

기후변화 대응 에어러솔 연구 발전을 위한 정책 연구

김지영^{1,*} · 이용섭² · 신임철³

¹기상청 국립기상연구소 정책연구과

²기상청 기상산업정보화국 기상자원과

³기상청 기상선진화추진단 기상선진화담당관

(2010년 1월 26일 접수; 2010년 2월 27일 승인)

Policy Studies for Advancing Aerosol Research on Climate Change in Korea

Jiyoung Kim*, YongSeob Lee and Im Chul Shin

Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Republic of Korea

(Manuscript received 26 January 2010; in final form 27 February 2010)

Abstract

Atmospheric aerosols play a crucial role for changing climate, resulting in a wide range of uncertainty for future climate prediction. In this paper we review current international research status and trend of climate-related aerosol science. There have been carried out a number of campaigns (including ACE-Asia, TRACE-P, ABC, and so on) and special experiments with some modeling studies over Korea, East Asia, and the Northwestern Pacific to characterize the various properties (physical, chemical, optical, and radiative) of Asian aerosols and evaluate their climate forcing impacts. But some parts of the aerosol research may need to be improved, advanced, or newly launched. Especially, a chemical transport model (CTM) embedded by a general circulation model (GCM) should be developed by the national scientific community with a high research priority, actively collaborating with international community in order to estimate direct and indirect global radiative forcing due to anthropogenic and natural aerosols.

Key words: Atmospheric aerosols, Climate change policy, Climate change science, Research priority

1. 서론

대기 중에 부유하는 에어러솔 입자는 빛을 직접적으로 산란 또는 흡수 (Charlson *et al.*, 1992; Ramanathan and Vogelmann, 1997) 하거나 구름응결핵 (cloud condensation nuclei, 이하 CCN)이나 얼음핵 (ice nuclei, 이하 IN)으로 작용하여 구름의 반사도, 수명, 강수 등에 영향을 미침으로써 (Twomey, 1977, 1991; Charlson *et al.*, 1987; Albrecht, 1989; Ramanathan *et al.*, 2001a; Quaas *et al.*, 2009b) 간접적으로 지구의 복사 평형과 지구시스템 내의 에너지 전달과정에 영향을 준다. 따

라서, 에어러솔은 온실가스 (이산화탄소, 메탄 등)와 함께 인위적 요인 (즉, 인간활동이 원인으로 작용함)에 의한 기후변화를 야기하는 중요한 대기 성분 (atmospheric constituents) 중 하나로 널리 인식되고 있다 (Charlson *et al.*, 1987 and 1992; IPCC, 2007).

대기 중으로 배출된 온실가스는 대기 중 체류기간이 수 십년 정도 이상으로 매우 길기 때문에 대류권 내에서 비교적 균질하게 분포하고, 각 온실가스의 종류별 분광학적 특성이 자세하게 밝혀져 있기 때문에 배출량 시나리오가 결정되면 기후모델 내에서 비교적 계산이 용이한 편이다. 이에 반해 에어러솔은 수명이 짧고 (약 일주일 내외), 지역 별로 생성, 변환, 소멸 과정이 다르기 때문에 시공간적으로 농도 분포와 특성 (즉, 크기분포, 화학조성, 광학적 성질 등)이 매우 다른 것으로 관측되고 있다. 따라서, 기후시스템에 미치는 에어러솔의 복잡한 영향 (자연적 요인과 인위적 요인을

*Corresponding Author: Jiyoung Kim, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Republic of Korea.
Phone: +82-2-2181-0474, fax: +82-2-2181-0489
E-mail: jykim@kma.go.kr

