, M., Gebetsberger, M., Cede, A., Valin, L., Szykman, J., Whitehill, A., Kotsakis, A., Santos, F., Abbuhasan, N., Zhao, X., Fioletov, V., Lee, S. C., & Swap, R. (2020). Effect of Polyoxymethylene (POM-H Delrin) offgassing within Pandora head sensor on direct sun and multi-axis formaldehyde column measurements in 2016–2019. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1–24. https://doi.org/10.5194/amt-2020-158

Streets, D. G., Bond, T. C., Carmichael, G. R., Fernandes, S. D., Fu, Q., He, D., Klimont, Z., Nelson, S. M., Tsai, N. Y., Wang, M. Q., Woo, J.-H., & Yarber, K. F. (2003). An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *Journal of Geophysical Research*, *108*(D21), 213. https://doi.org/10.1029/2002JD003093

Tang, W., Emmons, L. K., Arellano, A. F., Jr, Gaubert, B., Knote, C., Tilmes, S., Buchholz, R. R., Pfister, G. G., Diskin, G. S., Blake, D. R., Blake, N. J., Meinardi, S., DiGangi, J. P., Choi, Y., Woo, J., He, C., Schroeder, J. R., Suh, I., Lee, H., … Kim, D. (2019). Source Contributions to Carbon Monoxide Concentrations During KORUS-AQ Based on CAM-chem Model Applications. *Journal of Geophysical Research, D: Atmospheres*, *124*(5), 2796–2822. https://doi.org/10.1029/2018JD029151

Tonnesen, G. S., & Dennis, R. L. (2000). Analysis of radical propagation efficiency to assess ozone sensitivity to hydrocarbons and NOx: 1. Local indicators of instantaneous odd oxygen production sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, *105*(D7), 9213–9225. https://doi.org/10.1029/1999JD900371

Wang, F., Li, Z., Ren, X., Jiang, Q., He, H., Dickerson, R. R., Dong, X., and Lv, F. (2018). Vertical distributions of aerosol optical properties during the spring 2016 ARIAs airborne campaign in the North China Plain, Atmos. Chem. Phys., 18, 8995–9010, https://doi.org/10.5194/acp-18-8995-2018

Woo, J.-H., Choi, K.-C., Kim, H. K., Baek, B. H., Jang, M., Eum, J.-H., Song, C. H., Ma, Y.-I., Sunwoo, Y., Chang, L.-S., & Yoo, S. H. (2012). Development of an anthropogenic emissions processing system for Asia using SMOKE. *Atmospheric Environment*, *58*, 5–13. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.042

Woo, J.-H., Kim, Y., Kim, H.-K., Choi, K.-C., Lee, J.-B., Lim, J.-H., Kim, J., & Seong, M. (2020a). Development of the CREATE inventory in support of integrated climate and air quality modeling for Asia. *Sustainability*, *in press*.

Woo, J.-H, Y. Kim, Jinseok Kim, M. Park, Y. Jang, Jinsu Kim, C. Bu, Y. Lee, R. Park, Y. Oak, A. Fried, I. Simpson, L. Emmons, and J. Crawford. (2020b). KORUS Emissions: A Comprehensive Asian Emissions Information in Support of the NASA/NIER KORUS-AQ Mission. *Elementa, to be submitted*.

World Health Organization. (1987). Air quality guidelines for Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. *Copenhagen: WHO Regional Office for Europe*. https://apps.who.int/iris/handle/10665/107364

World Health Organization Working Group on Volatile Organic Compounds. (1995). Updating and revision of the air quality guidelines for Europe: report on a WHO Working Group on Volatile Organic Compounds. *Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe*. https://apps.who.int/iris/handle/10665/107551

World Health Organization. (2000). Air quality guidelines for Europe. *Copenhagen: WHO Regional Office for Europe*. https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335

World Health Organization. (2006). Air quality guidelines global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *Copenhagen: WHO Regional Office for Europe*. https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823

Appendix

This appendix contains a series of tables to provide details on the investigators, institutions, and observations conducted during the study as well as modeling teams supporting the campaign. Tables are presented in the following order:

