KORUS-AQ 예비종합보고서 소개

국립환경과학원 (NIER)과 미국항공우주국 (NASA)은 한국의 대기질에 대한 현장 조사를 수행하기 위해 다수의 측정 및 모델링 전문가를 초청하여 한미 대기질 합동 연구 (KORUS-AQ)를 위한 대규모 연구단을 구성하고 현장관측을 수행하였다. 본 연구의 가장 핵심적인 목표는, 한국의 대기질 악화에 영향을 미치는 원인들을 정확히 파악하는 것이다. KORUS-AQ 연구단은 2016년 5월부터 6월 초까지 항공기, 지상 관측소, 선상에서 관측을 수행하였다. 관측에는 기상 및 대기질 모델 예보 결과를 활용하였는데, 역으로 해당 모델들의 성과 (Performance)를 평가하는데 관측 결과를 사용하였다. 이는 KORUS-AQ 데이터 분석의 일환으로서 계속 진행 중이다.

다음의 상세 보고서에서는 KORUS-AQ의 조사 결과를 개괄적으로 제시한다. 이는 정책 결정자들이 대기질 개선을 위한 전략을 개발하고, 저감이 필요한 특정 오염원이 무엇인지 파악하는 데 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

KORUS-AQ는 수평 및 수직적으로 광범위한 공간에 걸쳐, 전례 없던 수준의 포괄적 오염물질 측정을 수행하였다 (미량 기체 및 미세먼지 입자 성질에 대한 측정을 모두 포함). 그러나 한국의 대기질 문제를 모두 설명하기에는 KORUS-AQ의 연구기간이 불충분하였기 때문에, 과학적 측면의 가치와 해석상 한계가 동 연구에 공존한다는 것을 도입부에서 밝히는 바이다.

한국은 대기질 문제에 있어, 가시적인 요소와 비가시적인 요소 모두를 고려해야 함

한국은 PM_{10}, $PM_{2.5}$, O_3, NO_2, SO_2, CO 등 여섯 가지 오염물질에 대하여 대기질 관측을 실시하고 있다. 이 중 대기 중의 먼지와 함께 이동하는 PM_{10}은 눈에 잘 보이기 때문에 대기질 개선에 대한 대중의 관심과 불만 모두를 가장 많이 불러일으키는 대상이다. 그러나, PM_{10}의 경우 폐까지 쉽게 도달하지는 않는 반면 (그림 1 참조), 직경이 2.5 마이크로미터 미만인 입자와 오존은 좀 더 실질적으로 폐에 전달될 뿐 아니라, 깊게 침투하기 때문에 공중보건과 호흡기 건강에 있어 더욱 심각한 문제가 된다.

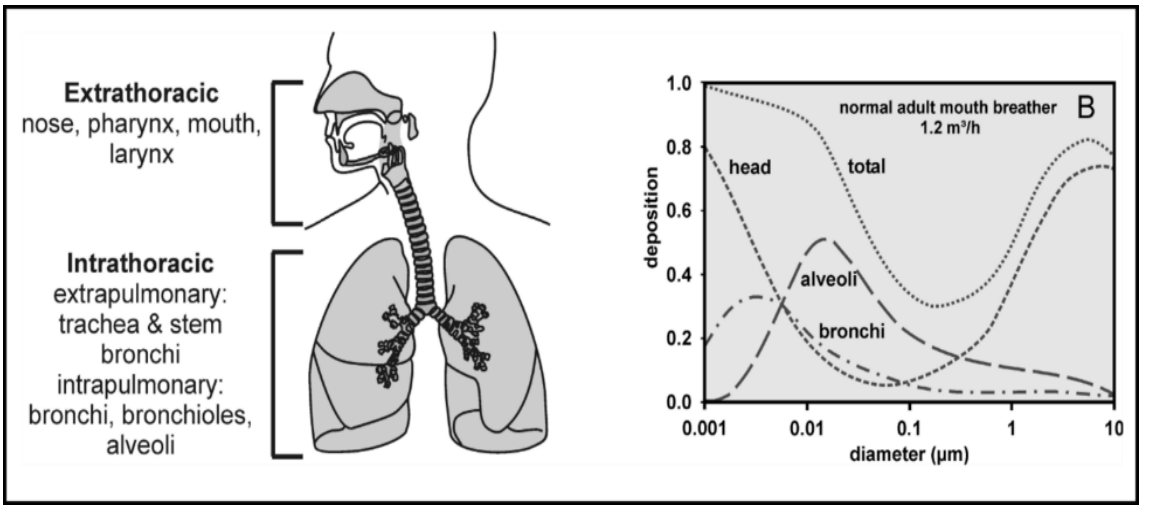


그림 1. 일반적인 남자 성인이 휴식 상태에서 구강호흡을 할 때 입자 크기 별 기도 내 입자 증착. 기관지 데이터는 기관지 및 세기관지 데이터를 모두 포함. Geiser and Kreyling에서 발췌 (2010).

입자에 의한 빛의 산란은, 입자의 특성 중 크기, 형태, 성분과 같은 요소들이 복잡하게 작용하여 나타난 결과이므로 우리 눈에 보이는 것만으로 대기질의 상황을 판단하는 것은 적당하지 않다. 미세먼지보다 크기가 훨씬 작은 기체인 오존의 경우, 일반인의 육안만으로는 건강에 해로운 상태인지 알아채기가 힘들다. 따라서 대기오염측정망에서의 관측이 중요하며, PM_{10}, $PM_{2.5}$, 오존 간 어떠한 차이가 있는지에 대해 대중의 이해를 높이는 것은 공중보건과 밀접한 관련이 있는 대기질에 대한 관심을 제고하는 데 핵심적인 것이다.

지역 내 광화학적 오염에 초점을 맞추기 위하여, 외부 특히 대륙에서의 오염물질 이동이 가장 심한 3-4월이 아닌 지역 내 광화학적 오염이 집중되는 5-6월에 관측

봄철의 장거리대기오염물질 이동은 중요하게 고려해야 할 문제이나, 이는 단발성의 오염 사례로서 한국 외부 지역에서 유입되는 먼지 및 오염물질 모두를 포함하고 있으므로 $PM_{2.5}$ 오염과 지역 내 오염원이 차지하는 비중에 대한 해석을 복잡하게 만든다. 반면 5월과 6월 사이에는 기온과 습도가 상승하고 일조시수가 길어지며 햇빛이 강해지고 식물로부터의 가스 배출이 증가하기 때문에, 주로 지역 내 오염원에서 배출되는 광화학 오염 전구물질들이 햇빛에 의해 광화학 반응을 일으키면서 오존과 $PM_{2.5}$ 발생이 한반도에서 고점을 찍는다. 따라서, KORUS-AQ를 5월과 6월에 진행하기로 결정을 한 이유는, 오존과 $PM_{2.5}$ 두 가지의 오염물질이 대기질 기준을 얼마나 초과하는지 연구할 필요가 있었으며 관측된 오존과 $PM_{2.5}$ 발생량을 결정하는데 지역오염의 원인이 더욱 크다는 것을 검증하고자 했기 때문이었다. KORUS-AQ 는 오존과 $PM_{2.5}$ 의 전구 물질에 대한 상세한 관측 외에도 다양한 오염원 (예: 운송, 발전, 산업) 의 복잡한 화학 작용과 영향에 대한 심도 있는 분석을 진행함으로써, 한국이 오염물질 배출 저감 및 대기질 개선을 위한 최선의 방법을 도출하고 국내 규제만으로도 달성할 수 있는 목표를 설정할 수 있도록 필요한 정보를 제공하고자 하였다.

KORUS-AQ 기간 동안 오존과 $PM_{2.5}$ 모두 기준치를 초과

KORUS-AQ기간 중 대기오염측정망 관측 결과, 오존은 장기간 한국 대기환경기준을 초과한 상태로 기록되었다. $PM_{2.5}$ 는 5월말 경에 일주일간 기준을 초과하였다 (그림 2 참조). 오존과 $PM_{2.5}$ 환경기준 초과 등을 포함하여 다양한 조건이 있었던 기간 동안 KORUS-AQ 관측을 진행하였다. 항공 관측과 함께 올림픽 공원 및 태화연구림에서의 지상 관측을 바탕으로, 기준초과 등 오염 상황을 자세히 관찰하고, 이에 기여하는 요인이 무엇인지 밝히는 데 필요한 정보를 얻을 수 있었다. 본 보고서에서 제시하는 연구 내용들은 이러한 관측 및 관련 분석을 기반으로 한 것이다.

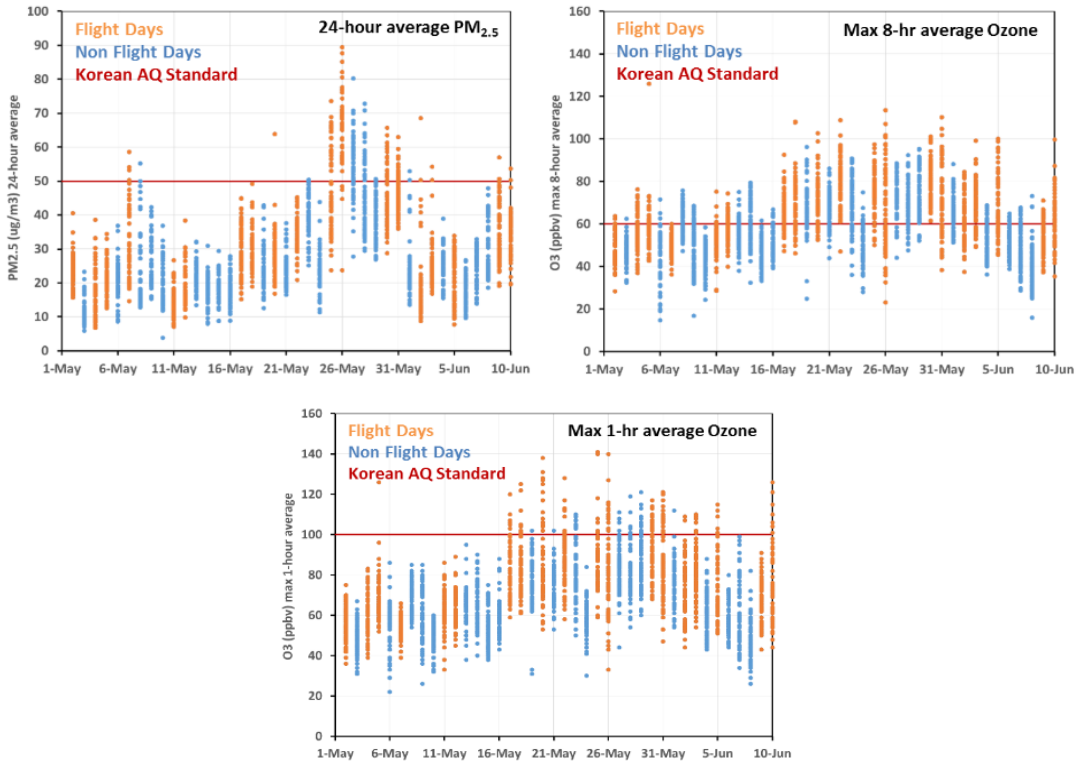


그림 2. KORUS-AQ 기간 (2016년 5월1일에서 6월 10일까지 진행) 동안, 서울, 부산, 광주의 일부 대기오염측정망에서 측정된 $PM_{2.5}$ 및 오존 농도. 매일 개별 지상관측소에서 관측된 값을 한국 대기환경기준과 비교함. 항공 데이터가 수집된 날은 주황색으로 표시되어 있으며 비행을 실시한 날에 대기질 상황을 적절하게 샘플링 했음을 보여주고 있음 (Jim Crawford, NASA 제공).

지역 내 배출은 대기질에 많은 영향을 미치며, 대개 대기환경기준을 초과시킬 정도로 기여도가 큰 요인이다. 다만, 월경성 오염물질 또한 상황을 악화시키는 요인으로서 고려해야 함

아래에서 더욱 잘 설명하겠지만, 한국에서의 지역 내 오염물질 배출은 상당히 높은 수준이다. 반응성이 높은 유기물질 (예: 톨루엔)과 결합된 질소산화물은 대기 중 체류시간이 짧기 때문에 월경성 이동을 하지 못한다. 따라서 KORUS-AQ 관측 기간 동안 오존 농도가 높게 유지된 데에는 상당수준의 국내 배출이 크게 영향을 미친 것으로 나타났다. 여기에 더해 동아시아는 오존 배경 농도가 높게 나타나 이러한 상황을 더욱 악화시킨다. 유사한 맥락에서, 2차 생성 미세먼지가 주로 국내 오염에 의한 영향을 받는다는 증거가 있으나, KORUS-AQ 기간 중 관측된 $PM_{2.5}$ 대기환경기준 초과 사례는 동아시아로부터의 장거리 이동으로 인한 직접적 영향이 높을 때 나타났다. 이는 지역 내에서 발생한 오염물질과 풍상측 (Upwind sources)에서 유입된 오염물질이 최악의 조건을 만들어냈다는 것을 의미한다. KORUS-AQ 기간 동안 관측된 이들 요소에 대한 상세 내용은 본 보고서에 기술되어 있다.