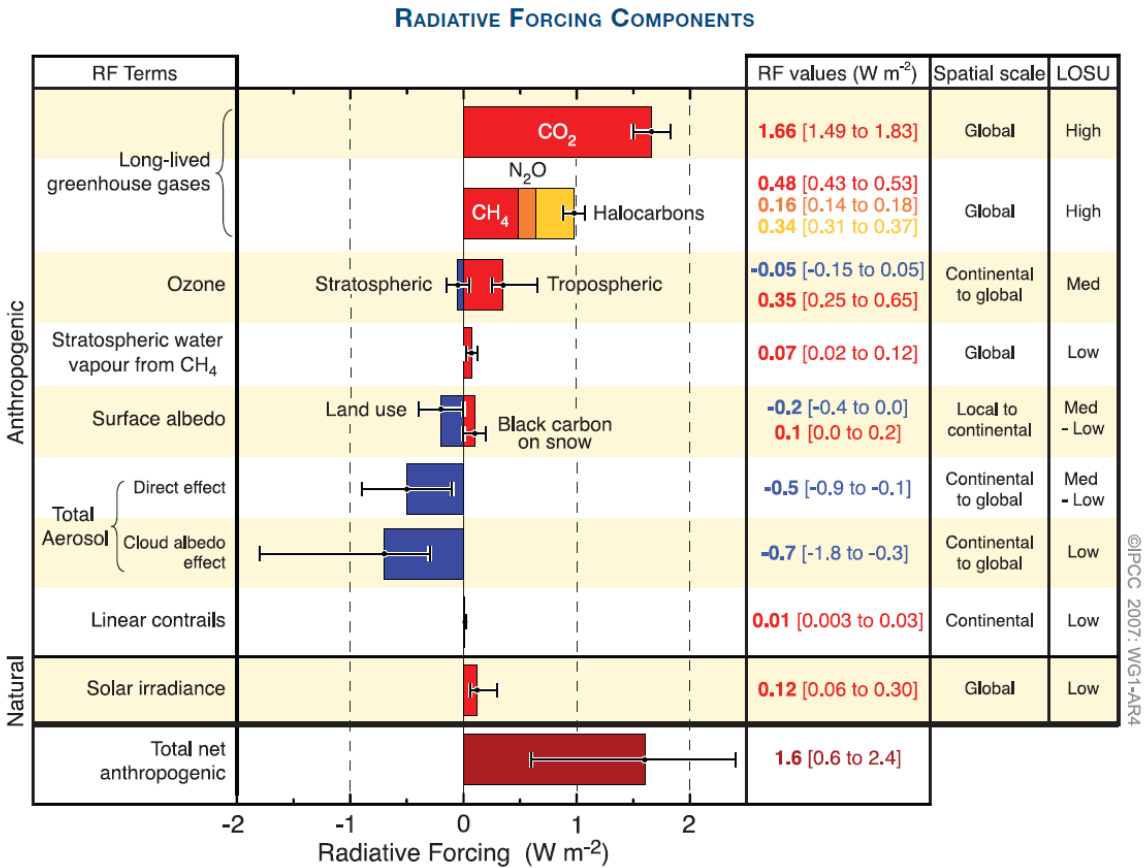


Fig. 1. Global average radiative forcing estimates and ranges in 2005 for anthropogenic carbon dioxide, methane, nitrous oxide and other important agents (IPCC, 2007).

포함)은 현재의 기후변화를 이해하는데 많은 어려움으로 작용하고 있고, 이는 미래기후에 대한 예측 불확실성을 높이는 원인의 하나로 지목되고 있다 (Quaas *et al.*, 2009a).

기후변화에 관한 정부 간 협의체 (이하 IPCC)의 최근 보고서에 따르면 (IPCC, 2007), 인위적 에어리솔 (주로, 황산염, 질산염, 유기 응축물, 검댕, 토양입자 등)의 직접 및 간접효과에 의한 복사강제력은 각각 -0.5와 -0.7 $W m^{-2}$ 으로 보고된 바 있는데, 이는 이산화탄소에 의한 온난화 효과 (즉, +1.66 $W m^{-2}$)의 상당 부분을 상쇄시킬 수 있는 양에 해당한다 (Fig. 1). 그러나 직접 및 간접 효과로 인한 에어리솔 복사강제력의 범위는 각각 -0.9~-0.1 $W m^{-2}$ 및 -1.8~-0.3 $W m^{-2}$ 로서 큰 불확실성을 여전히 내포하고 있다. 이러한 불확실성은 전지구 에어리솔 모델과 관측기반의 추정치 간의 차이에 주로 기인하다 (Myhre, 2009).

국제학계에서는 에어리솔에 의한 복사강제력 추정치의 불확실성을 줄이고, 에어리솔이 기후시스템에 미치는 영향에 대한 이해를 높이기 위하여 거의 매년 다양한 형태의 대규모 관측 캠페인과 모델링 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Kulmala *et al.*, 2001). 우리나라에서는 2001년에 실시된 ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) 캠페인 (Huebert *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006a, b)을 시작으로 2005년에 실시된 ABC-EAREX (Atmospheric Brown Clouds- East Asian Regional Experiment) 캠페인을 통하여 많은 연구결과가 도출된 바 있다 (Nakajima *et al.*, 2007). 특히, ACE-Asia는 IGBP/ IGAC의 주관으로 이루어진 ACE 시리즈의 3차 캠페인으로서 ACE-1(남반구 호주 부근에서 실시), ACE-2 (유럽에 지역에서 실시)이어서 동아시아 지역에서 이루어진 역대 최대규모의 에어리솔 집중 관측 캠페인에 해당한다

(<http://www.igac.noaa.gov/>). 특히, 항공기, 선박, 위성 및 지상네트워크 관측과 모델링 결과 검증 등 협력적인 연구를 통하여 괄목할만한 연구성과를 거둔 바 있다. 또한 ABC 캠페인을 통해서도 아시아지역의 인위적 에어러솔에 의한 기후영향 연구가 지속적으로 이어지고 있다.

지금까지 수행된 다양한 형태의 국제협력과 공동연구 노력에도 불구하고 미국이나 유럽 등 선진국에 비해 우리나라의 에어러솔 관측 (지상, 항공기, 위성) 및 모델링 기술, 기후시스템에 미치는 영향 평가 기술, 이와 관련된 관측인프라와 전문연구인력 등은 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 최신의 국제적으로 수행되고 있는 에어러솔 연구동향을 살펴보고, 기후변화 대응과 관련하여 우리나라의 에어러솔 연구 역량을 향상시킬 수 있는 정책방향을 제시하고자 한다.

