

흡수오염물질과 혼합된 황사가 기후에 미치는 영향



서 애 숙
비회원, 기상청 기상기술기반국
지구환경위성과 과장
(assuh@kma.go.k)



김 도 형
기상청 기상기술기반국
지구환경위성과 기상연구원
(dkim@kma.go.kr)

지구온난화 결과 기후변화는 전지구적으로 국지적인 폭우, 폭설, 폭염 등 많은 기상 이변을 야기한다. 기후변화의 가장 큰 원인은 산업화이후 온실기체의 증가에 있다. 하지만 온실기체와 더불어 최근 산업 활동으로 인한 대기 중에 검댕 등 흡수성 오염물질이 증가하여 대기를 가열시키는 연구결과가 다수 발표되었다. 집중적인 연구결과에도 불구하고 여전히 낮은 과학적 이해도를 보이고 있고, 또한 에어로솔의 효과는 복잡하지만 지구온난화에 있어 온실기체에 상당하는 기여도를 보여주었다. 대기 중의 에어로솔이 기후변화에 미치는 영향은 입사하는 태양복사에너지를 반사하여 지구를 냉각시키는 직접 효과와, 구름의 응결핵으로 작용하여 구름 속에서 미세물리를 조절하여 기후변화에 관여하는 간접효과가 있다. 특히 간접효과의 과학적 이해도는 매우

낮아 비행관측 등을 통한 접근 방법을 시도하고 있다. 그동안 흡수성 오염물질을 포함하는 대기 중의 에어로솔은 국지적이고 짧은 수명을 가지고 있어 최근까지 관측이나 모델 수행에 있어 대부분 간과되어 왔다. 하지만 기후변화에 미치는 영향에 대한 여러 연구결과가 발표되어 대기 흡수성 오염물질의 문제는 더 이상 간과될 수 없고, 최신 수치모델에서는 에어로솔을 입력 자료로 사용하고 있다.

대기 중의 흡수성 오염물질은 입사하는 태양에너지를 흡수하여 대기의 온도를 높이는 역할을 하며 또한 크기가 충분히 작아 구름의 응결핵으로 작용해 구름수적의 크기를 감소시켜 구름반사도 및 수명에 영향을 준다. 특히, 대기 중에 에어로솔양이 급격히 증가하는 황사 발생시 흡수성 오염물질과 황사의 내적·외적 혼합은 대기 온도를 1~2℃ 이상 상승시킬



수 있다. 이는 하층 대기의 구름 생성에 영향을 줄 수 있고, 이로 인해 강수량에 영향을 줄 수 있다. 황사와 흡수성 오염물질의 혼합물에 대한 또 다른 문제는 혼합 에어로솔이 발원지 근처뿐 아니라 대기 중을 이동하여 다른 지역까지 영향을 주는 것이다. 최근 네이처지에서 인도양 상공에서 무인비행관측 실험을 통해 흡수성질을 지닌 에어로솔은 이동을 통해 온실기체와 복합하여 10년 동안 0.25 K의 대기가열로 최근 히말라야 빙하의 급격한 후퇴를 설명할 수 있다고 보고하였다. 이 연구 결과는 거대한 황사 및 오염원의 발원지 주변에 있는 우리나라의 상황과 매우 유사하다. 우리나라는 편서풍대에 위치하고 있고, 중국대륙은 거대한 황사의 발원지를 가지고 있으며, 중국동부에서는 산업지역이 밀집하여 세계 최대의 흡수성 오염물질이 생성되어 편서풍을 타고 우리나라 및 일본을 거쳐 태평양으로 이동하고 있다. 오염물질이 지역적인 영향만으로 그치는 것이 아니라 전 지구적으로 이동하여 영향을 주기 때문에, 이는 향후 국제적인 문제로 제기될 가능성이 높다. 이를 위해 우선적으로 대기 중에 배경 에어로솔 외에 원거리 수송되어 온 에어로솔이 지역기후에 미치는 기후학적 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다.