KORUS-AQ 기간 중 관측한 결과를 기타 년도 또는 계절과 비교해야만 관측 내용을 정확히 이해할 수 있음

대개 기상에 따라 대기질 상황에서의 변동이 일어나며, 이는 해마다 큰 차이를 보일 수 있다. KORUS-AQ 대기질 관측 기간 중, 동아시아와 중국으로부터의 영향은 대체로 적었다. 이는 한국의 대기질에서 지역 내 오염원 배출이 미치는 영향을 명확하게 이해하는데 도움이 되었다. 중국으로부터의 직접적인 유입은 5월 25일에서 28일 사이 한차례의 짧은 기간 동안에만 관측되었다. 국내 오염물질 배출로 인한 영향은 5월 17일에서 22일 사이 대기가 정체되어 있던 기간 동안 극대화 되었다. 두 기간 동안 대기 흐름 패턴은 그림 3에 비교되어 있다.

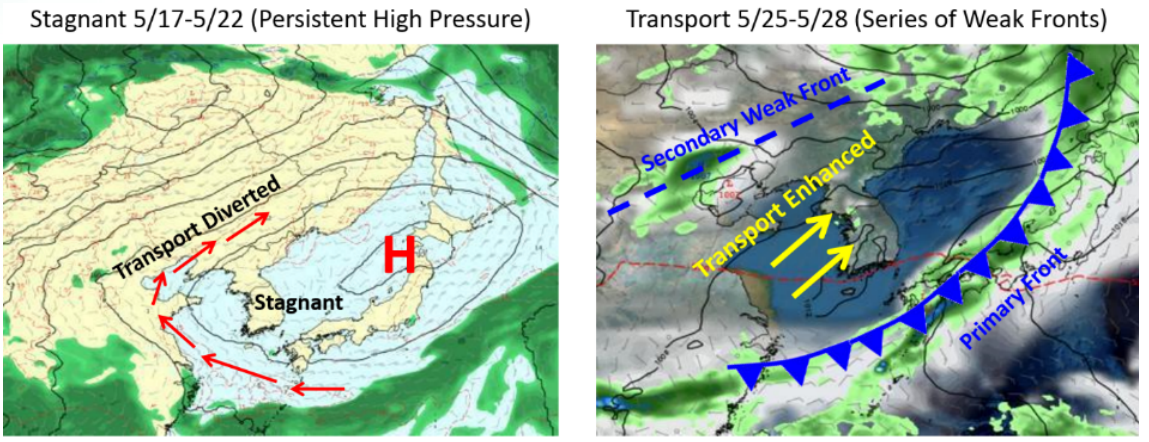


그림 3. KORUS-AQ 기간 동안 한반도 상공의 대기는 정체 상태 (좌) 와 중국의 영향을 받는 바람으로 인해 먼지가 직접 유입된 기간 (우)으로 대조를 보였음 (David Peterson, NRL 제공).

KORUS-AQ 기간 동안의 기상 조건은 지역 내 오염원 배출이 지역 내 대기질 문제에 어떤 영향을 주는지 이해하기에 매우 좋은 조건이었다. 이에 대기질 개선에 가장 많은 영향을 미치는 오염물질이 무엇인지 파악하고 감축 전략을 마련하는 데 매우 유용한 정보를 제시할 수 있었다. 그러나 매년 기상의 변화와 장거리 이동의 계절적 차이에 따라 실제 조건들은 영향을 받을 것이다. 이러한 측면에서, KORUS-AQ 기간 동안 이루어진 관측은 관련 비교 연구에 있어 매우 핵심적인 벤치마크 사례가 된다고 볼 수 있다. 대기질과 기상 간의 상관관계를 파악하고, 성공적인 오염물질 감축을 이루기 위해서는 더욱 지속적으로 관련 연구가 뒤따라야 할 것이다.

본 1차 조사 결과 보고서에서 답변된 질문

본 보고서는 총 5장으로 구성되어 있으며 각각의 장은 KORUS-AQ의 관측 내용을 기반으로 구체적인 질문에 대한 답을 제공한다. 이 연구 결과는 일차적인 내용이지만 높은 신뢰 수준을 가진 것으로 간주되고 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 조사 내용의 정량화를 위해서는 지속적인 과학적 분석이 이루어져야 한다. 추가적인 분석 내용은 향후 몇 년 동안 엄격한 심사를 수반하는 국제학술지에 게재될 예정이지만, 배출가스 감축 전략과 한국의 대기질 개선을 위한 가능성에 대한 논의가 지체되어서는 안 될 것이다.

질문은 다음과 같다:

1. **A) 서울 등 수도권 지역과 한반도 전역에서 2차적으로 발생한 미세먼지의 양과 B) 미세먼지의 변동에 영향을 미치는 주요 오염원 및 요인을 파악할 수 있는가?**
2. **서울의 오존 발생은 NOx 때문인가 아니면 VOCs 때문인가? 오존 생성에 있어 유기물에 의한 생성과 자연 생성의 차이를 구별할 수 있는가?**
3. **현재의 배출량 및 부문별 대기오염물질 배출 자료 산정결과 (예: NOx, VOCs, SO_2, NH_3)를 확인하는 데 KORUS-AQ 관측 결과가 얼마나 도움이 되는가?**
4. **서해안 인근의 대규모 점오염원이, 시간 및 공간적 측면에서 수도권지역의 대기질에 얼마나 영향을 미치는가?**
5. **서울은 지역 내, 아시아 대륙 또는 북반구로부터 유입된 오염물질의 영향을 얼마나 받는가?**

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

조사 결과 요약: KORUS-AQ 기간 동안 관측된 미세먼지 오염의 4분의 3 이상이 2차 생성에 인한 것이었다. 유기물이 가장 많았으나 황산염과 질산염이 2차 생성된 미세먼지 전체 양의 거의 반을 차지했다. 미세먼지와 기타 화학물질 지표 간의 농도차 및 상관관계를 보면 2차 미세먼지 생성에는 지역 내 오염원이 지배적인 기여를 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 VOCs, NOx, SO_2, NH_3 배출을 줄이는 것이 $PM_{2.5}$ 감축에 도움이 될 것이다.

한국에서 미세먼지를 생성시키는 인자들이 무엇인지 이해하는 것은 매우 중요한 문제이다. KORUS-AQ 기간 동안 수도권 지역의 $PM_{2.5}$ 평균농도는 25 $\mu g\ m^{-3}$ 수준이었다. 해당 농도는 미세먼지 오염이 훨씬 심한 다른 시기들에 비해 낮은 값이지만, 이 시기들의 경우 한국 외 지역에서 유입된 오염에 의해 심각한 영향을 받는 관계로 국내 오염과 풍상 측 월경 오염의 영향을 비교 해석하기가 어렵다. KORUS-AQ 조사기간 중 대개는 국내 오염원의 영향이 주로 나타났는데, 이는 하나의 기회로서 국내 전구물질 배출량을 평가할 수 있는 이점이 있었으며, 이와 더불어 미세먼지의 현 관리 수준을 파악할 수 있었다.

미세먼지의 다양한 발생원을 이해하기 위해서는 미세먼지의 성분을 먼저 측정해야 한다. KORUS-AQ 기간 동안 미세먼지 (PM_1)에 대하여 상층대기와 지상에서의 측정을 실시하였으며, 여기서 미세먼지 질량 분석기 (aerosol mass spectrometer)를 사용하였다. 측정 결과는 그림 1-1과 같다.

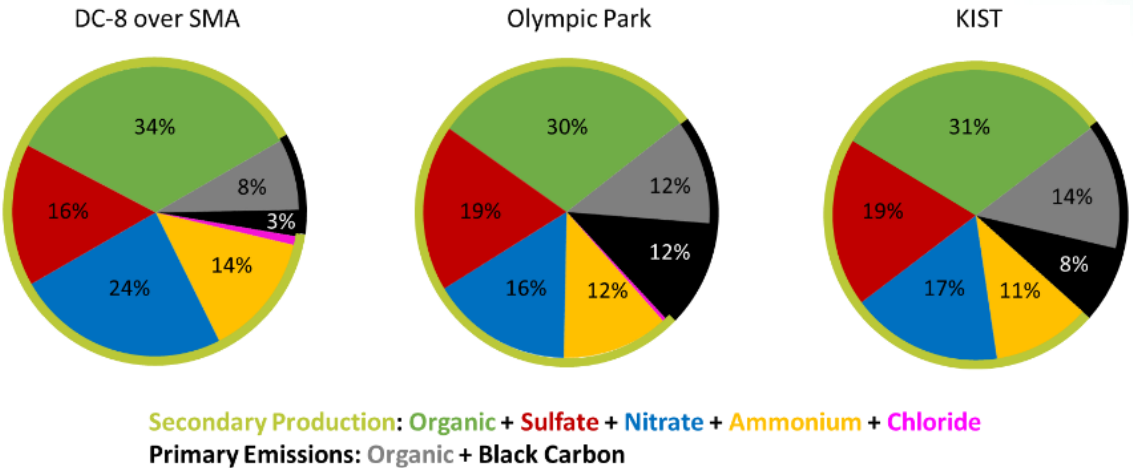


그림 1-1. KORUS-AQ 기간 동안 DC-8과 서울에 설치된 두 곳의 지상관측소에서 관측된 미세먼지의 평균 성분 (Ben Nault, 미국 콜로라도 대학교; 신혜정, 국립환경과학원; 김화진, KIST 제공).

그림 1-1의 측정치에서는, 미세먼지 성분간 농도비가 서로 유사하게 나타나며, 평균 질량농도가 같은 기간 서울시내의 대기오염측정망에서 관측된 $PM_{2.5}$ 농도 '25 μg m^{-3}'와 유사하다는 점을 감안하면 미세먼지 오염은 1마이크론 미만의 입자에 의해 주로 발생된다는 것을 알 수 있다. 또한 이들 측정값을 바탕으로, 이번 항공 관측 및 지상 측정 결과가 수도권 지역 미세먼지 성분을 충분히 대표한다고 확신할 수 있다. 위의 성분 분석 결과는 크게 두 개의 주요 카테고리 즉, 2차 미세먼지와 1차 오염물질 배출로 구별할 수 있다. 미세먼지의 경우에는 2차 생성이 중요한 비중을 차지하는데 위 관측에서는 2차 생성 미세먼지 성분이 전체 미세먼지의 75% 이상을 차지하는 반면 1차 생성 미세먼지는 25% 이하를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 항공기DC-8 에서 관측된 1차 생성 미세먼지의 비율은 지상보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 지상에서의 직접 배출이 하층대기에서 혼합되어 희석되는 반면, 2차적인 발생은 지상과 상층 대기 중에 모두 일어나기 때문이다.

미세먼지 중 질산염 성분은 국지적으로 발생한 오염물질을 시사하는 가장 강력한 증거이다. 수도권 자동차 통행량과 서해안에 자리잡은 발전소에서 다량의 NOx 가 배출된다는 것을 감안하였을 때 서울시 미세먼지 중 질산염의 구성비가 높은 것은 놀랄만한 일은 아니다. 이러한 상황은 DC-8의 항공관측 결과를 제시한 그림 1-2에서 확인할 수 있는데,

10 μg m^{-3}을 초과하는 질산염 농도는 한반도의 북서쪽에서 제한적으로 나타나고 있다. 이러한 다량의 질산염은 미세먼지 성분의 30-40%를 차지하고 질량농도로는 10-30 μg m^{-3} 수준이다.

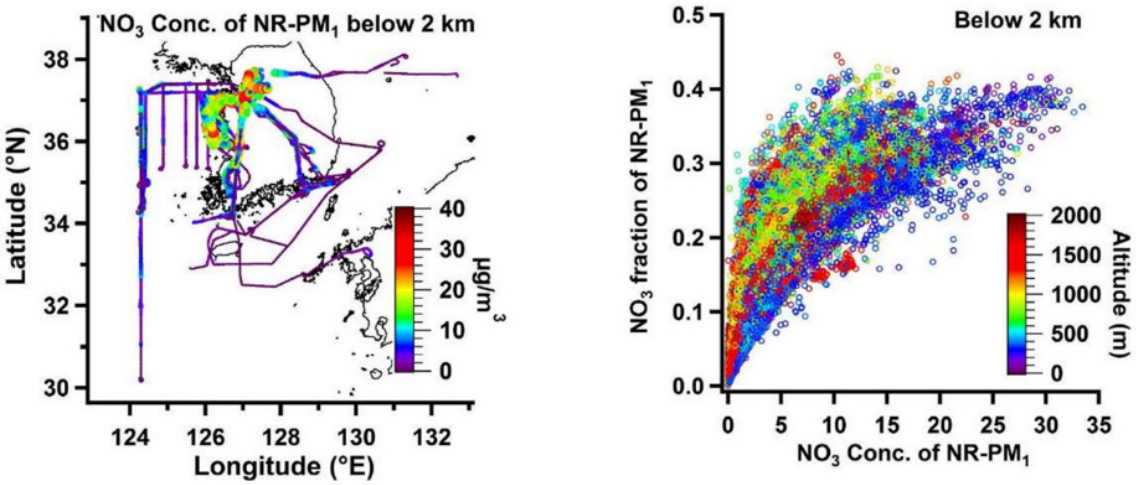


그림 1-2. DC-8에서 관찰한 2 km 이하의 하층 대기 내 미세먼지의 질산염 농도 지도 (좌) 와 질산염 농도 대비 미세먼지에서 질산염이 차지하는 부분 (우) (이태형교수, 한국외국어대학교).