2. 국내의 연구 현황

20세기 중반이후 대기 중 에어러솔의 물리화학적 특성 이해, 시공간적 분포 조사, 실험실 내에서의 연구 (특히, 에어러솔의 생성과 변환 실험, 원격탐사 (Kahn *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004), 모델링 기술 (Takemura *et al.*, 2005; Quaas *et al.*, 2009b) 등 다양한 분야에서 괄목할 만한 발전이 이루어져 왔다 (Ramanathan *et al.*, 1997). 특히, 광학, 분광학, 전기적 원리를 이용한 에어러솔 측정기술은 수 나노미터에서부터 수십 마이크로미터 크기 범위의 에어러솔에 대한 과학적 이해를 높이는데 크게 기여하였다 (Jung *et al.*, 2009; Yum *et al.*, 2005). 또한 최근에는 인공위성에 탑재된 라이다 관측 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO)을 통해 에어러솔과 구름의 광학적 성질 및 연직분포 등을 조사하고 있다 (Chand *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2008b).

동아시아 지역에서 발생하는 인위적 기원의 에어러솔과 황사에 대한 특성 연구 및 기후에 미치는 영향을 평가하기 위하여 ACE-Asia와 TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over the Pacific)가 실시된 바 있다 (Huebert *et al.*, 2003; Seinfeld *et al.*, 2003). 2003년부터는 아시아 지역의 대기갈색구름에 대한 기후학적 영향 연구를 위하여 ABC 프로젝트가 시작되어 현재까지 진행 중이다 (Ramanathan *et al.*, 2007; Yum *et al.*, 2007; Yoon *et al.*, 2008). 썬포토메터와 스카이레이디오메터를 이용한 전지구적 에어러솔 관측

망인 AERONET (Aerosol Robotic NETwork) 프로그램이 미국의 NASA에 의하여 운영되고 있다 (Holben *et al.*, 1998, 2001; Won *et al.*, 2004; Yoon *et al.*, 2005).

본 절에서는 국내 및 국외의 최근 연구현황을 살펴봄으로써 기후변화와 관련한 에어러솔 연구에 있어 국내 커뮤니티가 앞으로 발전시켜 나가야 할 연구 방향에 대한 이해를 돕고자 한다.

2.1 국내 연구 현황

국내에서 이루어지고 있는 에어러솔 연구는 접근 방법에 따라 크게 지상관측, 항공기관측, 선박관측, 위성 및 라이다 등을 이용한 원격탐사, 화학수송모델링, 에어러솔 복사강제력 추정 연구 등으로 구분할 수 있다. 그러나 실제 연구결과의 해석 측면에서 볼 때는 위에서 언급한 접근방법에 따라 에어러솔의 크기분포, 화학조성, 광학적 성질, 시공간적 분포, 구름-복사-기후에 미치는 영향 평가 등에 대한 연구결과가 직접 또는 간접적으로 도출될 수 있다.

지상관측에 대한 연구 현황을 살펴보면, 안면도 (기상청 기후과학국 주관), 제주도 고산(서울대, 연세대 등), 백령도(국립환경과학원 주관) 등에서 상시적으로 에어러솔 관측이 이루어지고 있다. 현재 OPC (optical particle counter), APS (aerodynamic particle sizer), SMPS (scanning mobility particle sizer) 등을 이용한 에어러솔의 크기분포 (Lee *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007a; Lee *et al.*, 2008), PM10/2.5 샘플러를 이용한 질량농도 및 화학조성 (IC, ICP/MS 분석 포함)에 대한 관측 연구 (Han *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006b) 등이 이루어지고 있다. 또한 네펠로메터, PSAP (particle soot absorption photometer)이나 에셀로메터를 이용한 에어러솔의 광산란 및 흡수도에 대한 관측 연구 (김지영 등, 2003; Kim *et al.*, 2006b), 에어러솔의 흡습성 (Kim *et al.*, 2006a; Lee, 2006a, b)에 대한 연구 등이 일부 병행되고 있다. 지상에서의 이러한 관측연구는 한반도를 포함한 동아시아 지역에 분포하는 에어러솔의 장기간 변동 경향을 파악하기 위한 WMO/GAW (global atmosphere watch) 프로그램의 목적에도 부합된다.

단일입자 관측을 통한 에어러솔 연구는 2000년대 초반부터 본격적으로 시작되었으며 (Ro *et al.*, 2000, 2001a, b), 제주도를 비롯하여 춘천 등에서 황사, 해염, 황산염, 질산염 등에 대한 단일입자 분석 연구를 수행

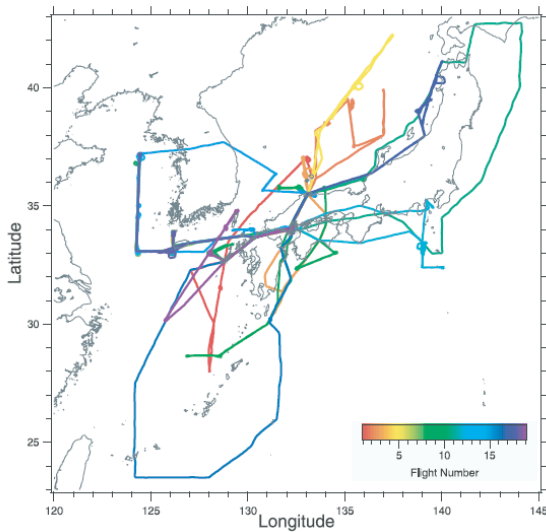


Fig. 2. Routes of C-130 research flights during ACE-Asia 2001 (Huebert *et al.*, 2003).