대기 오염물질 중 검댕은 비교적 작은 입자크기를 지니며 지표면에 도달하는 복사에너지를 흡수하는 특성을 가지고 있다. 검댕이 지역적으로 집중된 지역은 작은 입자의 뚜렷한 증가현상을 보인다. 따라서 흡수성 오염물질이 단기간에 집중적으로 생성될 때 장기적으로 한 지역에 지속적으로 존재하여 지역적 특성을 잘 나타내는 에어로솔(배경대기 에어로솔)과 차별되는 특징으로 구별될 수 있다. 대기 오염물질은 지역적인 특성이 강하고 오랫동안 대기 중에 머물지 않기 때문에 대규모로 이동하지 않는 한 주

변지역에 미치는 그 영향을 파악하기는 쉽지 않다. 하지만 아시아 지역은 황사로 대표되는 먼지층이 몬순순환을 따라 이동할 때 오염물질을 동반하는 경우가 많아, 황사의 이동시 에너지의 변화를 관측하면 대기 흡수 에어로솔이 대기가열 등에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 흡수 에어로솔이 지구복사에너지에 미치는 영향은 전체 에어로솔(이 때, 관측한 전체 에어로솔은 배경대기 에어로솔에 추가로 증가한 흡수 에어로솔에 의한 것으로 가정한다)과 배경대기 에어로솔에 의한 복사에너지 차이로 설명될 수 있다. 같은 맥락에서 대기 중 흡수 에어로솔의 꾸준한 증가가 지표면, 대기 및 대기 최상부의 온난화 등의 기후에 미치는 영향도 파악할 수 있다.

황사시 흡수성 에어로솔이 온실효과에 미치는 영향을 동아시아 지역에서는 제주 고산, 남아시아에서는 몰디브에서의 관측값을 사용하였다. 두 지역은 몬순의 영향으로 계절에 따른 바람의 방향이 주기적으로 변화하며, 대륙의 사막지역에서 발생한 황사가 각각 서태평양, 북인도양으로 수송되는 시기에 에어로솔양이 현저히 증가하고 뚜렷한 성분변화가 관측되었다. 또한 두 지역은 그림 1에 나타난 것처럼 대기갈색구름 프로젝트의 일환으로 지상에서 에어로솔 및 복사관측이 지속적으로 이루어지고 있어 황사시 대기 온실효과를 포함하는 대기복사에너지의 변화를 분석할 수 있다.

대기 중의 구성성분들이 복사에너지에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 일반적으로 복사전달모형을 이용한다. 복사전달모형은 대기중의 에어로솔의 양인 광학두께(AOD, 에어로솔광학두께가 0.1인 경우 입사하는 태양복사에너지의 90%, 1인 경우 40%만이 지표면에 도달한다) 및 단산란알베도(SSA, 에어로솔 산란도를 나타내며 1인 경우는 순수한 산란에