미세먼지에서 가장 많은 부분을 차지하고 있는 유기성분이 국내에서 기원했다는 증거는 그림 1-3 에 나타난 유기에어로졸과 포름알데히드 및 O_x (O_3+NO_2) 간 상관관계에서 찾을 수 있다. 포름알데히드는 주로 휘발성 유기화합물들의 광분해 과정에서 발생한 물질로 유기 미세먼지 형성에 있어 VOCs의 전반적인 영향을 보여주는 훌륭한 지표이다. 수도권에서 톨루엔과 기타 방향족 화합물은 포름알데히드의 화학적 형성에 주원인으로 꼽힌다. 추후 확장 보고서 본에서 더욱 자세히 다루겠지만 이러한 방향족 화합물은 오존 발생에 영향을 미치며 수도권 지역의 기타 VOCs 관여 화학반응에도 지대한 영향을 미친다. NO_2+O_3 의 상관관계를 보면 미세먼지 유기성분은 전반적으로 대기의 산화력 증가와 비례하며, 결국 미세먼지 발생량이 지역 내 화학 생성 반응의 강도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

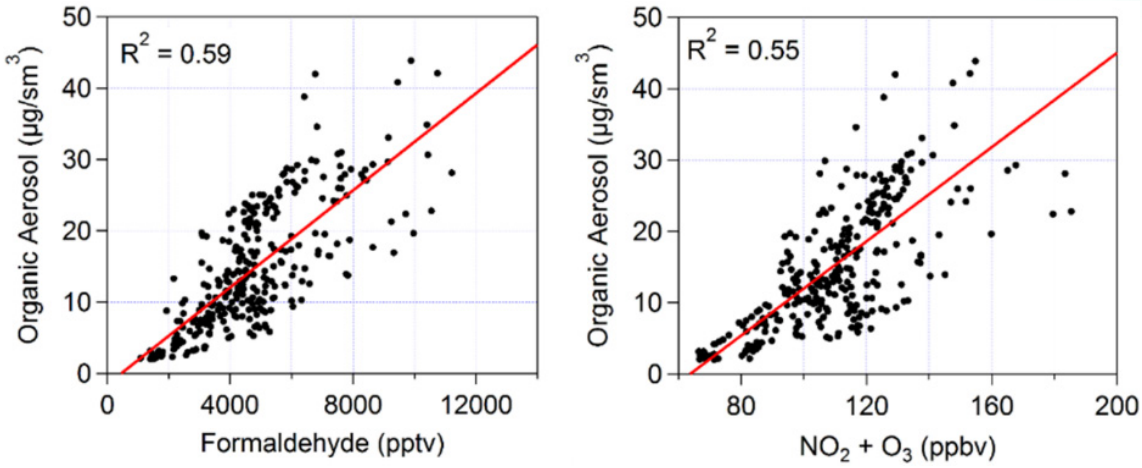


그림 1-3. 서울 상공에서 DC-8이 오후에 관찰한 유기적 미세먼지와 광화학적 지표 간의 상관관계, 포름알데히드 (좌) NO_2+O_3 (우) (Ben Nault, 콜로라도 대학, NASA 제공).

유기 물질과 질소 성분이 미세먼지의 약 반 정도를 차지한다는 것을 감안하면 (그림 1-1 참조) VOCs와 NOx 관리 전략을 통해 지역 내의 2차 생성 미세먼지 오염을 줄일 수 있을 가능성이 높다. 이 두 가지 전구물질들은 오존 오염의 관리에도 매우 중요한데, 이는 다음 섹션에서 보다 자세히 논의될 것이다. 따라서 VOCs와 NOx 배출을 함께 관리하면 시너지를 기대할 수 있을 것이다.

미세먼지로 인한 오염 중에서 주목할 만한 또 다른 성분은 바로 암모니아다. KORUS-AQ 기간 동 안 항공기에서 기체상 암모니아는 측정되지 않았으나 그림 1-1에 나와 있는 암모늄 이온은 황산염과 질산염을 중화시키기에 충분한 양으로서, 2차적인 미세먼지 생성에 다량의 암모니아가 영향을 주었을 것으로 보여 진다. 향후에는 암모니아 측정을 실시함으로써, 2차 생성 미세먼지 발생을 관리하는 데 암모니아를 양을 얼마나 감축해야 하는지 파악하는 것이 중요할 것이다.

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

조사 결과 요약: 서울의 NOx 과잉으로 인해서 VOCs가 오존생성의 제한인자로 작용한다. 오존 생성에 VOCs가 미치는 영향에 대한 심층적 분석에 따르면 반응성 방향족 중 특히 톨루엔이 오존 생성에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서, 방향족 화합물에 대한 정확한 배출원 추적과 평가를 오존관리에 우선순위로 두어야 할 것이다. 서울의 오존 생성에 VOCs가 제한인자임에도 불구하고 서울의 높은NOx 수준은 서울 주변지역 뿐만 아니라 한반도 전체의 오존 생성 문제를 야기하는데, 도심의 NOx가 자연적 VOCs의 발생량이 높은 주변 지역으로 이동하면서 반응하여 오존생성을 촉진시키고 있다. 그러므로 수도권 전체나 광역적 견지에서는 VOCs 와 NOx 모두를 감축해야 한다. NOx 배출감축효과가 즉시적으로 나타나는 $PM_{2.5}$와 달리 오존생성은 NOx과 비선형적 효율성을 가지고 있어 NOx 수준이 매우 높은 지역의 경우 오히려 NOx 저감이 오존을 단기적으로 악화시킬 수 있다.

오존 발생의 원인을 이해하는 것은 매우 어려우며 관측과 모델링을 결합하여 오존 오염 감축 방법을 파악하여야 한다. 오존은 NOx와 VOCs에 선형적인 의존관계를 가지고 있지 않으므로 오존 생성이 NOx에 제한적인지 VOCs에 제한적인지 평가하는 것 만으로는 오존 오염을 줄이는 최상의 방법이라 할 수 없다. KORUS-AQ 기간 동안 DC-8 은 서울의 올림픽 공원과 남동쪽으로 30km떨어진 태화연구림 상공을 다양한 상황 하에서 반복적으로 비행하여 연구함으로써, 도심과 주변지역으로 이어지는 NOx와VOCs의 자연적인 농도 구배를 관측할 수 있었다. DC-8 관측의 요약 내용이 그림 2-1에 나와 있으며 두 지점을 오전, 한낮, 오후로 나누어 비교하였다. 가장 눈에 띄는 차이점은 서울에 비해 태화연구림의 NOx 의 농도가 하루 중 모든 시간대에 있어 현저하게 낮으며 중간 값으로는 태화연구림이 2-6배나 낮았다. 배출원이 적을 뿐만 아니라 희석효과로 인하여, 시외 지역에서는 도심보다 농도가 상당히 낮게 나타나기 때문이다. 앞서 언급한 바와 같이 포름알데히드는 VOCs

화학반응의 일반적인 부산물로서 VOCs 화학반응을 지시하는 유용한 대체물이다. 서울과 태화연구림 두 곳 모두 CH_2O 수준은 비슷하였으며 하루 종일 대략 일정한 수준을 보였다. 이는, 태화연구림의 경우 서울에서 기원한 VOCs의 지속적 산화와 함께 주변 식생에서 나오는 추가적인 VOCs 배출로 인하여 서울의 풍하지역임에도 불구하고 CH_2O 값이 서울과 비슷한 수준에서 유지되는 것으로 추정된다. 두 지점의 오존 수치는 오전부터 오후까지 지속적인 증가를 보였으나 각 시간대별에서 태화연구림이 ~20 ppbv 정도 높은 수치를 보였다.

우측 하단의 그림 2-1은 NASA LaRC 연구소의 광화학상자모델을 이용하여 DC-8 항공기 관측을 제한인자로 평가한 오존 발생율 계산 결과이다. 두 지점에서 순 오존 발생이 가장 높았던 시점은 광화학 반응이 가장 활발한 한낮이었다 (예: 태양각이 가장 높은 시간). 오존 생성의 가장 주된 원인 중 하나인 NOx의 차이가 꽤 컸음에도 불구하고 순 오존 발생은 서울과 태화연구림에서 비슷한 수준을 보였는데, 이 또한 서울시의 오존 생성에 있어 VOCs가 제한인자임을 보여준다 (NOx 포화 상태).

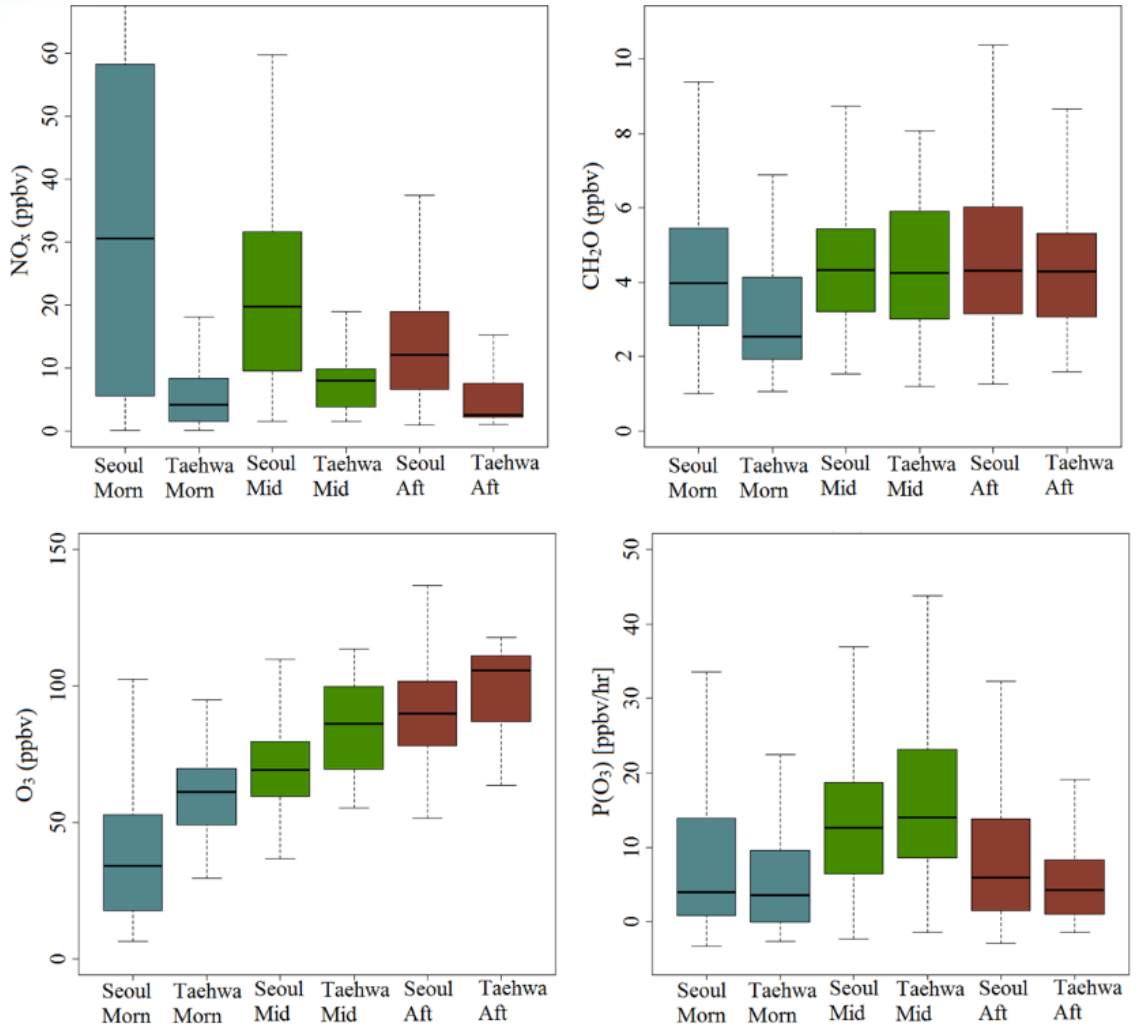


그림 2-1. 서울, 태화연구림 500m 이하 상공에서 DC-8이 오전, 한낮, 오후에 관찰하여 측정한 NOx (좌측 상단), 포름알데히드 (우측 상단), 오존 (좌측 하단)의 분포. 박스는 중간값과 사분위수 이내의 값을 나타내며 선은5와 95 퍼센트 값임. 우측 하단 패널은 DC-8 관찰과 박스 모델 계산을 통한 순 오존 발생율의 분포를 나타냄 (Jason Schroeder, NASA 제공).