Table 1. Instrumentation at the Olympic Park Supersite

Table 2. Instrumentation at the Taehwa Research Forest Supersite

Table 3. Other Ground and Ship-Based Measurements

Table 4. Locations of AERONET Sunphotometers and Pandora Spectrometers

Table 5. Airborne Instrumentation onboard the NASA DC-8, NASA King Air, and Hanseo University King Air Research Aircraft

Table 6. Air Quality Modeling and Forecasting Groups

표 1. 올림픽 공원 종합관측소 장비(위도/경도: 37.5216 °N/127.1242 °E)

조사 담당자, 기관	장비명/기법	종/측정 매개변수
미량 기체 측정		
조서구, 서울특별시 보건환경연구원	Ecotech 가서 센서, AeroLaser 4021, Varian GC450, Met One 기상 센서	O_3, NO, NO_2, NOx, CO, SO_2 CH_2O, VOCs, 기상학: T, RH, WD, WS, 태양광 및 UV 방사
정진상, 한국표준과학연구원(KRISS)	KENTEK 가스 분석기	O_3, NO_x, CO, SO_2
김득수, 국립군산대학교	Teledyne T200U, Thermo Scientific 42i	NO, NO_2, NO_x, NOy
Russell Long, US EPA	2B Tech 211, Teledyne T200U, Teledyne T500U CAPS, Aerodyne QCL	O_3, NO, NO_2, NO_x CH_2O
이미혜, 고려대학교	고성능 형광 검출 액체 크로마토그래피, 이온 크레마토그래피	H_2O_2, CH_3OOH HONO
이강웅, 한국외국어대학교	QCTILDAS	H_2O_2, HONO
이재홍, 하림 엔지니어링㈜	Teledyne T400, T265, 430	O_3
김새웅, University of California, Irvine	CIMS(Chemical Ionization Mass Spectrometer)	PAN, $ClNO_2$, Cl_2
김석헌, 연세대학교	TD-GC/MS	VOCs
이동수, 연세대학교	이온 크레마토그래피	산성 가스: HCl, HONO, HNO_3, H_2SO_4
한진석, 안양대학교	이온 크레마토그래피	기본 가스: NH_3, DMA, TMA
미세먼지 측정		
배민석, 국립목포대학교	PILS-TOC	WSOC
조서구, 서울특별시 보건환경연구원	Sunset OCEC, Thermo FH62C14, XRF625, MARGA	OCEC, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1, 미량 금속, 수용성 이온
강기태, ART PLUS㈜	SMPS	입자 크기 분포
김성률, 순천향대학교	Aethalometer AE-33, AE-51	블랙 카본
이재홍, 하림 엔지니어링㈜	Met One BC1050, Teledyne T640	EC, OC, PM_{10}, $PM_{2.5}$
이정훈, 한국기술교육대학교	Thermo MAAP 5012, Brechtel TAP 2901, PTI	블랙 카본, 467, 528, 652nm에서 흡수율, UV 흡수율
노철은, 인하대학교	SEM/EDX	입자 이미지 생성
신혜정, NIER	HR-ToF-AMS	PM_1 이온 성분
염성수, 연세대학교	HTDMA, TSI CPC3776, TSI CPC3010, DMT CCNC	건조 시 직경, 카파, 응결핵(3nm, 10nm), CCN
원격 감지 측정 및 관측		
James Szykman, US EPA	Vaisala CL51	혼합층 고도
Russell Long, US EPA	iMet-1-RSB 라디오존데, DMT/EN-SCI ECC	O_3, T, P, RH, WS, WD 관측

표 2. 태화연구림 종합관측소 장비(위도/경도: 37.3123 °N/127.3105 °E)