하였다 (Hwang and Ro, 2005, 2006; Hwang *et al.*, 2008). 이러한 단일입자에 대한 관측 연구를 통하여 에어러솔의 혼합상태 (mixing state) 및 이동과정에서의 물리·화학적 변환 과정 등을 이해할 수 있으며, 이러한 연구 결과는 에어러솔 모델링 및 기후 효과 산정연구에도 기여하게 된다. 즉, 에어러솔의 혼합상태 (external mixing 또는 internal mixing) 여부에 따라 에어러솔의 광학성질 (특히, 굴절률 등)이 달라지므로, 그에 따른 복사강제력 산정 값에도 차이가 나타나게 된다. 특히, 동아시아 지역과 같이 다양한 종류의 에어러솔 발생원이 산재해 있는 지역에서의 에어러솔 혼합효과에 대한 고려는 중요한 의미를 내포하고 있다. 입자 생성과 성장에 대한 관측은 안면도 기후변화감시센터, 제주도 고산, 백령도 등에서 수행된 바 있다. 특히 Lee *et al.* (2008)은 2005년에 안면도에서 관측 자료를 이용하여 동아시아의 해안지역에서 관측한 입자의 생성 특성과 성장률 (평균: 5.9 nm hr^{-1} , 범위: $1.1\sim 15.7 \text{ nm hr}^{-1}$)에 대한 연구 결과를 발표한 바 있다. 나노미터 크기 범위에 있는 초미세 입자의 생성 및 그와 관련된 환경적 조건에 관한 연구는 특히 핀란드 등 유럽지역에서 매우 활발하게 연구되고 있으며, 에어러솔 생성과 관련된 여러 가지 중요한 메커니즘 (태양복사, 종관기단, VOC 등 전구물질의 영향 등)을 이해하는데 중요하다.

에어러솔 광학 두께와 소산계수의 연직 분포 등에 관한 연구는 주로 섀포토펜터 (혹은 스카이레디오메

터)나 에어러솔 라이더 관측을 통하여 이루어졌다 (Kim *et al.*, 2003; Won *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2008 a, b, c). 특히, 위성 관측을 통한 에어러솔의 공간적 분포 감시 (Kim *et al.*, 2007b; Kim *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009b)는 넓은 지역에 대한 에어러솔 분포를 파악하는데 매우 효과적이다 (Wang *et al.*, 2003). 원격탐사 기법을 이용한 에어러솔 관측과 더불어 항공기와 선박을 이용한 관측은 에어러솔의 시공간적 분포와 특성을 이해하는데 중요한 역할을 한다.

2001년 ACE-Asia 캠페인 기간에 미국의 기상관측 전용항공기인 NSF/NCAR C-130이 한반도를 포함한 동아시아 지역의 에어러솔 관측을 실시한 이후 (Hubert *et al.*, 2003, Fig. 2 참조), 2007년 PACDEX (PACific Dust EXperiment) 기간에는 NSF/NCAR Gulfstream-V 연구용 항공기가 에어러솔 관측에 참여한 바 있다 (<http://www.eol.ucar.edu/projects/pacdex/>). 또한 국내에서도 국립환경과학원의 대기환경감시 (김정수, 2008), 국립기상연구소의 인공강우 실험연구 등을 위해 항공기 관측이 실시되고 있다. 또한, 제주도에서 무인항공기를 이용한 에어러솔 관측연구가 2008년 8월부터 활발하게 실시되고 있다 (윤순창과 김지영, 2008). Kim *et al.* (2009a)는 선박을 이용하여 2005년 봄과 가을에 황해와 동중국해 지역을 대상으로 입경 별 에어러솔의 수농도 분포를 조사한 바 있다.

국내에서 수행된 화학수송모델 (chemical transport model, 이하 CTM)을 이용한 에어러솔의 시공간적 분포 등에 관한 연구결과는 그 중요성에 비해 발전의 속도가 느린 편으로 볼 수 있다 (Park *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2009). 이는 국내 대기과학의 다른 분야 (예를 들어, 수치예보모델 연구, 지역기후모델 연구 등)에서는 모델링 연구가 활발하게 수행된 것에 비하면 의외이다. IPCC AR4의 WG I에서 언급된 대부분의 복사강제력 추정치는 CTM 모델의 결과를 기반으로 하고 있다. 따라서, 우리나라도 독자적인 복사강제력 추정치를 발표하기 위해서는 CTM 모델링 기술의 육성이 시급하다. 이에 대한 보다 자세한 사항은 다음 장에서 언급하고자 한다.

에어러솔에 의한 간접효과와 CCN 관측 연구는 국내외에서 관측된 자료를 이용한 연구가 최근에 들어 활발하게 수행되고 있다. 특히, Kim *et al.* (2003)은 지상 기반의 원격탐사 기법을 이용하여 에어러솔의 간접효과를 분석한 바 있으며, 미국 ARM 프로그램에서 생

산된 자료를 이용하여 에어러솔에 의한 간접효과에 대한 다양한 연구가 수행된 바 있다 (Kim *et al.*, 2005, 2008).