VOCs에 대한 오존 생성의 민감도를 더욱 잘 이해하기 위하여, 대기 중에서 관측된 다양한 VOCs종들을 제거해 가며 각기 광화학 오존 생성반응에 어떤 영향을 주는지 추가적인 박스 모델 계산을 하였다. 그림 2-2는 'DC-8관측 결과 전체를 사용하여 도출한 오존 발생율'과 '단일의 탄화수소나 VOCs 그룹을 모델 시뮬레이션에서 제거하여 계산한 값'을 비교한 것이다. 결론적으로 C7+ 방향족 화합물 (톨루엔, 벤젠, 에틸벤젠, 자일렌)이 오존 발생에 있어 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 화합물을 계산에서 제외하면 오존 발생은 10-60 ppbv/hr 에서10 ppbv/hr로 떨어진다. 다른 VOCs는 미미한 영향을 미치는 반면 이소프렌은 오존 발생에 있어 측정 가능한 수준의 영향을 미치는 또 다른 화합물이다. C7+ 방향족과 이소프렌의 가장 큰 차이점은 그 발생원이다. 관리 가능한 인위적인 산업활동을 고려하면 C7+ 방향족은 오존 (뿐만 아니라 미세먼지도 포함) 오염 감축을 위한 효과적인 감축 대상이 될 수 있다. 반면, 식생에서 자연 배출되는 이소프렌은 오존 생성기작을 이해하기 위해서 관측항목에 포함시켜야 하지만 오존 오염 저감의 관리 및 목표 대상으로는 적합하지 않다.

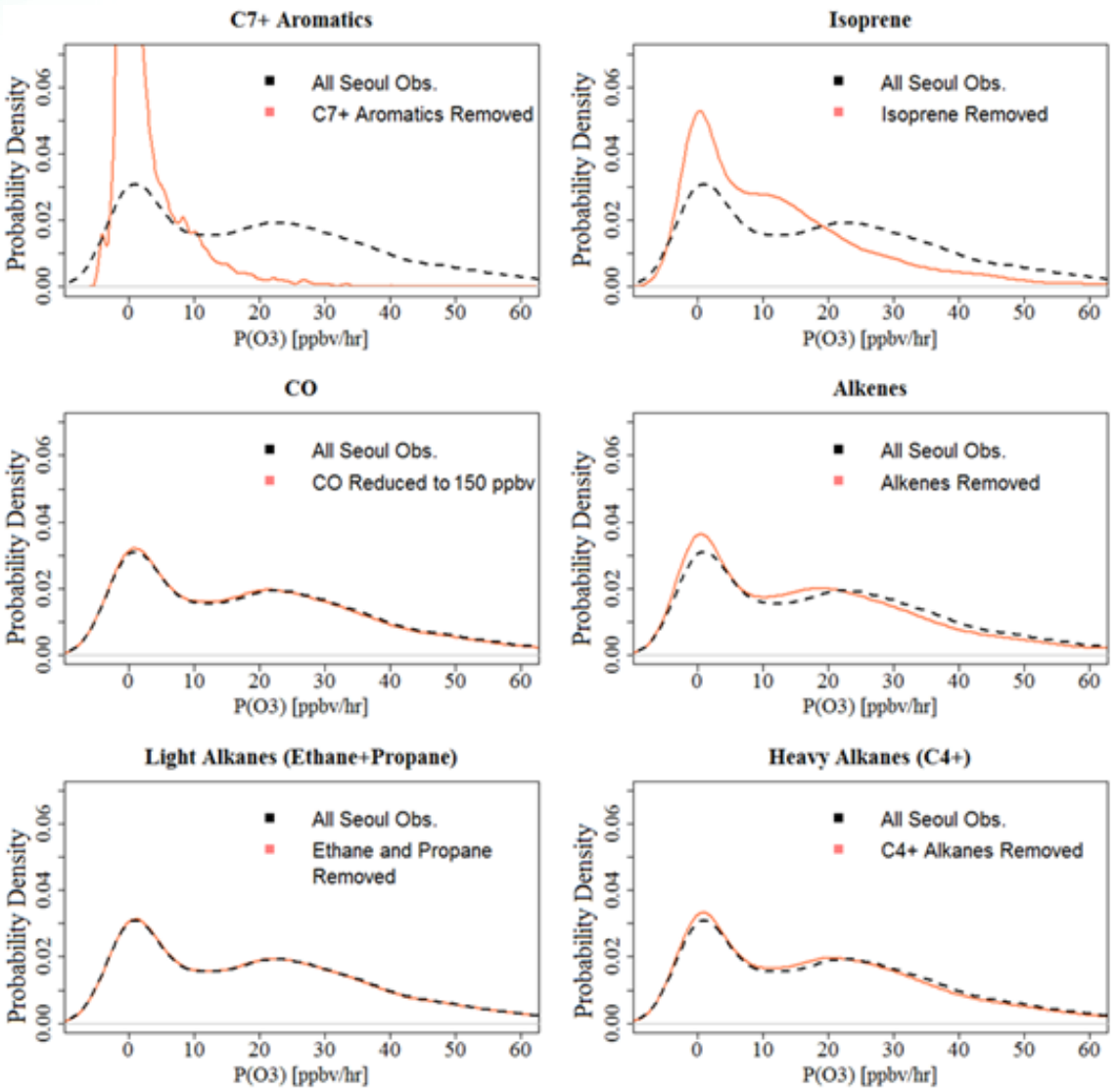


그림 2-2. 각기 다른 VOCs종에 따른 순 오존 발생의 민감도. 각각의 패널에서 검은 색은 서울 상공에서 DC-8이 관찰한 전체 내용을 기준으로 계산한 순 오존 발생율의 분포를 나타내며 주황색 선은 특정 VOCs의 종류를 제거하였을 때 계산된 값의 변화를 나타냄 (Jason Schroeder, NASA 제공).

C7+ 방향족 감소가 서울 지역의 오존 저감으로 이어질 수 있지만, 풍하지역에서는 여전히 오존 발생 문제가 나타날 수 있다. NOx의 농도가 낮음에도 불구하고 태화연구림의 오존 농도가 높게 유지되는 것은 (그림 2-1 참조), 서울에서의 매우 높은 NOx가 풍하측의 주변지역에 지속적으로 오존을 생성 및 확산시키기 때문인 것으로 나타났다. 더욱 광범위한 수준에서, KORUS-AQ 기간 동안 서울과 인근지역 (경기도)의 대기오염측정망 자료를 비교하였다 (그림에 비포함). 그 결과, 경기도의 1시간 일 최대 오존 기준 (1-hour daily maximum ozone standard) 초과 횟수가 서울의 두 배에 달하며, 일 최대 1시간 오존 평균이 서울보다 10 ppbv 이상 높은 것으로 나타났다 (경기도74 ppbv, 서울 62 ppbv). 따라서 그림 2-1에서와 같이, 서울에서부터 주변 지역으로 NOx의 농도 구배가 크게 나타남에도 불구하고 NOx 는 매우 광범위한 지역에 걸쳐 포화 상태를 보이고 있으므로, 수도권 및 주변지역을 포함하여 전반적으로 오존 오염의 발생을 제한할 수 있는 유일한 방법은 NOx배출량을 감축하는 것이다.

NOx에서의 변화와 오존의 화학반응 간 비선형적 관계가 존재한다는 것을 인식해야 한다. 즉, 지역 전반에 대해서는 NOx 감소가 오존 발생량의 저감으로 이어질테지만, 일부 지역의 경우 NOx 관리의 도입에 따라 오히려 오존 생성의 효율이 높아져 방향족 VOCs 감축 효과가 일부 상쇄될 것이다. 이러한 비선형성을 이해하기 위해서는 서울 인근 지역과 한반도의 NOx및 CH_2O 의 분포에 대해 최대한 상세한 정보를 수집하는 것이 필요하다. GEMS 위성이 제공하는 시간별 정보는 이러한 진행과정을 모니터링 하는 데 있어 매우 강력한 도구로 사용할 수 있을 것이다. 그림 2-3에서는 2016년 6월 9일 NASA의 B200 항공기가 관측한 서울 인근의 NO_2 분포를 나타내었다. 해당 관측은 GEMS와 유사한 항공기구인 Geo-TASO 기구를 이용하여 수행하였다. 사진에는 NO_2 농도가 도시지역에서 높고 주변 지역에서는 낮은 것이 극명하게 비교되어 나타난다. GEMS 위성관측에 CH_2O 관측을 병행하여, NOx와 VOCs간 교차지점의 변화와 관련하여 중요한 정보를 얻을 수 있다.

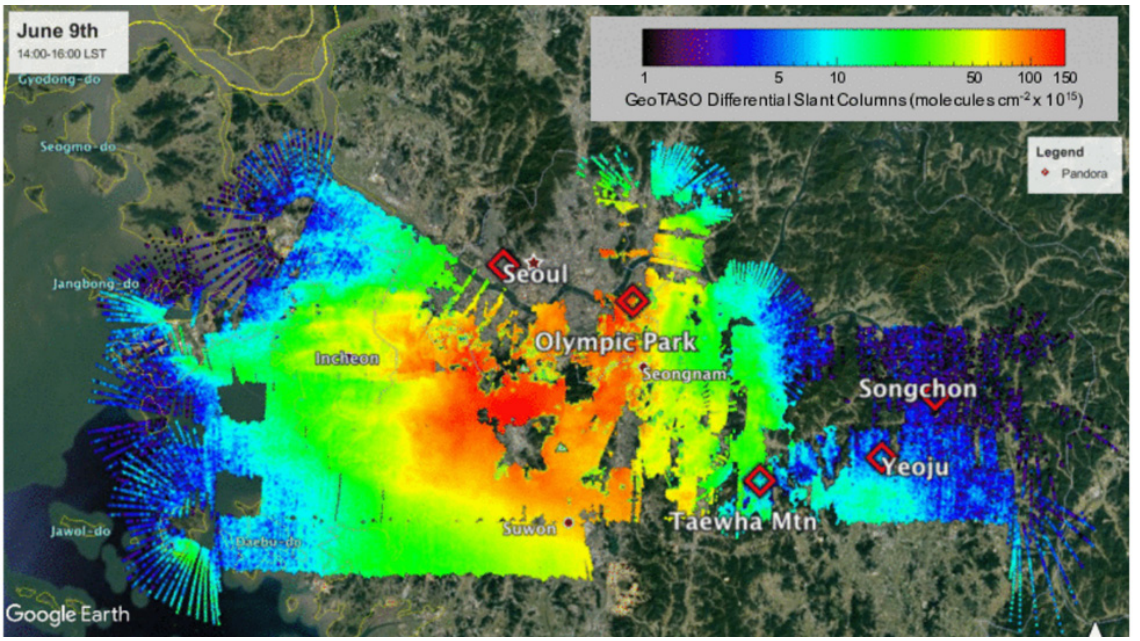


그림 2-3. 2016년 6월 9일 에 NASA B200 항공기의 Geo-TASO 기구에서 관측한 서울 인근 지역의 NO_2 분포. Geo-TASO 는 GEMS와 유사한 항공 기구임. 2시간 동안의 컬럼 농도 산정결과임 (Laura Judd, NASA 제공).

KORUS-AQ의 오존 수직분포 조사를 통해 밝혀진 바와 같이 (그림 2-4), 한국 상공의 광범위한 영역에 걸쳐 과다한 양의 오존이 수직적으로 분포되어 있는데, 이는 오존 감축 노력 시 중요하게 고려해야 한다.