조사 담당자, 기관	장비명/기법	종/측정 매개변수
미량 기체 측정		
Scott Herndon, Aerodyne	Aerodyne TILDAS 소형 분석기	CH_2O
Russell Long, US EPA	2B Tech 211, Aeroqual 500, Teledyne T500U CAPS	O_3, NO, NO_2, NOx
김새웅, University of California, Irvine	Thermo 42i, LGR CRDS, CIMS, PTR-ToF-MS, CRM-CIMS	NO, NO_2, $ClNO_2$, Cl_2, VOCs, OH 반응도
		VOCs
이미혜, 고려대학교	Luminol-GC, GC-FID	PAN, VOCs
이영재, NIER		O_3, CO, SO_2, NOx, CO_2, H_2O, 기상학: T, WS, WD
Thomas McGee, NASA GSFC	Thermo 42i, Lufft WS501	O_3, 기상학: T, P, RH, WS, WD, 태양광 방사
미세먼지 측정		
강기태, ART PLUS㈜	SMPS	입자 크기 분포
이영재, NIER		OC, EC
원격 감지 측정 및 관측		
James Szykman, US EPA	Vaisala CL51	혼합층 고도
Thomas McGee, NASA GSFC	GSFC TROPOZ DIAL	Lidar 오존 분포
Anne Thompson, NASA GSFC	iMet-1-RSB 라디오존데, DMT/EN-SCI ECC	O_3, T, P, RH, WS, WD 관측

표 3. 기타 지상 및 선박 측정

조사 담당자, 기관	장비명/기법	종/측정 매개변수
불광동 종합관측소(위도/경도: 37.6098 °N/126.9348 °E)		
신혜정	SMPS, APS, 혼탁계, BAM 1020, XRF, AIM, Sunset SOCEC, Aethalometer	입자 크기 분포, 산란, $PM_{2.5}$, PM_{10}, 미량 금속, 수용성 이온, OC, EC, BC
백령도 종학관측소(위도/경도: 37.963 °N/124.644 °E)		
한진석, 안양대학교	HEDS-IC	TMA, NH_3
이미혜, 고려대학교	Luminol-GC	PAN
이민도, NIER	Teledyne 가스 분석기, Varian NL/450GC SMPS, APS, 혼탁계, BAM 1020, XRF, AIM, Sunset SOCEC, Aethalometer	O_3, CO, NOx, SO_2, VOCs 입자 크기 분포, 산란, $PM_{2.5}$, PM_{10}, 미량 금속, 수용성 이온, OC, EC, BC
강기태, ART PLUS㈜	SMPS	입자 크기 분포
대전 종합관측소(위도/경도: 36.35 °N/127.38 °E)		
유정아, NIER	혼탁계, BAM 1020, XRF, AIM, Sunset SOCEC, Aethalometer	산란, $PM_{2.5}$, PM_{10}, 미량 금속, 수용성 이온, OC, EC, BC
광주 종합관측소(위도/경도: 35.2278 °N/126.8428 °E)		
임철수, NIER	혼탁계, BAM 1020, XRF, AIM, Sunset SOCEC, Aethalometer	산란, $PM_{2.5}$, PM_{10}, 미량 금속, 수용성 이온, OC, EC, BC
박기홍, 광주과학기술원(GIST)	SMPS, OPC, QAMS	입자 크기 분포, 미세먼지 화학 성분
울산 종합관측소(위도/경도: 35.53 °N/129.3 °E)		
박미경, NIER	Teledyne 가스 분석기, 혼탁계, BAM 1020, XRF, AIM, Sunset SOCEC, Aethalometer	NO_y, NH_3, 산란, $PM_{2.5}$, PM_{10}, 미량 금속, 수용성 이온, OC, EC, 흡수율
제주 종합관측소(위도/경도: 33.32 °N/126.40 °E)		
반수진, NIER	SMPS, APS, 혼탁계, BAM 1020, XRF, AIM, Sunset SOCEC, Aethalometer	입자 크기 분포, 산란, $PM_{2.5}$, PM_{10}, 미량 금속, 수용성 이온, OC, EC, 흡수율
국립서울대학교(SNU)(위도/경도: 37.458 °N/126.951 °E)		
김상우, SNU Robert Holz, U. Wisconsin	Mie 산란 Lidar High Spectral Resolution Lidar	미세먼지 후방 산란 및 탈분극
한국과학기술연구원(KIST)(위도/경도: 37.6015 °N/127.0452 °E)		
김화진, KIST	HR-ToF-AMS(고분해능 비행시간 미세먼지 질량 분석계)	화학종분화 비내화성 초미세먼지 질량 및 크기 분포
한국외국어대학교(HUFS)(위도/경도: 37.339 °N/127.266 °E)		
김영성, HUFS	SMPS, OPC, MAAP	입자 크기 분포, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1, BC
연세대학교(위도/경도: 37.564 °N/126.935 °E)		
홍진규, 연세대학교	Picarro CRDS, CL-31	CO_2, CH_4, BL 고도