한반도와 주변해역에 대한 CCN 관측연구는 안면도 (Yum *et al.*, 2005)와 ABC의 일환으로 제주도 고산에서 (Yum *et al.*, 2007) 각각 실시되었다. 또한 송근용과 염성수 (2004)는 ACE-Asia 기간 동안의 관측자료를 이용하여 한반도 주변지역 구름의 미세물리적 구조에 대한 연구를 수행한 바 있다. 에어러솔이 구름 반사도와 수명, 그리고 강수과정에 미치는 영향이 매우 복잡하면서도 중요하고, 기후예측모델 내에서의 불확실성도 큰 만큼 이 분야에 대한 관측 및 모델링 연구가 향후에 지속적으로 발전하고 활성화될 필요가 있다.

에어러솔에 의한 복사강제력 추정 연구는 주로 산란과 흡수효과를 고려한 직접복사강제력 (direct radiative forcing) 추정연구가 수행되어 왔다 (Won *et al.*, 2004; Yoon *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006b). 즉, 대기 중 에어러솔이 있을 때와 없을 때의 태양복사 영역에서 순복사량 (net flux)의 차이를 산정한 것이다. 그러나, 산업혁명 이전과 이후에 대한 에어러솔의 직·간접효과에 따른 복사강제력 추정은 아직 발표된 바가 없다. 향후에 발간될 IPCC 보고서에 국내 연구자에 의해 수행된 연구결과가 수록되기 위해서는 이 분야의 모델 개발 (CTM을 포함)과 검증연구, 인위적 에어러솔로 인한 직·간접 복사강제력 추정이 조속히 이루어져야 할 필요가 있다. 한편, 에어러솔에 의해 유도된 대기의 원격상관 등의 연구가 Kim *et al.* (2006) 등에 의해 수행된 바 있으며, 이는 앞으로 에어러솔과 몬순, 에어러솔과 물순환 등과 관련하여 풀어야 할 중요한 연구 주제이기도 하다.

2.2 국외 연구 현황

외국의 에어러솔 연구 현황을 간략히 소개하는 것은 상당히 어려운 일이다. 왜냐하면, 거의 매일 수많은 연구자들로부터 새로운 연구결과가 국제학술저널을 통해 발표되고 있기 때문이며, 연구 내용과 방법 등이 매우 다양하고 폭 넓기 때문이다. 본 절에서는 최근 수년 동안 에어러솔과 관련된 주요 국제학술지에 발표된 논문과 그 동안 세계적 연구 성과를 낸 연구기관들을 중심으로 국외의 기후변화 관련 에어러솔 연구 현황을 소개하고자 한다. 본 논문에서 언급되지 않은 최근의 연구결과는 IPCC AR4에 수록된 관련 참고문헌을 통

하여 또한 개략적으로 파악할 수 있을 것이다.

미국의 경우 인공위성, 유·무인항공기, 연구용 관측선박 (research vessel), 다양한 지상관측 등을 활용한 에어러솔 감시 연구를 수행하고 있고, 거의 매년 전 지구를 무대로 다양한 종류의 관측 캠페인을 실시하고 있다. 또한, 대학, 연구소 등에서 CTM을 포함한 에어러솔 모델 개발과 기후학적 영향 연구를 수행하고 있다. 국가기관으로는 NOAA/ESRL (Earth System Research Laboratory)/GMD (Global Monitoring Division, Climate Monitoring and Diagnostic Laboratory의 후속기관)이 마우나 로아, 남극 등 전지구 Baseline Observatory에서 장기간의 연속성 있는 에어러솔 경향 연구를 안정적으로 수행하고 있다. 에어러솔의 광학적 성질과 광학 깊이 등에 대한 장기간의 관측 자료를 안정적으로 생산하기 위해서는 일관된 방식 (consistent way)의 관측 장비 유지관리 (management), 자료 분석 및 처리 (data analysis and processing) 시스템(알고리즘 포함)이 필요하다 (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/>). 이러한 기술력은 우리나라가 본 받아야 할 필요가 있는 중요한 부분 중의 하나이다.

특히, 최근 들어 ESRL에서는 에어러솔 간접효과를 감시할 수 있는 관측 분야를 보강하고 있으며, 무인항공기를 이용한 에어러솔의 연직분포 감시 활동도 강화하고 있다. 또한 지난해에는 알래스카 지역을 중심으로 극지방의 기후에 영향을 주는 에어러솔, 복사, 구름과정을 연구하기 위한 ARCPAC (Aerosol, Radiation, and Cloud Processes affecting Arctic Climate) 캠페인을 수행한 바 있다 (<http://www.esrl.noaa.gov/research/programs/>). 이 캠페인은 지구온난화로 인해 점차 줄어들고 있는 극빙하 및 극지방의 기후에 대한 에어러솔의 영향을 규명하는 것을 목적으로 한다. NASA의 경우 지구정지 및 극궤도 인공위성 (GOES, MODIS, MISR, SeaWiFS, TOMS 등)을 이용한 에어러솔 감시 (구름의 미세물리적 성질을 포함) 연구와 더불어 항공기를 이용한 대기복사 및 에어러솔 광학적 성질 측정을 병행하고 있다.