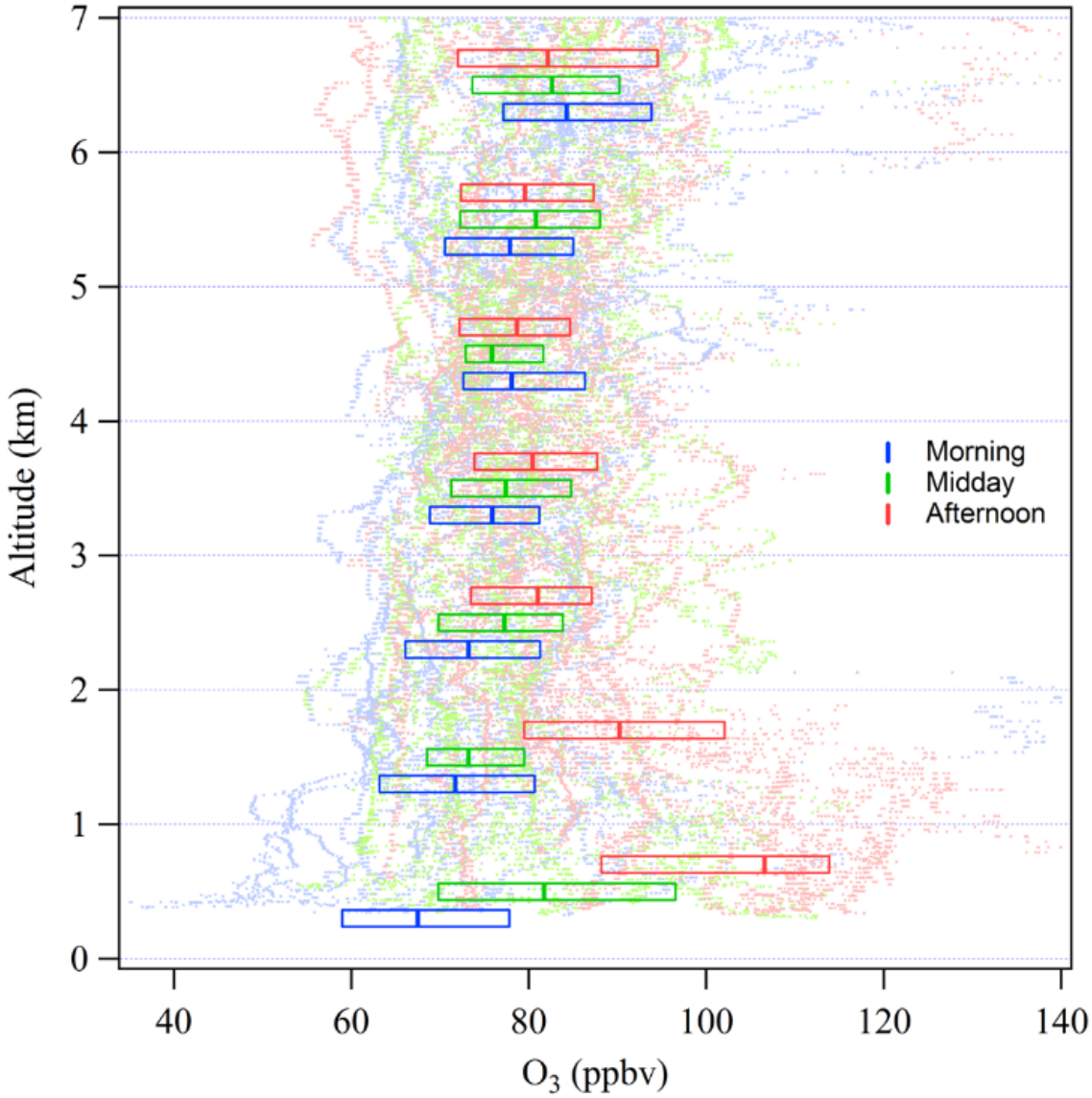


그림 2-4. 서울의 남동쪽에 위치한 태화연구림 인근에서 DC-8이 52건의 고도별 관측 수행 중 관찰한 오존의 수직적 분포. 박스는1km 구간에 따라 개별 측정 값의 중간값과 사분위 값을 나타냄 (Jason Schroeder, NASA 제공).

그림 2-4에서는, KORUS-AQ 기간 동안 대개 서울 인근 지역 대류권 오존 농도가 계속해서 60 ppbv이상이었음을 나타내고 있다. 지역 내 오염물질 배출과 광화학적 반응이 오존에 미치는 영향의 경우, 2km고도 이하에서 가장 극명히 나타나며 오전에서 오후로 갈수록 증가하는 것이 나타났다. 한편, 고도가 2-3km를 넘어서면 중간값이 75-80ppbv인 오존층이 관측되었으며 해당값은 시간에 따른 큰 변동을 보이지 않았다. 이처럼 오존층이 존재한다 하더라도, 지표면에서는 극단적 수준의 오존 고농도 사례가 나타나지 않을 것으로 보인다. 그러나 한국의 경계층 (boundary layer)에서는 광화학 반응에 따른 평균 오존 발생량이 감소함에 따라, 해당 오존층에서부터 하향 혼합이 발생하므로, 오존 8시간 기준 (60 ppbv)을 달성하는 것이 어려울 수 있다. 이처럼 상층에서 관측되는 고농도 오존을 줄이기 위해서는 아시아 및 북반구 전역에서 국제적 차원의 노력이 이루어져야 할 것이다. 따라서 광범위한 지역 및 북반구의 영향이라는 맥락에서 국내 오존 관리 전략의 효과를 평가할 수 있도록, 수도권 지역 대상 상층 관측을 포함하여 대류권 전체에 대한 지속적인 오존 관측을 수행해야 한다.

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

조사 결과 요약: KORUS-AQ 관측결과와 배출량 자료를 사용한 모델 모의값의 비교에서, 현재의 오염물질 배출 예측치가 과소평가 되었음이 나타났다. 특정 점 오염원과 인접한 곳의 샘플링 결과를 보면 관측된 농도가 보고된 배출량을 기준으로 예측한 양을 초과하고 있다.

오염물질 배출량은 대기질 모델의 핵심적인 자료로서 지속적인 주의가 필요하다. 배출량은 일별, 계절별, 연간 스케일 등에서 복잡한 변동성을 나타낸다. 최고 수준의 배출원 자료를 확보하였더라도 하더라도, 해당 자료의 정확도 평가를 위하여 현장 조사가 필요하다. 일반적으로 배출량 자료와 현장관측 간 차이가 다수 발견되며 특히 과소평가 된 부분들이 많다. KORUS-AQ 관측결과를 이용하여 오염물질 배출을 평가하고 개선하는 것은, 현재의 배출과 대기질 상태 간 관계를 이해하고 향후 배출 저감 전략을 통해 무엇을 얻을 수 있을지 효과적으로 예측하는 데 매우 중요하다.

그림 3-1은 방향족 VOCs와 NOx 를 대상으로, DC-8 관측과 몇 가지 모델의 예측 결과를 비교한 것이다. 모델들 간에는 상당한 차이가 있으나 모든 모델은 일관되게 관측값보다 낮은 수준을 보여주고 있어 저평가된 오염물질 배출량이 모델값에 영향을 미치는 주요한 요인임을 알 수 있다. 더 나아가 이러한 차이는 $PM_{2.5}$와 오존에 대한 예측에 추가적으로 영향을 미칠 것이다.

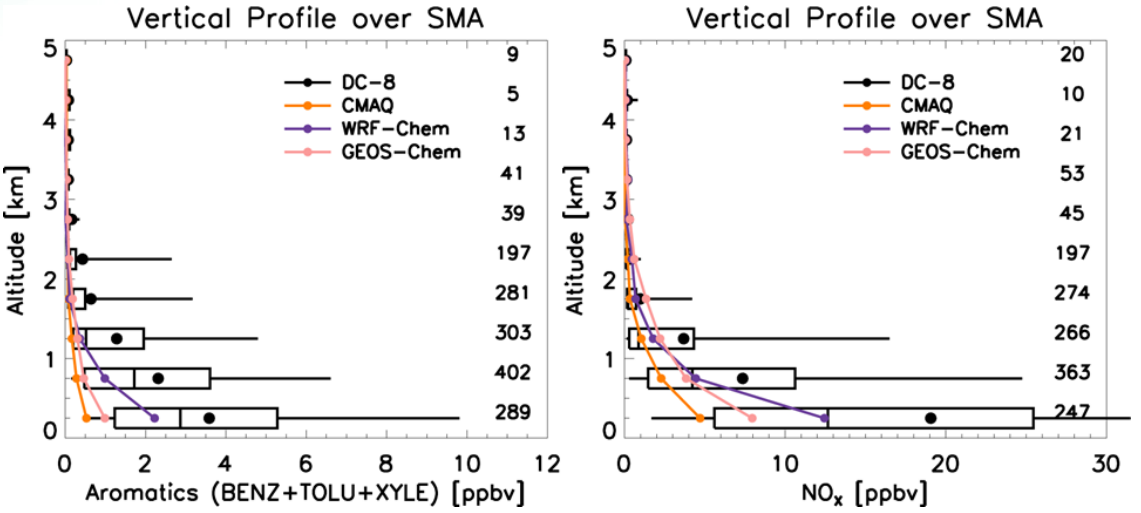


그림 3-1. KORUS-AQ 기간 동안 서울의 하층 대기에 대한DC-8의 관측과 모델 모의값 비교. VOCs (좌), NOx (우) (박록진, 서울대제공).

올림픽 공원에서의 상세 지상 관측을 통해, 과소평가의 원인 관련 과학적 단서를 얻을 수 있다. 그림 3-2에 제시한 바와 같이, 관측 결과와 모델 간의 차이는 일별로 상당한 변동성을 보인다. 이 변동성은 교통 패턴, 화학 작용, 주중, 주말, 휴일의 오염물질 배출의 차이와 관련이 있는 바, 향후 KORUS-AQ 분석의 주요 주제로 다루어질 것이다. 역 모델링과 같은 고도화된 기법을 사용하여 과소평가의 주된 요인들을 찾아낼 것이다.

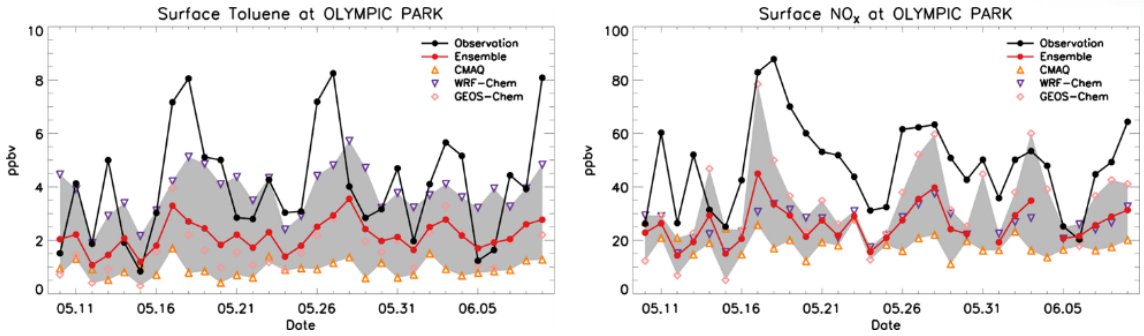


그림 3-2. KORUS-AQ 기간 동안 올림픽 공원에서 관측된 톨루엔 (좌)과 NOx (우)에 대한 모델 모의 값 비교 (Rokjin Park, Seoul National University 제공).

톨루엔과 기타 방향족 화합물의 경우 수도권에서 반응성이 높을 뿐만 아니라, 대기오염에 대한 전반적 기여도가 크기 때문에, 해당 물질들의 배출량에 대한 과소평가가 주 원인이 되어 모델과 관측 결과 간 큰 차이가 나타난다. 그림 3-3 은 DC-8에서 관측한 VOCs의 반응성을 가중치로 적용한 종 분화를 보여주고 있으며 이를 보면 방향족이 가장 주요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

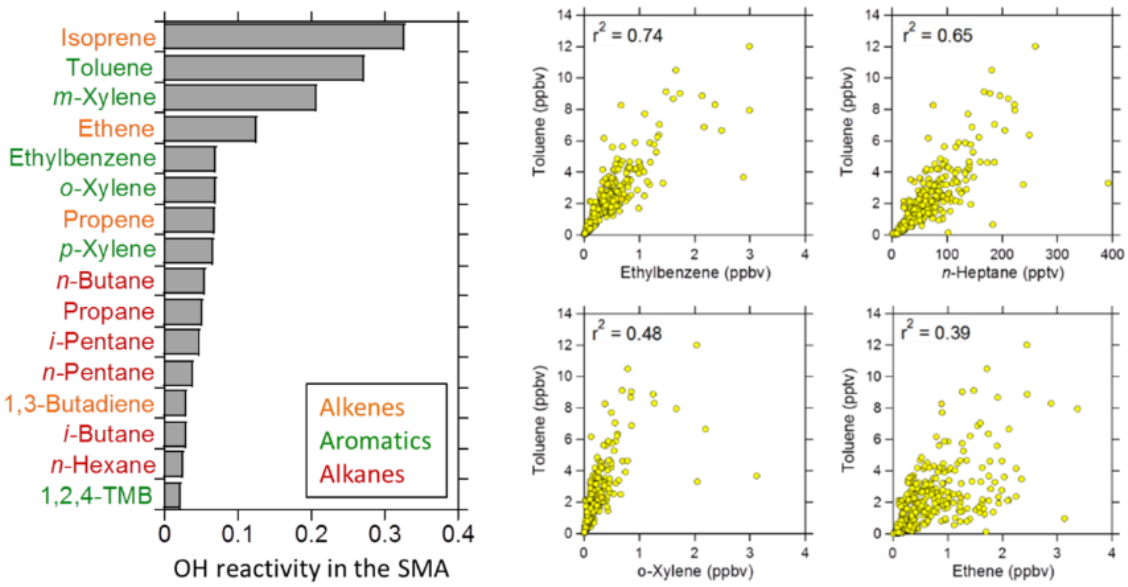


그림 3-3. OH 반응성을 기준으로 서울 인근 지역에서 관측된 VOCs의 상대적 중요성 (좌) 가능성이 높은 오염원을 파악하는 데 유용한 VOCs 상관관계 (우) (Isobel Simpson, University of California, Irvine 제공).