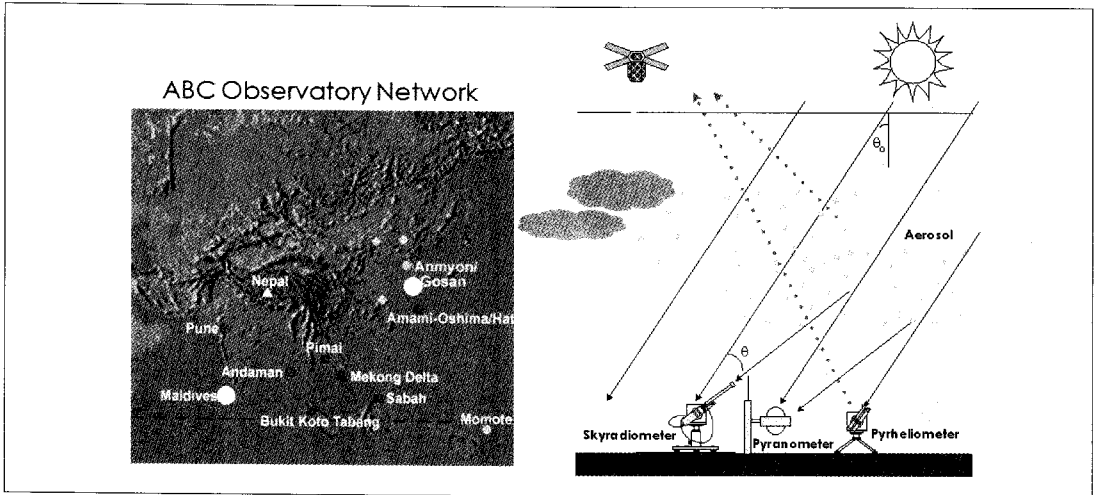


그림 1. 지상에어로솔 관측 사이트인 동아시아의 고산과 남아시아의 몰디브 사이트 및 지상관측 모식도

어로솔이며, 0인 경우 순수한 흡수 에어로솔을 나타낸다) 등의 에어로솔 변수와 대기 중의 수증기량 및 오존량 등을 입력값으로 대기연직 복사에너지 분포를 계산한다.

에어로솔 양을 나타내기 위해서는 일반적으로 지표면 관측 네트워크를 활용한다. 지상 복사관측은 매우 정확하지만 육지지역에 산재해 있고 해양지역에서는 관측소가 거의 없어 에어로솔의 장거리 이동시 해양에서 관측자료가 없는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 정확도는 비교적 낮으나 전지구적으로 관측이 가능한 위성자료를 활용하고 있다. 위성자료의 정확도는 지상관측에 미치지 못하나 꾸준히 정확도가 향상되어 최근에는 위성자료를 활용한 연구가 점차 늘어나고 있고, 본 기사에서도 위성자료를 이용하여 기후학적인 에어로솔의 양을 얻었다.

일반적으로 에어로솔은 지표면 근처에서 생성되기 때문에 연직분포는 대부분 지표로부터 약 1-3km 정도로 제한된다. 하지만 황사는 발원지로부터 이동하면서 주변지역 혹은 원거리에 영향을 주므로, 영

향을 받는 지역에서 황사의 분포는 지표면 근처가 아니라 일반적으로 높은 고도를 가진다. 황사의 고도는 동일 지역이라 하더라도 매우 다양한 연직 분포를 지니는데, 동아시아의 경우, 관측 결과에 따라서 다양한 분포를 나타냈다. 예를들면, 고비사막이 발원지인 경우 2-4km, 티클라마칸 사막이 발원지인 경우 4-7km 등의 분포를 나타내는 식이다. 또한 남아시아 인도양의 경우는 3-4km 혹은 경우에 따라 2km 부근에서 극값을 가짐을 보였다.

이러한 황사의 연직분포의 다양성을 고려하기 위해 1-3km 및 3-6km 두 가지 경우로 나누어서 분석하였다. 이때 지표면 근처에서의 에어로솔을 고려하기 위해서 지표면에서 황사층까지는, 즉 0-1km 및 0-3km의 배경대기 에어로솔로 가정하여 관측값에 근거하여 황사층 에어로솔량의 1/3로 두었다. 에어로솔의 상대적인 연직분포는 복사전달모델 내에서 연직 AOD 분포로 전환되어 사용된다.

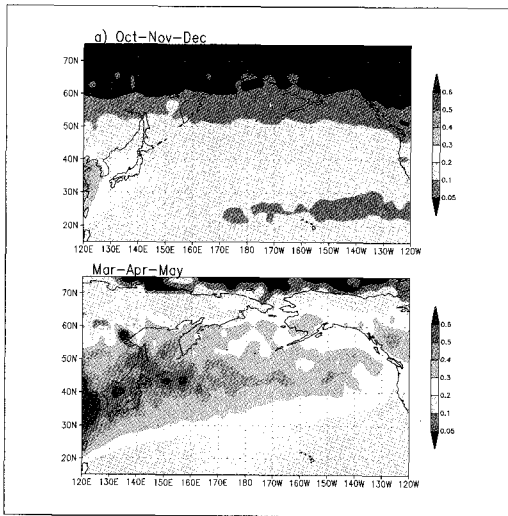
흡수성질을 가지는 물질들은 대기 중 체류하는 동안 태양 복사 에너지를 흡수하여 대기를 가열하는