중랑구(위도/경도: 37.5906 °N/127.0794 °E)		
박문수, HUFS	CL51, Automatic Weather Station	미세먼지 후방 산란, BL 고도, Met: T, P, RH, 강수량, WS, WD, 방사
고산(위도/경도: 33.292 °N/126.162 °E)		
김상우, SNU	SMPS, 흔탁계, aethalometer, Mie 산란 lidar	입자 크기 분포, 산란, BC, 후방 산란 및 탈분극
평택 발전소(위도/경도: 36.865 °N/126.215 °E)		
김*영, GIST	Mini MAX-DOAS	SO_2
후쿠에 섬(위도/경도: 32.75 °N/126.68 °E)		
Yugo Kanaya, JAMSTEC	온도 분석기(49C, 48C, MAAP 5012, and SHARP 5030) COSMOS, Metcon 분광기	O_3, CO, 블랙 카본, j(NO_2), j(O^1D)
RV Onnuri		
Carolyn Jordan, National Institute of Aerospace	Brechtel TAP, Airphoton IN101 흔탁계, SpEx, 필터 샘플링, MicroTOPS II	현장 미세먼지 흡수 및 산란, 스펙트럼 미세먼지 소멸(300-700nm), 미세먼지 성분 및 스펙트럼 광학적 속성, 총 기주농도 다파장 AOD
Anne Thompson, NASA GSFC	Thermo 49C, 48C, 42C-Y, Aerodyne CAPS	O_3, CO, NO, NO_y, NO_2
김원국, KIOST	AWS 탑재RV 온누리	기상학: T, P, RH, WS, WD, 태양광 방사, 강수량
RV 장목		
James Flynn, University of Houston	Thermo 49i, 42i-TL, 48i-TLE, 43i-TL	O_3, NO, NO_2, CO, SO_2
박영제, KIOST	AWS 탑재RV 장목	기상학: T, P, RH, WD, WS
RV 기상		
이미혜, 고려대학교	열 가스 분석기, KENTEK Mezus-110, Luminol-GC, 흔탁계, aethalometer	O_3, CO, SO_2, NO_2, PAN, 미세먼지 산란, 블랙 카본

표 4. AERONET 태양광도계 및 Pandora 분석기 위치

관측소명	위도 (°N)	경도 (°E)	AERONET	Pandora
안면	36.53889	126.33	L	K
백령	37.963	124.644	L	
부산	35.235	129.083	L	K
대관령	37.687	128.759	K	
강릉	37.771	128.867	L	
고산	33.292	126.162	L	
광주	35.22778	126.84278	L	K
한국	37.339	127.266	L	
익산	35.962	127.005	K	
경북	35.89	128.606	K	
목포	34.913	126.437	K	
NIER	37.569	126.64	K	
올림픽 공원	37.5216	127.1243	K	K
서울	37.458	126.951	L	
송촌(백사)	37.412	127.569	K	K
태화	37.3123	127.3105	K	K
UNIST	35.582	129.19	K	
여주	37.338	127.489	K	K
연세	37.564	126.935	L	K