특히, 항공기 in-situ 관측, 지상에서의 원격탐사 (예를 들어, 썬포토메터나 라이더를 이용한 에어러솔 관측) 자료를 이용한 위성감시 자료 (aerosol optical thickness 등)의 종합적 검증과 산출 알고리즘 개선 분야는 통신해양기상위성의 발사와 운영을 앞둔 우리로서 향후 따라야만 하는 에어러솔 감시 기술 분야이기도 하다. 미국의 여러 대학과 연구소에서는 GCM을 이용한 에

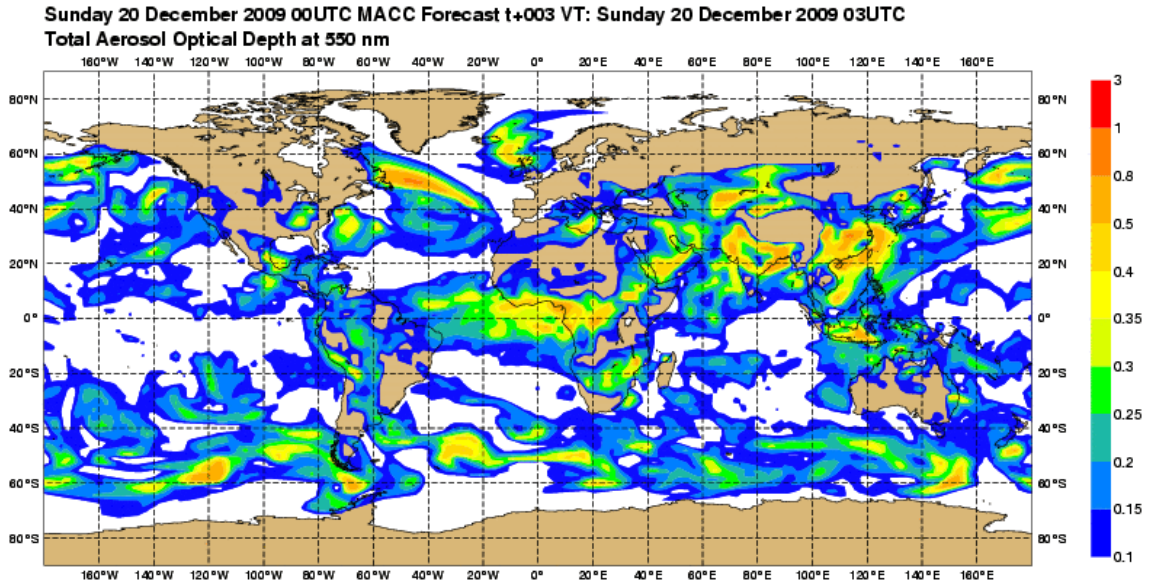


Fig. 3. Global distribution (forecast field) of aerosol optical depth at 550 nm from GEMS/MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate) project.

에어리솔의 복사강제력 추정연구를 다양하게 수행하고 있다. 특히, NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서는 CAM (Community Atmosphere Model)을 개발하여 인위적 에어리솔에 의한 직·간접 복사강제력 추정 연구를 하고 있다 (Collins *et al.*, 2006). 또한 GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)이나 GISS (Goddard Institute for Space Studies)에서도 독자적으로 개발한 GCM 모델을 사용하여 에어리솔에 의한 복사강제효과를 추정하여 발표하고 있다.

유럽에서는 각 국가별 및 EU의 협력체제 하에 다양하게 에어리솔 관측과 모델연구를 수행하고 있다. 에어리솔 관측과 관련하여 아일랜드의 Mace Head 관측소, 독일의 GAW 관측소 등에서 에어리솔의 물리화학적 성질에 대한 지속적인 관측활동을 수행하고 있다. 또한 최근에 들어서는 EU가 중심이 되어 현업적으로 자료동화기법을 이용하여 에어리솔 감시와 모델링 연구를 수행할 수 있도록 하기 위하여 GEMS (Global and regional Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data) 프로젝트를 수행하고 있다. GEMS를 통해 예측된 전지구 및 지역적 에어리솔 분포 (예로, aerosol optical depth)는 위성 및 in-situ 자료를 통해 검증되게 된다 (<http://gems.ecmwf.int/>). 아래의 Fig. 3은 유럽 커뮤니티가 2011년까지 수행할 예정인 MACC

프로젝트를 통해 산출된 전지구적 AOD의 분포 예측 결과를 나타낸다.

기후모델과 관련하여서는 독일의 MPI (Max Planck Institute for Meteorology)는 ECHAM5 (the 5th generation of the ECHAM general circulation model)을 개발하여 에어리솔의 영향을 수치모의 하고 (Roeckner *et al.*, 2003), 영국은 해들리센터에서 HadGEM (the Hadley Centre Global Environmental Model version 2, HadGEM2-A)를 개발하여 사용하고 있다 (Collins *et al.*, 2008). 이 모델에서 다루는 에어리솔의 종류로는 황산염, 화석연료 기원의 BC와 OC, mineral dust, biomass burning 에어리솔, 해염, 2차 유기 에어리솔 등이 있다.