역할을 하며 지구복사에너지를 흡수 재방출함으로써 지구를 냉각시키는 역할을 하는데, 일반적으로 대기가열 효과가 대기냉각효과에 비해 크게 나타나므로 순복사효과는 대기를 가열하게 된다. 대기의 가열정도를 결정하는 양은 에어로솔양과 흡수성질이다. 특히 강한 흡수성질, 즉 작은 단산란알베도를 갖는 에어로솔은 대기가열효과가 상대적으로 크게 나타난다. 흡수성 오염물질 에어로솔은 일반적으로 공업지역 등 특정지역에서 생성되어 그 수명이 수일에서 수주정도로 짧지만 지속적으로 생성되므로 에어로솔양은 지역적으로 매우 높게 형성된다. 이 장에서는 동아시아 및 남아시아에서 대기 중 흡수성 오염물질의 포함정도에 따른 대기가열율의 차이를 살펴볼 것이다.

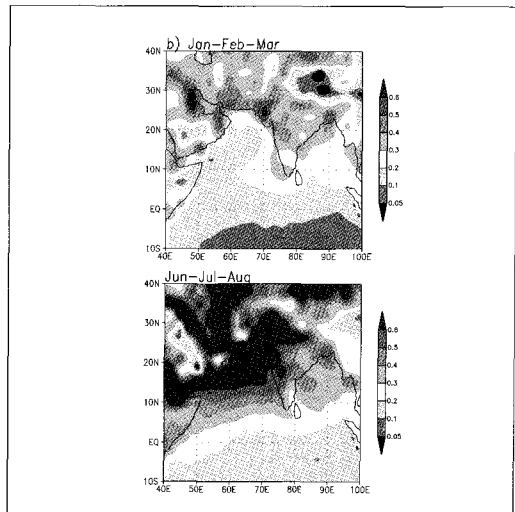
그림 2는 계절에 따른 위성에서 관측한 에어로솔 양의 공간분포를 나타낸 것이다. 에어로솔의 지리적 분포는, 해안선을 따라 육지에 가까울수록 큰 값을

나타내고 있으며 황사 발원지에서 멀어질수록 점진적으로 값이 작아지는 경향을 분명하게 보이고 있다. 에어로솔의 원거리 수송시 많은 양이 다양한 물리적 과정으로 대기로부터 소멸되어 발원지가 위치하고 있는 육지로부터 해양까지 뚜렷한 경도가 생성된다. 에어로솔 원거리 수송은 중위도 지방은 강한 편서풍의 영향으로 동아시아 에어로솔이 북동쪽으로 확장하여 태평양을 가로질러 미국 서부해안까지 도달하는 것을 설명할 수 있다. 여기서 특징적인 것은 미국 서부해안에 도달한 에어로솔양이 적지 않다는 것이다. 아라비아 해 부근의 에어로솔양은 0.6이상으로 매우 크게 나타나며 몬순에 의한 강한 북서풍에 의해 육지의 에어로솔이 북인도양을 거쳐 남인도양으로 수송되고 있다.

그림 3은 동아시아와 남아시아에서의 월평균 에어로솔 양을 나타낸 것이다. 그림 2에서 나타난 것같이 동아시아는 봄철, 남아시아는 여름철에서 극값을