K = KORUS-AQ 관측소, L = 장기 관측소

표 5. NASA DC-8, NASA King Air, 한서대학교 King Air 연구용 항공기에 탑재된 항공 장비

조사 담당자, 기관	장비명/기법	종/측정 매개변수
NASA DC-8 미량 기체 측정		
Andrew Weinheimer, NCAR	NCAR 4채널 화학발광 계측기	O_3, NO, NO_2, NO_y
Glenn Diskin, NASA Langley	DACOM(Diode Laser \Spectrometer)	CO, CH_4, N_2O
Glenn Diskin, NASA Langley	DLH(Diode Laser Hygrometer)	H_2O(v)
Joshua DiGangi, NASA Langley	비분산형 IR 분석기	CO_2
Donald Blake, University of California, Irvine	WAS(Whole Air Sampler)	C_2-C_{10} 알케인, C_2-C_4 알켄, C_6-C_9 향료, C_5-C_6 사이클로알케인, C_1-C_5 질산 알킬, C_1-C_2 할로카본(CFCs, HCFCs, HFCs, 할론, 할로겐화 메틸 등), 아이소프렌, 모노테르펜, 에틴, COS, DMS
Alan Fried, University of Colorado, Boulder	CAMS(Compact Atmospheric Multi-Species Spectrometer)	CH_2O, C_2H_6
L. Gregory Huey, Georgia Institute of Technology	GT-CIMS(Georgia Tech - Chemical Ionization Mass Spectrometer)	PAN, PPN, APAN, PBZN, SO_2, HCl
William Brune, Penn State	ATHOS(Airborne Tropospheric Hydrogen Oxides Sensor)	OH, HO_2, OH 반응도
Ronald Cohen, University of California, Berkeley	TD-LIF(Thermal Dissociation-Laser Induced Fluorescence)	NO_2, 질산 페록시 총량, 질산 알킬 총량, 미세먼지 단계 유기 질소
김새웅, University of California, Irvine	CIMS(Chemical Ionization Mass Spectrometer)	$ClNO_2$, Cl_2
민경은, 광주과학기술원	CEASAR(Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy for Atmospheric Research)	NO_2, CHOCHO
박정후, 국립환경연구원	PTR-HR-ToF-MS(Proton Transfer, High-Resolution, Time-of-Flight, Mass Spectrometer)	톨루엔
Paul Wennberg, California Institute of Technology	CIT-CIMS(Caltech Chemical Ionization Mass Spectrometer)	HNO_3, HCN, H_2O_2, 유기 페록사이드, 유기 질소, 유기 하이드록시 유기 질산염, 페록시아세트산, 크레졸, 글라이코알데히드
Armin Wisthaler, University of Oslo	PTR-ToF-MS(Proton Transfer Time-of-Flight Mass Spectrometer	메탄올, 아세토나이트릴, 아세톤, 메틸에틸케톤, 아세트알데히드, 벤젠, 톨루엔, C8-알킬벤젠, 아이소프렌, 아이소프렌 산화물, 모노테르펜
NASA DC-8 미세먼지 측정		
Bruce Anderson, NASA Langley	LARGE(Langley Aerosol Research Group Experiment)	미세먼지 수, 크기 분포, 광학 및 미시물리학적 속성
Jack Dibb, University of New Hampshire	SAGA(Soluble Acidic Gases and Aerosol)	벌크 미세먼지 이온 성분, 미세 미세먼지 황산염, HNO_3(및 초미세 NO_3 미세먼지)

Jose Jimenez, University of Colorado-Boulder	HR-ToF-AMS(High Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer)	화학종분화 비내화성 초미세먼지 질량 및 크기 분포
이태형, 한국외국어대학교	AMS(Aerosol Mass Spectrometer)	화학종분화 비내화성 초미세먼지 질량
Joshua Schwarz, NOAA	HS-SP2(Humidified Dual Single Particle Soot Photometer)	블랙 카본(BC) 농도, 크기 분포, 혼합 상태, 입자를 포함한 BC 흡습성
염성수, 연세대학교	응결핵 계측기	
NASA DC-8 원격 감지 측정		
Samuel Hall, NCAR	CAFS(CCD Actinic Flux Spectrometers)	4-π sr 화학선 플럭스 및 유도 광분해 주파수
John Hair, NASA Langley	DIAL-HSRL(Differential Absorption Lidar and High Spectral Resolution Lidar)	Zenith 및 Nadir O_3, 미세먼지 후방 산란, 탈분극, 소멸, 기타 검색된 미세먼지 매개변수
Jens Redemann, NASA Ames	4STAR(Spectrometers for Sky-Scanning, Sun-Tracking Atmospheric Research)	AOD Zenith 측정, 기주농도 수증기, O_3, NO_2
NASA King Air 원격 감지 측정		
Scott Janz, NASA Goddard	Geo-TASO(Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization)	NO_2 and CH_2O Nadir 기주농도
한서대학교 King Air 미량 기체 측정		
박진수, 국립환경연구원	Teledyne API T400 AeroLazer AL5002 LGR GGS 24 EP Thermo TEI 43i	O_3 CO CH_4, CO_2, H_2O SO_2
Tom Hanisco, NASA Goddard	CAFÉ(Compact Airborne Formaldehyde Experiment)	CH_2O