일본은 2000년대 초반부터 독자적인 에어리솔 관측과 모델링 연구를 위한 기반을 확립하였다. APEX (the Asian Atmospheric Particulate Environment Change Studies)를 비롯한 실험관측 캠페인을 지속적으로 수행하고 있으며, 위성을 이용한 에어리솔 복원 알고리즘의 개발, SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species, <http://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/indexe.html>) 등 CTM 모델을 이용한 에어리솔의 직간접적 기후효과 산정연구 (Takemura *et al.*, 2000, 2005, 2009)를 수행하고 있다. SPRINTARS 모델은 일본 동경대의 CCSR (Center for Climate System

Research), NIES (National Institute for Environmental Studies), FRCGC (Frontier Research Center for Global Change)에 의해서 공동개발된 대기대순환모델에 기반하고 있다. 일본의 이러한 연구결과와 성과는 아시아 국가 중 가장 선도적인 위치에서 연구를 수행하는 것으로 평가할 수 있다.

3. 에어러솔이 기후와 보건에 미치는 영향

에어러솔은 기후변화, 물 순환 및 건강에 직접적인 영향을 미치며 (Kaufman *et al.*, 2002) 특히 BC (black carbon)는 이산화탄소 다음으로 기후변화에 가장 많은 영향을 미친다는 연구 결과도 있다 (Ramanathan and Carmichael, 2008). 특히 과거 50년간 기후변화의 원인은 온실가스와 인간에 의해 배출된 에어러솔 때문이다 (Tett *et al.*, 1999). 서론에서도 언급하였지만 에어러솔은 직접적으로 태양에너지를 흡수하거나 반사시켜 기후변화를 야기하며 간접적으로 구름의 씨를 형성하여 강수량 변화를 포함하여 기후변화를 야기하기도 한다 (Christner *et al.*, 2008; Cox *et al.*, 2008). 예를 들어 중국의 경우 지난 20년간 연구결과에 의하면 전 지구는 온도가 상승하는데 중국의 남쪽지역에서는 여름철 홍수가 증가하며 중국의 북쪽지역에서는 가뭄이 증가한다는 보고가 있다. 이는 BC가 대기 순환에 영향을 미쳐 지역적으로 물 순환의 변화를 초래하였기 때문인 것으로 해석되고 있다 (Menon *et al.*, 2002; Chameides and Bergin, 2002). 결국 에어러솔이 아시아 여름몬순에 변화를 초래함으로써 중국 전역에 강수량의 변화를 가져왔음을 의미한다 (Chameides and Bergin, 2002).

기후변화에 있어서 21세기의 화두 중 하나는 빙하의 녹음이다. 이는 빙하의 녹음이 현재론 기후변화의 유일한 증거이며 수십억 인구에게 물문제와 삶의 터전에 치명적인 영향을 미치기 때문이다. 최근의 연구결과에 의하면 BC가 북극빙하가 녹는 속도를 가속화시키고 있으며 이로 인하여 녹는 시기도 빨라진다고 한다 (Tollefson, 2009a). 특히 지난 20년간 북극빙하 녹음에 BC가 1/3 정도 기여한 것으로 밝혀진 바 있다 (Tollefson, 2009a). 또한 산악빙하에 퇴적된 토양먼지 (dust)나 BC는 태양에너지를 흡수해 깨끗한 흰 눈보다 1개월이나 눈을 빨리 녹게 한다는 연구 결과가 있다 (Nature, 2009a).

1980년 이후 전 지구온도의 상승은 대기가 깨끗해짐으로 인해 지표의 단파 흡수량이 늘어 기온이 상승

하였다는 보고가 있다. 유럽의 경우 1980년대 이후 온도상승의 약 2/3 (1°C 에 해당)는 오염물질 (에어러솔) 감소 때문인 것으로 파악되고 있다 (Nature, 2009b). 에어러솔은 또한 지역기후에 심각한 영향을 미치는데, 예를 들어 BC는 중국지역에 냉각효과를, 아프리카 북쪽지역에서는 온난효과를, 미국 남부지역에는 냉각효과를 초래하기도 한다 (Chameides and Bergin, 2002).

고기후복원 연구결과에 의하면 과거에 짧은 기간의 한랭기간이 나타나는데 이 기간 동안 대기 중의 먼지를 포함한 에어러솔의 함량도 높았다 (Petit *et al.*, 1997). 이외에도 남극의 빙하코아 연구에 의하면 340,000년 전 짧은 기간의 한랭기간이 나타나는데 이 이유는 에어러솔의 농도가 높았기 때문이다 (Petit *et al.*, 1997). 또한 앞으로 온난화로 인하여 산불에 의해 에어러솔 농도가 증가한다고 보고되었다 (Lelieveld *et al.*, 2001). 또한 현재 판구조 운동이 활발하다는 연구 결과도 있다. 이는 인위적인 요인 이외에도 화산활동에 의한 에어러솔 농도가 증가함을 의미한다. 즉 에어러솔이 언제, 어디에서 어떻게 기후변화에 영향을 미칠지는 많은 미지수로 남아있으며 앞으로 기후변화 메커니즘을 이해하기위해 꼭 연구되어야 할 분야이다. 이외에도 에어러솔 농도는 시공간적인 분포양상 및 변화가 크다 (Kaufman *et al.*, 2002). 에어러솔은 일반적으로 지구의 온도를 낮춘다고 알려져 왔다. 하지만 이에 대한 불확실성은 매우 크다. 왜냐하면 에어러솔에 의해 흡수되는 총 태양복사에너지와 복사에너지의 수직분포는 잘 알려지지 않았기 때문이다 (Pilewskie, 2007). 아시아 지역의 많은 지역에 분포해있는 에어러솔은 온실기체만큼이나 지구의 온도를 상승시킨다고 알려져 있으며 (Pilewskie, 2007). 이러한 사실은 에어러솔에 관한 이해 없이는 미래 예측에 대한 불확실성이 매우 큼을 의미한다.