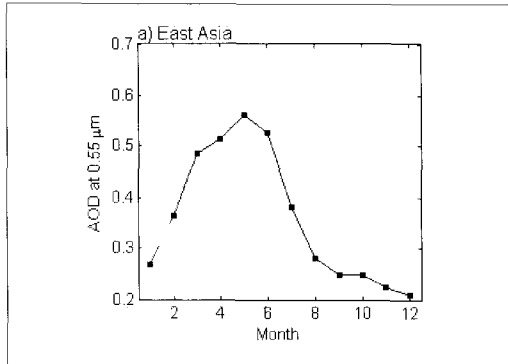


(a) 동아시아

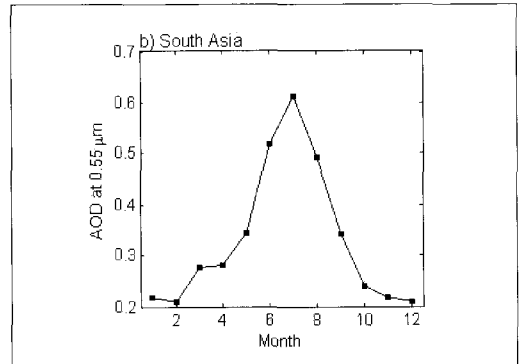


(b) 남아시아

그림 2. 동아시아(a)와 남아시아(b)에서 위성관측 에어로솔 광학두께의 계절 평균(2000년부터 2002년 평균) 광학두께 (558 nm). 각 지역에서 비황사(위쪽 패널)와 황사(아래쪽 패널) 시기로 나누었다.



(a) 동아시아



(b) 남아시아

그림 3. 동아시아(a)와 남아시아(b)에서의 위성관측 월평균(2000년에서 2002년 평균) 에어로솔 광학두께. 두 지역의 서로 다른 황사시기를 갖기 때문에 동아시아는 봄철, 남아시아에서는 여름철에 극값을 보이고 있다.

표 1. 동아시아와 남아시아에서의 황사 및 비황사시 에어로솔 광학두께(AOD) 및 단산란알베도(SSA)

| | 동아시아 | | 남아시아 | |
|-----|----------------|------------|-------------|------------|
| | 비황사(10,11,12월) | 황사(3,4,5월) | 비황사(1,2,3월) | 황사(6,7,8월) |
| AOD | 0.228 | 0.501 | 0.234 | 0.541 |
| SSA | 0.964 | 0.910 | 0.973 | 0.933 |

보이고 있는데, 두 지역에서 월평균 극값은 대략 0.6으로 비슷하게 나타나고 있다. 두 지역 모두 에어로솔 광학두께의 최대값을 최소값을 갖는 달에 비해 약 3배를 보인다. 일반적으로 최대값을 보일 때 원거리 수송과 함께 이동하면서 그 지역 에어로솔과 활발한 혼합작용을 통해 에어로솔 화학적 성질 변화가 심하게 된다. 이러한 혼합작용은 비교적 에어로솔양이 많은 황사시 관측이 용이하나 적은 양이라고 할 지라도 탁월풍에 의한 에어로솔 수송은 끊임없이 이루어지고 있다. 표 1은 황사 발생시 증가하는 에어로솔 양과 흡수성질을 잘 표현하고 있다. 표 1에서 AOD는 동아시아 및 남아시아 지역 평균값을, SSA는 고산과 물디브에서 황사발생시 SSA값을 평균한 것이다. 에어로솔의 지역성 때문에 황사시 SSA값의 변화가 경우에 따라 크고, 흡수성 오염입자 뿐만 아

니라 아시아나 러시아에서 발생한 생물학적 연소의 영향도 포함할 수 있으나 여기서는 황사시기의 SSA 감소는 흡수성 오염물질의 증가로 가정해 보았다. 또한 흡수성질을 갖는 대기 중의 에어로솔성분에 의한 효과는 에어로솔양이 많을 때 그 효과가 크기 때문에 황사시 에어로솔성분변화에 따른 대기효과를 살펴볼 것이다.

황사의 발생은 지표면과 대기최상부의 에너지수지에 직접적인 영향을 주게 된다. 그림 4는 맑은 대기에서 황사에 의한 대기 가열율(K/day) 및 태양복사량(Wm^{-2}) 변화를 나타낸 것이다. 황사의 흡수도가 증가할수록 지표면에 도달하는 태양에너지는 감소시켜서 단산란알베도가 0.86인 경우 태양에너지는 $34-35 Wm^{-2}$ 가 감소되어 도달하는 반면, 대기최상부에서는 $4-6 Wm^{-2}$ 의 에너지만 감소한다. 변화경