표 6. 대기질 모델링 및 예보 그룹

조사 담당자, 기관	모델명/역할	영역/분해능
박록진, 국립서울대학교	GRIMs-Chem	70-150°E, 15-55°N / 0.25° x 0.3125° (한국 ~27km)
Louisa Emmons, NCAR	CAM-Chem WRF-Tracer	전 세계 / 0.9° x 1.25° 동아시아 / 15km, 한국 / 3km
송철한, GIST	WRF-CMAQ	100-145°E, 20-45°N / 15km
Arlindo DaSilva, NASA GSFC	GEOS-5	전 세계 / 12.5km
Gregory Carmichael, University of Iowa	WRF-Chem	동아시아 / 20km, 한국 / 4km
김철희, 국립부산대학교	WRF-Chem	동아시아 / 27km
김순태, 아주대학교	WRF-CAMx	Flexi-nesting 27km / 9km / 3km
우정훈, 건국대학교	KU-CREATE 배출량 데이터베이스	
David Peterson, Naval Research Laboratory(NRL), 한상옥, 국립기상과학원(NIMS)	지역 기상 예보	

용어 및 약어

AERONET – Aerosol Robotic Network(미세먼지 로봇 네트워크)

AHI - Advanced Himawari Imager(고급 Himawari 이미지 생성기, 일본에서 운영하는 위성 장비)

ALW - Aerosol Liquid Water(액체 상태의 미세먼지)

AMS - Aerosol Mass Spectrometer(미세먼지 질량 분석기)

BC - Black Carbon(블랙 카본)

BL - Boundary Layer(지표면에 닿아 있는 대류권의 가장 아래층)

상향식 배출량 – 대표적인 샘플에서 얻은 활동 자료에 따른 배출량 추정치

CAMx - Comprehensive Air Quality Model with Extensions(포괄적인 대기질 모델, 확장 포함)

CAPSS - Clean Air Policy Support System(청정 공기 정책 지원 시스템)

CEMS - Continuous Emissions Monitoring System(지속적인 배출량 모니터링 시스템)

CleanSYS - 산업시설 원격 모니터링 시스템

CMAQ - Community Multiscale Air Quality model(커뮤니티 다중범위 대기질 모델)

CO - Carbon Monoxide(일산화탄소)

CO_2 - Carbon Dioxide(이산화탄소)

COS - Carbonyl sulfide(황화카르보닐)

CREATE - Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment(대기 수송 실험을 위한 포괄적인 지역별 배출 목록)

CTM - Chemical Transport Model(화학 수송 모델)

DMA – Dimethylamine(다이메틸아민)

E-AIM - Extended Aerosol Inorganic Model(확장 미세먼지 무기 모델)

EC - Elemental Carbon(원소탄소)

FSSR - Final Science Synthesis Report(최종 과학 종합보고서)

GEMS - Geostationary Environment Monitoring Spectrometer(정지 환경 모니터링 분석기)

GEO - Geostationary (정지궤도 위성)

GEOS-Chem - Goddard Earth Observing System – Chemistry model(Goddard 지구 관측 시스템 – 화학 모델)

GeoTASO - Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization(정지궤도 미량 기체 및 미세먼지 센서 최적화, 항공 장비)

GOCI - Geostationary Ocean Color Imager(정지궤도 해양 색상 이미지 생성기, 한국에서 운영하는 위성 장비)

HCHO – Formaldehyde(포름알데히드)

HOA - Hydrocarbon-like Organic Aerosol(유기 에어로졸 상태의 탄화수소)