방향족 화합물이 배출될 가능성이 가장 높은 곳은 용제를 사용하는 곳으로 추정할 수 있다. 그러나 구체적인 오염원을 파악하는 데는 더 많은 조사가 필요하다. 예를 들어, 홍콩에서 수행된 과거의 조사를 보면 톨루엔과 에틸벤젠 또는, 톨루엔과 자일렌간의 강력한 상관관계가 건설용 페인트에서 나타난다. 추가적으로 벤젠, n-헥산, n-헵탄은 소비재와 인쇄에서 발견된다. 에탄, 프로필렌 등은 자동차 배기가스에서 발생하는 것으로 추정된다. 이러한 관계를 적용하면 (그림 3-3 참조), 초기 분석 결과 톨루엔은 에탄이나 프로필렌과 같이 자동차 사용 관련 물질과 낮은 상관관계를 갖는 것을 알 수 있다. 다수의 용제들은 에틸벤젠, n-헥산, n-헵탄과 상관관계가 더욱 높게 나타났다. 톨루엔과 자일렌 간 낮은 상관관계는 자일렌을 배출하는 기타 배출원의 존재 가능성을 시사한다. 예를 들어, 자일렌은 톨루엔보다 건조가 늦으며 다양한 용제와 함께 사용될 수 있다. DC-8에서 수집된 데이터의 마무리와 추가 분석 그리고 다른 지상 관측소에서 수집된 데이터를 통하여 방향족에 대한 보다 확정적인 결론을 내야 할 것이다.

NOx와 VOCs를 과소평가했던 것과는 달리, SO_2에 대해서는 모델들이 일관되게 과소평가하지 않았으며, 이는 오염물질 배출이 잘 파악되었거나 심지어 과대평가 되었을 수도 있음을 나타낸다 (그림 3-4 참조). NOx 와 VOCs와의 비교를 통해 알 수 있는 또 하나 큰 차이점은 대개의SO_2 배출이 발전소와 같은 점 오염원에 의해 발생한다는 것이다.

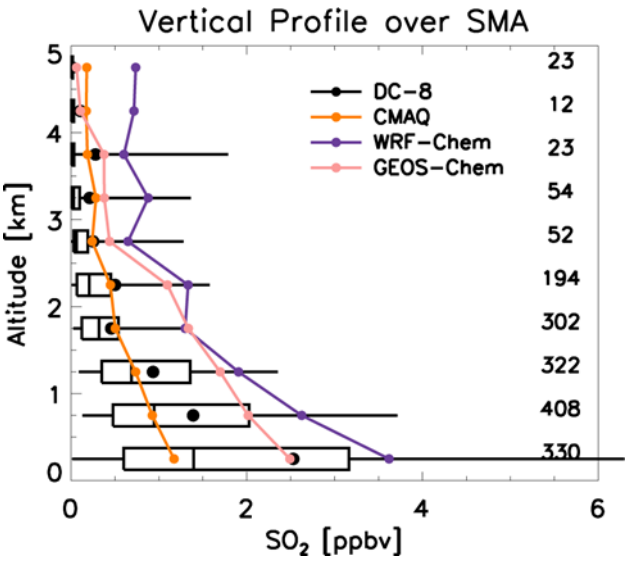


그림 3-4. KORUS-AQ 기간동안 서울 하층대기에서 이루어진 DC-8의 SO_2관측값과 모델 모의값의 비교 (Rokjin Park, Seoul National University 제공).

KORUS-AQ 기간 동안 다수의 발전소와 기타 시설에 대해 NASA DC-8과 한서대의 킹 에어를 이용하여 점 오염원에 대한 직접 샘플링이 이루어졌다. 수집된 자료에 대한 일차 분석이 현재 진행 중으로 오염물질 배출을 확인하고 있다. 초동 결과에 따르면 발전소의 오염물질 배출은 항공기 관측 내용과 비슷하지만 분석의 불확실성이 높으며 특히 미풍 하의 상황에서 그러하여 추가적인 분석이 진행 중이다. 다른 분석에 따르면 일부 시설에서의 오염물질 배출이 기대했던 수준보다 훨씬 더 높았다. 그림 3-5는 2016년 6월 5일 대산 화학 단지 내 공장에서 휘발성 유기 화합물 (VOCs) 에 대한 관측이 어떻게 이루어졌는지를 보여주고 있다.

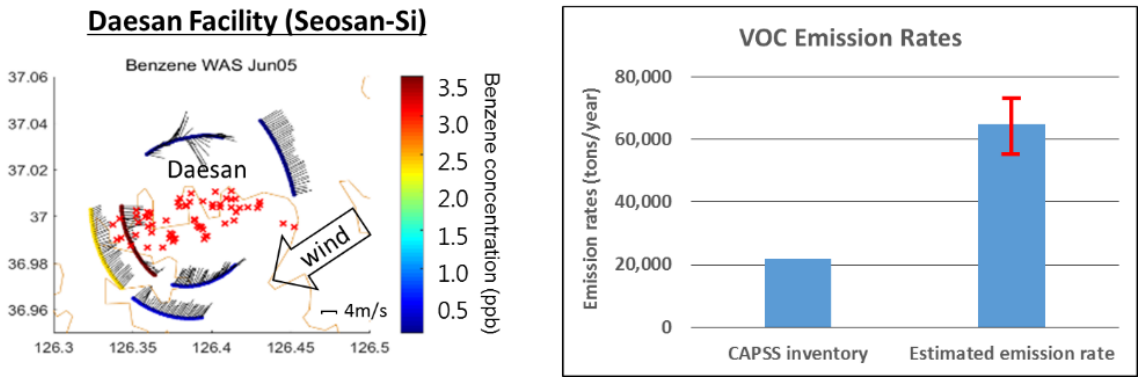


그림 3-5. 대산 화학 단지의 VOCs 배출 예측치 (좌). 이 예측치를 CAPSS의 서산시 전체에 대한 배출 목록과 비교함 (우) (Seokhan Jeong, GIST 제공).

추정 배출율은 물질 수지 접근법에 기반하여 관측된 바람장과 VOCs를 감안하여 도출되었다. CAPSS (Clean Air Quality Support System) 배출 목록 값은 전체 구역에 대한 것임을 감안하는 것이 중요하다. 서산시의 경우 배출 목록 값은 대산 화학 단지의 연기 관측을 통한 추정치보다 3배정도 더 낮다. 이러한 연기에 대한 지속적인 분석이 오염물질 배출 검증과 KORUS-AQ 연구단이 진행하는 평가에 있어 중요한 부분이다.

질문 4: 서해안 인근의 대규모 점오염원이, 시간 및 공간적 측면에서 수도권지역의 대기질에 얼마나 영향을 미치는가?

조사 결과 요약: 수도권지역의 남쪽 부근에서 점오염원의 영향이 더욱 강하게 나타났다. 다만, 배출물질 관련 추가적인 검증을 통하여 더욱 정확하게 해당 영향을 정량화한 후, 미세먼지 및 오존에 대한 이들 배출물질의 기여도를 분석하는 것이 필요하다. 배출 시설의 근로자 및 주변 인구의 건강과 안전을 고려하여 위해성이 큰 물질에 주의해야 할 것이다.

KORUS-AQ 조사 기간 동안, 서울의 풍향은 대형 점오염원이 많이 위치하고 있는 남서쪽으로부터 불어오는 남서풍이 많았다. 특히 서해안의 5개 발전소와 대산 화학 단지는 대형 점 오염원으로서 서울과 인근 지역에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 이러한 점 오염원들은 DC-8과 한서대의 King-air가 직접 샘플링하였으며 오염물질 배출 검증을 위해 추가적인 분석 작업이 진행중이다.

서울 인근 지역의 NOx와 SO_2 에 대하여 이들 발전소가 끼치는 영향을 파악하고자, CALPUFF 모델을 사용한 시뮬레이션이 진행되었다. CALPUFF 모델은 이러한 오염물질의 이동과 희석을 시뮬레이션 하는 모델로서 CleanSYS 굴뚝 원격 모니터링 시스템으로부터의 실시간 관측 내용을 기반으로 한다.

그림 4-1은 KORUS-AQ기간동안 진행된 NOx와 SO_2 대상 여러 건의 CALPUFF 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 본 시뮬레이션 결과 태안 발전소가 가장 중요한 점 오염원으로 부각되었다. 대산 화학 단지의 경우 본 시뮬레이션에 포함되어 있지 않지만, 이 화학 단지와 태안 발전소의 지리적 근접성을 감안하면 이러한 오염물질의 이동을 어느 정도 추정해 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과 서울 인근 지역의 남쪽 부근이 가장 많은 영향을 받고 있는 것으로 나타나고 있으며, 서울에 대해서는 상대적으로 영향이 적게 나타난다. 대기오염측정망의 측정에 따르면 서울에 비해 경기 지역에서 오존 수준이 상대적으로 높게 기록되었는데, 여기서 이들 점오염원의 배출물질이 추가적 요인으로 기여한 바 있을 것이다.

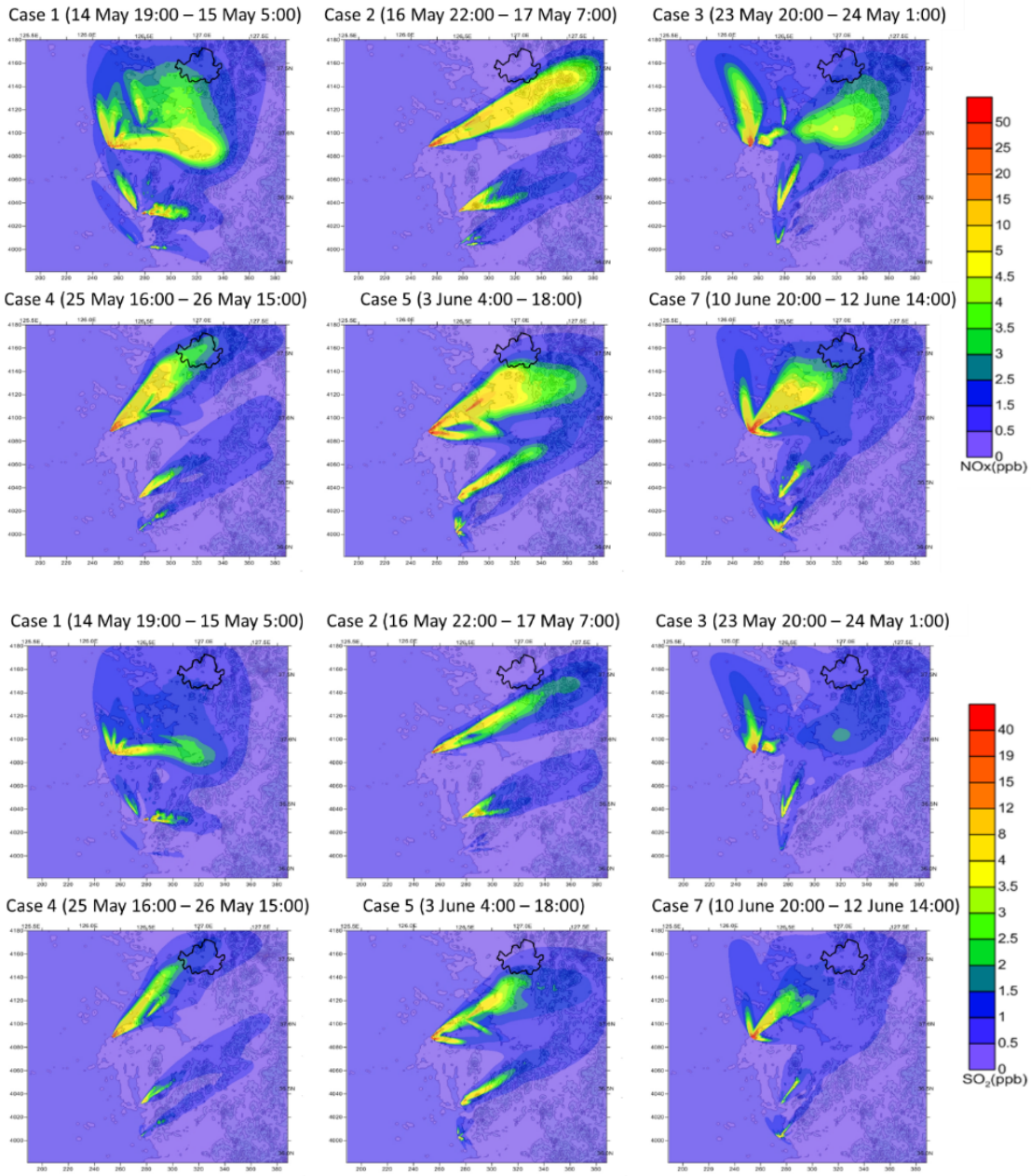


그림 4-1. 발전소의 NOx 배출에 대한 CALPUFF시뮬레이션 (상단의 여섯 개 패널)과 SO_2 배출에 대한 시뮬레이션 (하단의 여섯 개 패널) 및 특정일에 지역에 끼치는 영향. 서울의 경계는 검정색으로 표시 (안준영, 국립환경과학원 제공).