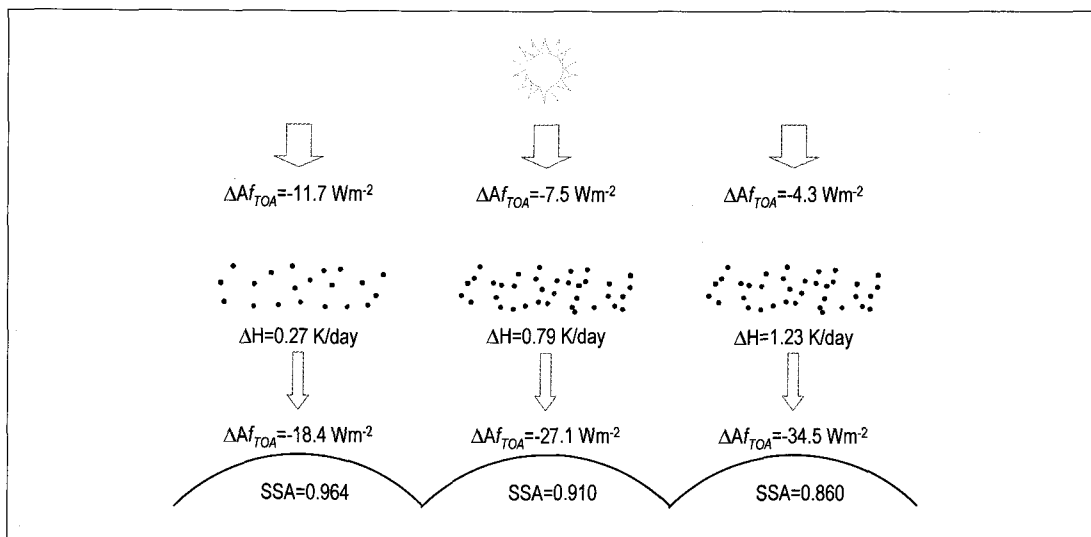


그림 4. 맑은 대기에서 황사에 의한 대기 가열율(K/day) 및 태양복사량(Wm⁻²) 변화.

차이는 황사의 값에서 비황사의 값을 뺀 것으로 그림4와 동일한 경우이다. 배경대기는 표 1의 비황사시 에어로솔 성질이며, 황사의 광학두께는 0.60이며 SSA는 계산을 위해 사용한 단산란알bedo 값이다. ΔAf_{TOA}는 대기최상부에서 에어로솔 복사강제력의 차이로 비황사시에서 황사시의 복사에너지 뺀 것이다. ΔAH는 대기 가열율의 차이를 나타낸 것이다.

황은 흡수도가 커질수록 대기최상부에서의 에너지 흡수는 심해져서 부호가 음에서 양으로 바뀌기도 한다. 즉, 흡수성질을 갖는 오염물질에 의한 지구온난화가 발생하는 것이다. 이는 황사 발생시 순수 황사의 경우 대기 가열 변화가 크지 않기 때문에 지구 전체 에너지 수지로 볼 때, 지구 냉각화 역할이 크게 나타나지만, 황사와 흡수성 오염물질의 내적·외적 혼합으로 흡수도가 증가한다면 지구 전체 에너지 수지가 음에서 양의 값으로 변화하여 더 이상 냉각화 역할을 하지 못하고 지구온난화 역할을 하게 된다.

하지만 무엇보다도 확실한 것은 대기최상부에서의 냉각화 및 온난화의 어떤 경우이든지 대기는 흡수성 에어로솔이 존재할 때 가열되게 된다는 것이다. 즉 대기 중의 흡수성 오염물질, 특히 검댕은 작은 입자로서 발원지로부터 원거리로 이동하면서 그 지역 대기의 온도를 높이는 역할을 한다. 비록 강수형

태로 대기에서 제거되더라도 높은 산악지역의 눈이나 빙하 표면에 침적되어 영향을 주게 된다.