HONO - Nitrous Acid(아질산)

H_2O_2 - Hydrogen Peroxide(과산화수소)

Kappa – 미세먼지 흡습성 매개변수

KIST - Korea Institute of Science and Technology(한국과학기술연구원)

KMOE - Korean Ministry of Environment(대한민국 환경부)

KORUS-AQ - Korea-United States Air Quality Study(한미 공동 대기질 연구)

KORUS-OC - Korea-United States Ocean Color Study(한미 공동 해양 색상 연구)

LEO - Low Earth Orbit(저궤도 위성)

LFT - Lower Free Troposphere(하층 자유 대류권, 경계층 상단의 대류권 층)

LPG - Liquefied Petroleum Gas(액화 석유가스)

MAPS-Seoul - Megacity Air Pollution Study – Seoul(대도시 공기오염 연구 – 서울)

MEIC - Multi-resolution Emission Inventory for China(중국 다분해능 배출 목록)

Mixed Layer – 혼합층. 난류 및 혼합을 특성으로 하는 대기 경계층.

MLH - Mixed Layer Height(혼합층 고도)

NASA - National Aeronautics and Space Administration(미국 항공우주국)

NH_3 – 암모니아

NIER - National Institute of Environmental Research(국립환경과학원)

NMB - Normalized Mean Bias(정규화된 평균 편차)

NO - Nitric Oxide(일산화질소)

NO_2 - Nitrogen Dioxide(이산화질소)

NOx - Nitrogen Oxides(NO + NO_2). 질소산화물(일산화질소 및 이산화질소)

OA - Organic Aerosol(유기 에어로졸)

OC - Organic Carbon(유기 탄소)

OH – 하이드록실 래디컬 분자

OFR - Oxidation Flow Reactor(산화 흐름 반응기)

OMI - Ozone Monitoring Instrument(오존 모니터링 장비, 미국/네덜란드/핀란드에서 운영하는 위성 장비)

OPE - Ozone Production Efficiency(오존 생성 효율성)

O_3 – Ozone(오존)

P – Pressure(압력)

PBL - Planetary Boundary Layer(행성 경계층)

PM_1 - Particulate Matter(직경 1μm 미만의 미세먼지)

$PM_{2.5}$ - Particulate Matter(직경 2.5μm 미만의 미세먼지)

POA - Primary Organic Aerosol(1차 유기 에어로졸)

$P(O_3)$ - Net Ozone Production(순 오존 생성량)

RH - Relative Humidity(상대 습도)

RMSE - Root Mean Square Error(평균 오차 제곱근)

RSSR - Rapid Science Synthesis Report(긴급 과학 종합보고서)

SIA - Secondary Inorganic Aerosol(2차 무기 미세먼지)

S/IVOC - Semi-volatile and Intermediate-volatility Volatile Organic Compounds(반휘발성 및 중간휘발성 유기 화합물)

수도권 지역 - Seoul Metropolitan Area(서울 수도권)

SMOKE-Asia - Sparse Matrix Operator Kernel Emissions-Asia(각각의 오염 배출원별 특성을 고려한 배출량 산정 모델)

SOA - Secondary Organic Aerosol(2차 유기 에어로졸)

SO_2 - Sulfur Dioxide(이산화황)

T – Temperature(온도)

T/B - Toluene/Benzene(톨루엔/벤젠)

TMA – Trimethylamine(트리메틸아민)

하향식 배출량 – 지역 범위에서의 관측결과에 따른 배출량 추정치

UV – Ultraviolet(자외선)

VOC - Volatile Organic Compound(휘발성 유기 화합물)

WAS - Whole Air Sampling(전체 공기 샘플링)

WD - Wind direction(풍향)

WS - Wind speed(풍속)

WRF-Chem - Weather Research and Forecasting - Chemistry model(기상 연구 및 예보 – 화학 모델)

0-D - Zero-dimensional(0차원)

3-D - Three-dimensional(3차원)

한-미 협력 국내 대기질 공동조사
KORUS-AQ 최종 종합보고서
KORUS-AQ Final Science Synthesis Report