이들 점 오염원에 상당히 인접한 부근에서 추출한 표본을 통해, 위해성이 큰 물질에 대한 발전소 노동자와 주변 인구의 노출 관련 추가적 우려가 있다는 것이 나타났다. 그림 4-2는 대산 화학 단지 상공을 비행할 당시 관찰된 다량의 벤젠과 1,3 부타디엔 농도의 분포이다. 이 두 가지 물질은 발암물질로 알려져 있다. 위도별로 나타낸 자료를 보면 화학 단지 배출연기 내 농도값이 지역 평균 값보다 몇 십 배 높은 것을 보여주었다. KORUS-AQ 기간 동안 최소 25가지의 VOCs 농도가 대산 화학 단지 상공에서 가장 높았다. 이는 항공기 자료이므로 지상 관측소에서의 값은 더 높을 것으로 예상된다. 이는 이 시설의 작업자들과 인근 주민들 또는 자주 방문하는 방문자의 건강에 장기적으로 영향을 미칠 가능성에 대한 우려를 제기하고 있다. 이러한 양상은 벤젠과 1,3 부타디엔을 배출하는 캐나다, 미국, 스웨덴의 산업 지대의 풍하 지역에서도 관측된 바 있다.

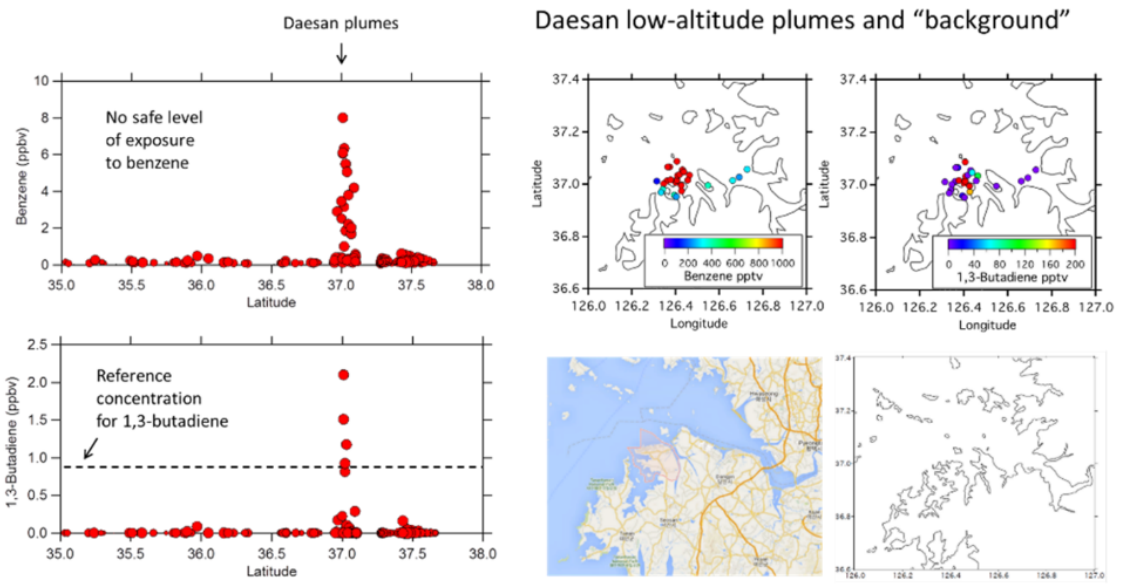


그림 4-2. 대산 화학 단지 상공에서 측정된 벤젠과 부타디엔. 좌측에 관찰값과 위도가 표시되어 있으며 대산 화학단지의 굴뚝은 ~37N에 위치해 있음이 자명함. 오른쪽의 지도는 굴뚝의 지리적 위치를 나타냄 (Isobel Simpson, University of California-Irvine 제공).

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

조사 결과 요약: 서울 인근 지역의 대기의 질은 국지적인 규모의 기상조건에 따라 매우 급격하게 바뀔 수 있어서 예측을 하기가 매우 어려우며 앞으로 이에 주목할 필요가 있다. KORUS-AQ 조사의 대부분 기간 동안에는 장거리 이동이 오염의 주원인으로 나타나지 않았지만, 짧은 기간 중 중국으로부터의 유입으로 인해 $PM_{2.5}$오염이 극대화된 적은 있었다. 미세먼지 발생에서 국내요인과 유입요인 간 비중을 산정하는 데에는 모델을 사용하나, 모델 결과를 관측결과와 상세히 비교분석함으로써 모델 성능을 검증하는 것이 필요하다.

서울은 여러 스케일에서 이동성 오염물질의 영향을 받는다 (국지적으로 발생한 오염물질에서부터, 아시아 지역 및 북반구에서 유입된 것까지 다양한 측면). 육풍과 해풍, 그리고 서울의 복잡한 지형은 매우 짧은 시간 내에 오염물질의 확산에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그림 5-1에 그 예가 나타나 있다. 서울 남동부의 방이동 (올림픽 공원)에 설치된 KORUS-AQ 핵심관측소에서는, 5월 19-20일에 해풍 전선이 통과함에 따라 오존과 블랙카본 농도의 급격한 변화가 관측되었다. 두 번의 각기 다른 시점에서 오존 농도는 5분 내 거의 40 ppbv 만큼 변화하였다. 이는 강한 육풍 또는 해풍으로 인한 대기오염물질의 이동을 보여주는 일례이다. 같은 날 대기오염측정망 관측결과를 보면, 수도권 전역에 걸쳐 서쪽에서 동쪽으로 고농도 오존이 이동하는 것을 알 수 있었다. 이는 각각의 에피소드에 대한 이해와 예보 성능 개선을 위해 대기오염측정망 관측자료를 1시간 평균이 아닌 보다 고해상도 시간 자료를 확보하는 것이 얼마나 중요한 것인지를 보여준다. 이러한 정보는 서울 인근 지역의 지형과 기상에 맞추어 고해상도 예보 모델을 이용하여 대기의 질을 평가하는 데 있어 필수적이다.

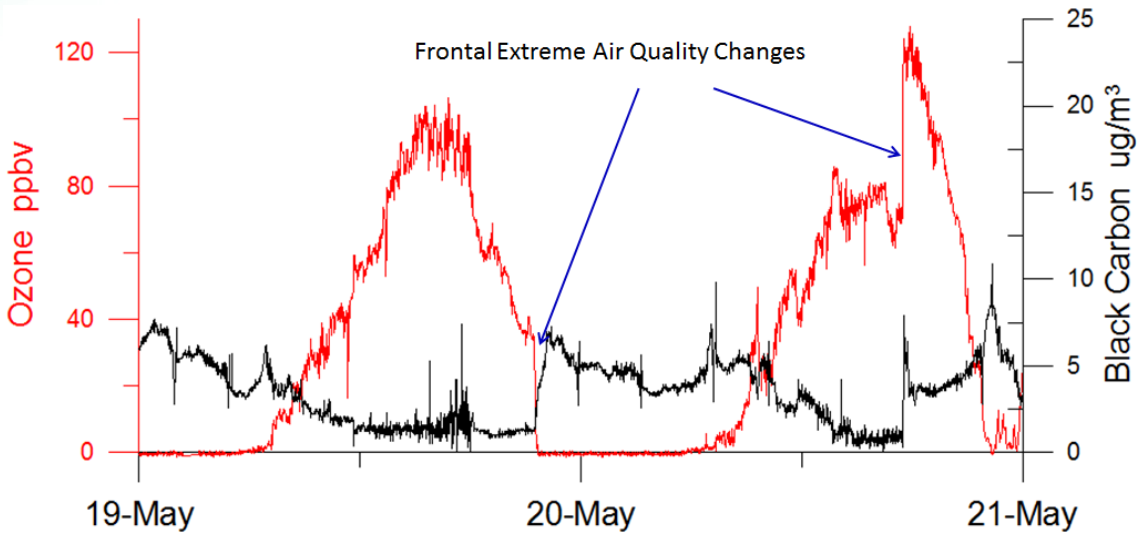


그림5-1. 2016년 5월 19-20일에 올림픽 공원의 관측소에서 측정한 오존과 블랙 카본의 급격한 농도 변화 (이강웅, 한국외국어대학교 제공).

5월 25일-28일 동안 중국으로부터의 강력한 유입으로 인해 미세먼지 농도가 한국의 대기환경기준을 초과하였다. 이 기간 동안의 기상과 그 후의 침체 상태는 도입 부분의 그림 3에 나타나 있다. 그림 5-2 는 이 두 기간 동안의 오존과 $PM_{2.5}$ 의 수준을 보여주고 있다. 이 기간 동안 오존에는 큰 차이가 없지만 $PM_{2.5}$ 는 중국으로부터의 직접적인 유입으로 인해 대략 두 배로 증가하여 KORUS-AQ 조사 기간 동안 가장 심한 미세먼지 오염도를 보였다.

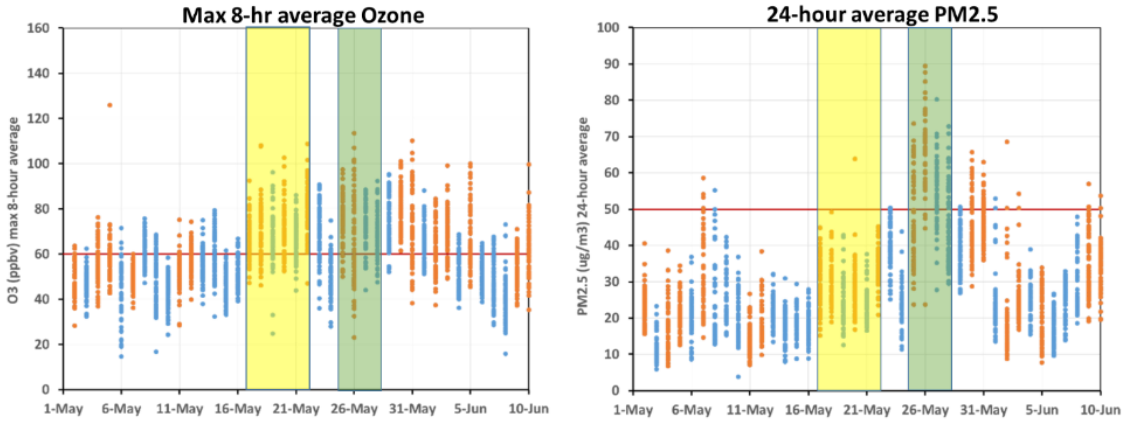


그림 5-2. 2016년 5월1일-6월 10까지 진행된 KORUS-AQ 현장 조사 기간 중 서울, 부산, 광주의 특정 대기오염측정망에서 측정한 O_3 와 $PM_{2.5}$ 값. 각각의 지상 관측소에서 관찰된 일별 수치를 한국의 대기환경기준과 비교함. 항공 데이터 수집일은 주황색으로 표시되어 있으며 비행일자들이 적절하게 대기질 상황의 범위를 샘플링 했음을 나타냄. 노란색으로 표시된 기간은 대기 정체기간 (노랑)과 녹색으로 표시된 기간은 중국으로부터의 직접적인 먼지 이동 기간을 나타냄 (Jim Crawford, NASA 제공).