황사의 전체 대기 가열율(K/day)은 흡수성 오염물질을 포함할 경우가(~0.27 K/day) 그렇지 않을 때보다(~0.8 K/day) 황사층의 고도(1~3km 혹은 3~6km)와 상관없이 2~3배 정도의 증가하는 경향을 보이며 대기 전체 평균 가열율은 약 0.8 K/day를 나타냈다. 또한 황사층내 흡수 에어로솔양이 증가할 경우 황사층의 대기 가열율 또한 급격히 증가했다. 황사 혼합물의 SSA가 감소할수록 지표도달 태양에너지는 급격히 감소하고, 대기 최상부 에너지 수지는 점차 온난화 경향으로 진행된다. 이 결과는 온실기체에 의한 지구온난화 뿐만 아니라 대기 중의 화석연료 사용으로 생산되는 흡수 에어로솔인 숯이 지구온난화에 크게 기여하고 있으며, 아시아는 몬순계절풍으로 대륙으로부터 북풍계열이 지배적일 때 황

사와 함께 많은 양의 흡수성 오염물질도 동시에 수송되어 넓은 해양지역에 큰 영향을 미침을 보였다.

많은 연구 결과에도 불구하고 구름과 에어로솔의 관계는 현재까지 불확실성이 매우 크기 때문에 지상, 비행 및 위성관측을 병행한 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 특히, 에어로솔-구름 상호작용에 대한 직접 관측 자료가 매우 부족하여 비행관측이 매우 절실하여 유인비행관측인 및 무인비행관측 캠페인이 남아시아의 인도양 및 동아시아를 포함하는 북태평양 지역에서 활발히 진행되었다. 이중 최근 네이처에서 보고한 무인비행기를 이용한 서로 다른 3개 층에서의 동시 관측의 성공은 에어로솔-구름 상호작용 연구를 급진전 시킬 수 있는 발판을 마련한 것이다.

대기 중의 흡수성 오염물질이 환경이나 기후에 주는 영향을 간과할 수 없고 지금까지의 여러 연구결과로 볼 때, 더 이상 국지적인 문제로 제한할 수 없다. 이는 다른 지역에서 수송된 흡수성 오염물질에 의해서 우리나라가 환경이나 기후변화를 겪을 수 있음을 의미한다. 최근 여러 연구결과에서 보이듯이 적도 대륙빙하의 20~30년에 걸친 급격한 후퇴는 이러한 효과를 반영하고 있는 것이다. 하지만 흡수성 오염물질은 대기온난화를 가속화시키는 역할을 하지만, 그 중요성은 최근에서야 제기되었고 직접

효과 외에 간접효과(예, 구름 응결핵으로 작용)는 그 복잡성으로 문제해결을 더욱 어렵게 한다.

온실기체의 방출을 국제적으로 억제하려는 움직임이 일고 있는 상황에서 흡수성 오염물질의 역할을 밝혀내는 것은 전 지구 온도변화를 예측하는데 매우 중요하다. 흡수성 오염물질 역할에 대한 과학적인 연구와 더불어 이들의 시간적 및 공간적 변화를 지속적으로 감시하는 것도 매우 중요한 문제이다. 이를 위해 관측자료 확보는 매우 중요하다. 정확한 지상관측과 더불어 위성을 이용한 넓은 지역의 동시 관측을 통한 시공간 분포자료의 축적은 장기적인 기후변화와 흡수성 오염물질의 관계를 분석해내는 중요한 자료로 활용 가능할 것이다. 정확하고 체계적인 감시로는 지상 관측을 우선으로 둘 수 있으나 지역적인 관측 한계를 넘기 어렵다. 하지만 위성에 의한 감시는 정확도의 문제가 여전히 남아있지만 실시간으로 넓은 지역의 연속적인 감시가 가능하고 이들이 기후 등에 미치는 영향을 산출해 낼 수 있어 가장 효과적인 방법이 될 것이다. 몬순순환에 의해 계절에 따른 풍향의 변화가 비교적 뚜렷한 우리나라를 포함하는 동아시아는 대륙으로부터 수송되는 에어로솔의 영향을 상대적으로 정확하게 정량화시킬 수 있어 이에 대한 연구는 국제적 정책결정에 기본 자료로 사용할 수 있을 것이다.