이 오염물질의 장거리유입에 대한 직접적인 증거는 그림 5-3에 나타나 있다. 좌측 패널은 GOCI 위성에 나타난 미세먼지의 광학적 깊이를 보여주고 있는데 한국의 서해안 쪽에서 매우 높은 수치가 관측되었다. 한반도 상공을 직접적으로 관찰하지 못한 것은 구름과 관련이 있다. 미세먼지의 유입 시기 동안 구름이 많아짐에 따라 위성 관측이 더 어려워지므로 이러한 관측은 지상 관측소 또는 항공 관측 및 모델 시뮬레이션과 함께 해석되어야 한다는 것을 다시 한번 상기하는 바이다. 오른쪽 패널은 DC-8기에 장착된 High Spectral Resolution Lidar (HSRL)가 제공한 보충정보이다. 미세먼지 소멸 프로파일과 KORUS-AQ 연구 전체의 평균을 비교하면 이 기간 동안 대기오염측정망의 $PM_{2.5}$ 수치가 많이 높아진 것임을 확증해준다. $PM_{2.5}$ 를 관측하기 위해 AOD와 라이다를 활용할 경우 한 가지 유의할 요소가 있는데 그것은 바로 습도이다. 습도가 높으면 미세먼지의 크기가 커지면서 산란이 더 강해지고 미세먼지의 양 대비 AOD가 더 높아진다. $PM_{2.5}$ 측정 수치는 건조한 미세먼지를 기준으로 한 것이므로, 이 경우 AOD 의 차이가 $PM_{2.5}$의 차이보다 더 클 수도 있다.

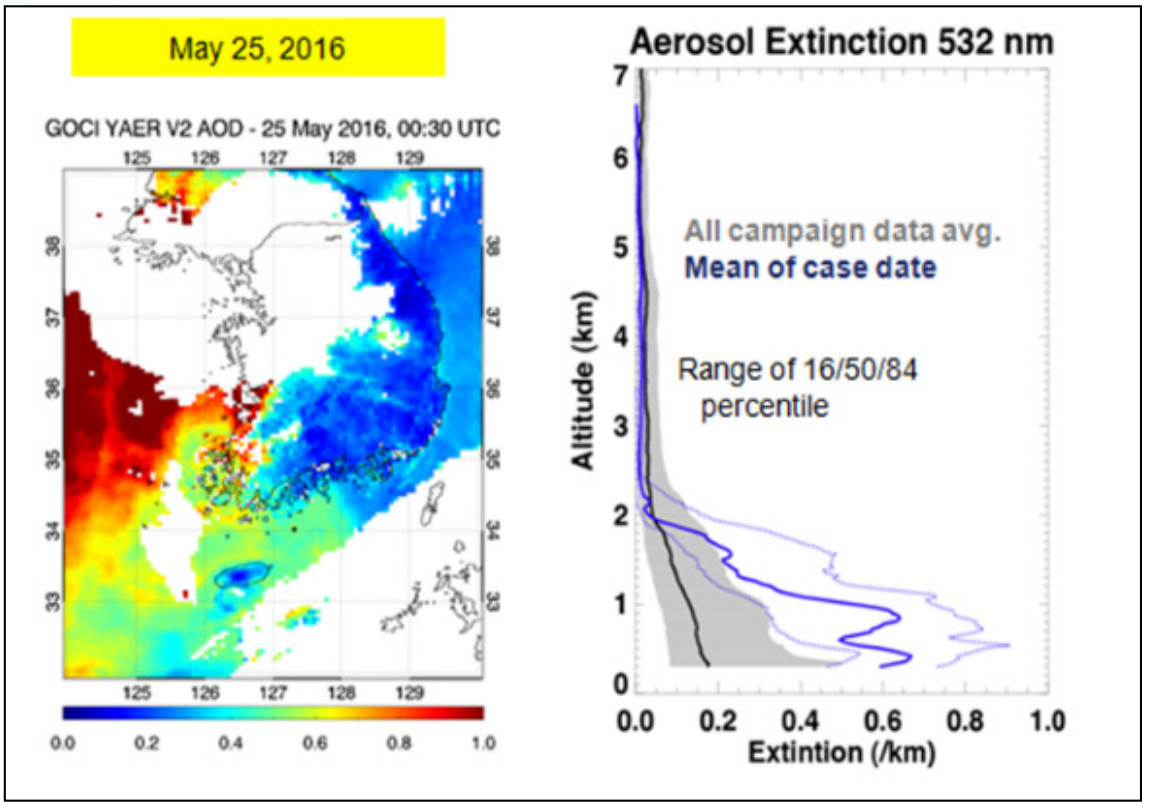
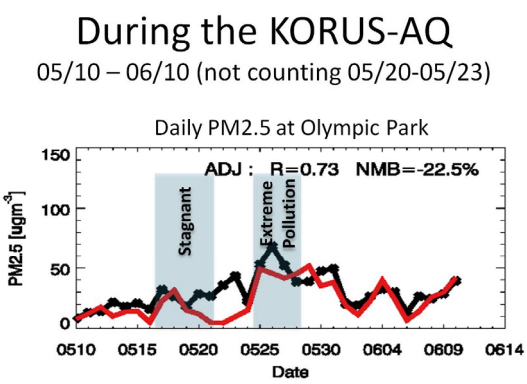


Figure 5-3. GOCI 위성으로 얻어진 AOD 결과 (왼쪽 패널)과 2016년 5월 25일 DC-8의 HSRL 측정장비로 측정된 aerosol extinction (오른쪽 패널) (김준, 연세대학교).

그림 5-4는 KORUS-AQ 기간 동안 모의한 모델의 $PM_{2.5}$ 농도값과 $PM_{2.5}$를 구성하는 각 미세먼지 성분에 대한 지역적 소스의 기여도를 나타내고 있다. 5월 20일-23일 기간을 제외하고 이 모델은 $PM_{2.5}$의 기준치 초과를 정확하게 예측하고 있다. 이 시뮬레이션에 따르면 동 기간 동안 발생한 미세먼지 오염 중 대략 반은 국내에 그 원인이 있었다. 성분을 살펴보면 장거리 유입 먼지는 SO_2 기여도가 더 높았으며 유기물, 질산염, 암모니아는 유입된 먼지와 국내 발생 먼지 간의 비율이 대략 비슷한 수준이었다. 국내 발생 비율이 가장 높은 것은 블랙 카본이었다. 그림 5-4에 나타나 있는 모델의 결과에 대한 상세한 비교가 진행되고 있으며 KORUS-AQ의 다른 모델도 지속적으로 활용되고 있다. 예를 들어, 올림픽 공원의 미세먼지 성분은 외부유입 기간 (5월15일 ~28일) 동안 질산염의 비중이 가장 높았음을 보였다. 여기서 '외부유입 기간 동안 국내의 미세먼지 발생도 함께 증가하였는가'에 대한 의문이 생길 수 있으며, 이 주제에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 그 이유는

국외에서 유입된 오염물질의 수송이 국내 오염물질의 추가적인 생성에 더 기여 하는지에 대한 정량적 이해를 하는 것이 중요하기 때문이다.



Regional Contributions	
South Korea	52
North Korea	9
Beijing Region	7
Shandong Region	22
Shanghai Region	5
Liaoning, Japan, Yellow Sea, etc	5

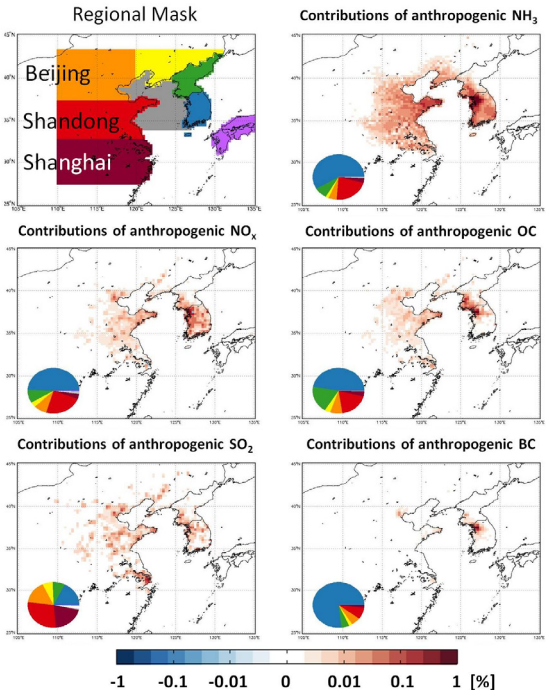


그림 5-4. KORUS-AQ 기간 동안 올림픽 공원 (좌측 상단)과 통합 데이터 (좌측 상단) $PM_{2.5}$의 모델 예측과 (빨간 선) 예측 관측 값 (검정 선)의 비교. 성분 별로 $PM_{2.5}$ 끼치는 영향은 오른쪽 패널에 나타나 있음 (박록진, 서울대 제공).

요약과 제언

1. **NOx와 VOCs 배출, 특히 톨루엔과 같은 방향족 배출을 감축하면 미세먼지와 오존 오염을 줄일 수 있을 것이다.**

   항공 및 지상관측 결과 유기물과 질산염이 미세먼지의 대략 절반을 차지한다는 것을 알 수 있었다. 서울에서의 오존 발생은 VOCs가 제한인자이며 이 중 방향족 탄화수소가 가장 중요한 영향을 미치므로 이들의 관리를 통해 서울의 오존 수치를 낮출 수 있을 것이다. 그러나 서울 및 수도권 지역의 자동차, 발전소 등에서 배출되는 NOx로 인해 훨씬 더 광범위한 지역에서 오존이 발생하고 있다. 광역적으로 발생하는 오존 기준초과 현상을 관리하기 위한 유일한 방법은 NOx 배출의 감축이다. 다만 NOx 감축이 실제로 이루어져 전반적으로는 오존 오염이 개선될지라도, 오존 발생에서의 비선형적 생성 특성으로 인해 일부 도심 지역 등에서는 단기적으로 오존 오염이 더욱 심화될 수 있다

2. **향후 배출 인벤토리를 더욱 상세히 평가하고 개선하여, 대기질 모델링의 정확도를 높여야 한다.**

   이러한 관점에서 보았을 때 KORUS-AQ 관측 결과의 지속적인 분석을 위한 노력이 필요하다. 정확한 배출량 정보를 갖춘다면 모델링을 사용하여 대기질에 문제를 일으키는 배출원 별 기여도를 파악할 수 있으므로, 최적의 배출 관리 전략을 수립하는 데 매우 유용할 것이다. 서울의 경우, 방향족 탄화수소와 여타 세부적인 VOCs에 대한 배출원을 파악하고 정량화하는 것이 필요하다. 발전소의 NOx 와 SO_2 배출을 검증하고, 필요한 경우 더욱 잘 파악해야 한다. 미세먼지 내의 황산염과 질산염을 중화시킬 정도로 고농도 암모니아가 존재하며, 그 오염원을 정량화하여 2차 생성 미세먼지 발생률에 이것이 얼마나 중요하게 작용하는지에 대한 이해를 높여야 할 것이다.

3. **점 오염원에서 발생한 오존과 미세먼지 오염의 영향은 수도권 지역의 남쪽 부근에서 가장 강하게 나타나며, 비록 국지적이기는 하지만 유해화합물이 가져오는 영향에 대해서는 좀 더 관심을 가져야 한다.**

   앞서 언급한 바와 같이 점 오염원에서 발생하는 배출에 대한 검증은 그 영향을 정량화하는 데 있어 매우 중요한 단계이다. 대산 화학 단지의 항공 관측에서는 발암성 화합물들이 위해한 수준으로 관측되었다. 해당 시설 또는 인근에서 일을 하거나 거주하는 작업자들 및 주민들에 대한 노출 정도를 파악할 수 있도록, 사업장 부지경계선에서 보다 상세한 관측을 수행할 필요가 있다.

4. **한국 외 오염원의 영향은 계절의 영향에 따라 변동이 심하므로 추가적인 연구를 필요로 한다.**

   KORUS-AQ 조사의 대부분 기간 동안에는, 동아시아로부터 장거리 오염물질이 직접적으로 유입되기 어려운 기상 조건이 이어졌다. 따라서, 미세먼지와 오존에 대한 국내 발생 오염물질 배출의 영향을 집중적으로 평가하고 분석할 수 있는 이점이 있었다. 그러나 장거리이동의 원인과 영향을 평가하기 위해서는 추가적으로 다른 계절의 오염 상황을 이해할 필요가 있을 것이다. KORUS-AQ 이후, 한국 연구자들의 독자적 관측 역량은 향상될 것으로 기대되기 때문에, 2018년 겨울과 봄에 심층 관측을 진행하는 것이 바람직할 것이다. 한국의 연구 커뮤니티는 중국 과학자들과의 협력 연구를 진행할 수 있는 좋은 상황에 있으며, 이를 통해 장기적 관점에서 미세먼지의 이동을 보다 확실히 파악할 수 있을 것이다. 이러한 협력 연구는 국립환경과학원과 중국과학원 간의 공동 연구의 확대, 또는 LTP나 NEASPEC와 같은 한국 주도의 대기질 연구 사업 형태로 추진할 수 있을 것이다.