에어러솔은 건강에도 영향을 미치는데 (Jang *et al.*, 2002) 특히 탄소를 포함하고 있는 에어러솔은 기후뿐만 아니라 건강에 나쁜 영향을 미친다고 보고되고 있다 (Szidat, 2009). 도시지역의 에어러솔 중 약 40%는 탄소를 포함하고 있는 에어러솔이다 (Szidat, 2009). 특히 대기 갈색구름은 연무 (haze) 현상으로 나타나는 오염 층을 형성한다. BC는 특히 심혈관계 및 호흡기 계통의 질병을 초래 한다 (Nature, 2009c). 로스앤젤레스의 경우 도심지에서 발견되는 BC와 3~6km 상공에서 발견되는 BC의 양이 거의 같다 (Tollefson, 2009b). 우리나라의 경우도 지난 20년 (1988-2007년) 평균 연

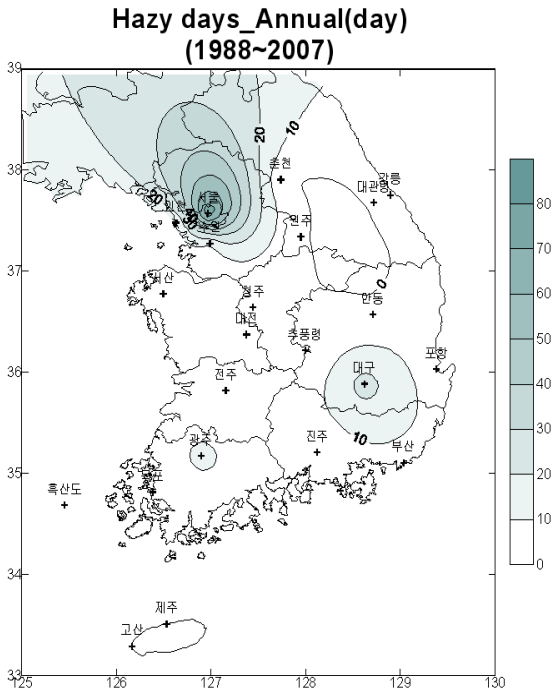


Fig. 4. Distribution patterns of 20 year average hazy days in Korea (1988-2007).

무일수는 서울이 79.6일로 가장 많으며, 특히 수도권 지역(서울, 인천, 수원)과 대구, 광주가 다른 지역에 비해 많이 나타난다(Fig. 4). 이는 기후변화로 인한 강수량, 강수일수, 강수강도 및 건강의 영향을 고려 시 에어러솔이 매우 중요함을 의미한다(기상청, 2008).

현재 건강을 증진시키고 온실기체 방출에 의한 기후변화문제를 완화시키는 가장 빠른 방법으로 BC의 양을 줄이려는 문제가 제기되기도 한다(Tollefson, 2009b). 에어러솔은 온실가스에 비하여 수명이 매우 짧다. 이런 이유 때문에 정책적으로 BC과 같은 오염물질을 줄이는 게 가장 쉽고 비용이 많이 들지 않는 방법으로 대두되고 있다(Tollefson, 2009a). 지구온난화의 약 30%는 검댕(soot)을 제거함으로써 막을 수 있다고 한다.

4. 에어러솔 연구 정책 진단 및 제언

우리나라의 기후변화 관련 에어러솔 연구는 2000년 이후 괄목할 정도로 발전하고 있다. 특히, 국제공동 또는 협력연구를 통하여 관측의 종류가 다양화되고 있으며, 기술력 또한 지속적으로 향상되고 있다. 그러나

2.1절에서 언급한 바와 같은 괄목할만한 발전에도 불구하고, 다양한 크기 범위를 가진, 그리고 종류와 특성이 제 각각인 에어러솔의 특성을 제대로 관측하기에는 많은 어려움이 따른다. 예를 들어, 시료채취 흡입부의 설계, 유량보정, 측정기기 보정, 습도의 조절, 항공기 관측 흡입부 설계, 실험실 내에서의 시료 처리 등을 위해서는 고도의 기술을 필요로 한다.

최근 들어 AMS (Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer) 등 첨단 관측 장비의 도입이 새롭게 이루어지고 있으나, 에어러솔 관측에는 여전히 기술적 한계가 있어 보인다. 앞으로 우리나라는 국제협력의 강화를 통하여 충분한 기술력을 확보하고 독자적인 연구를 수행하기 위한 자체 역량을 강화할 필요가 있다. 또한, 우수한 인적자원(즉, 관측 전문가)의 양성과 확보를 위한 장·단기적인 국외 훈련 또는 교육 프로그램을 개발하여 시행할 필요가 있다. 양성된 전문 연구 인력에 대한 효율적인 관리와 지원 또한 중요하게 고려해야 할 사항 중의 하나이다.

관측전용 항공기의 미비는 한반도 상공의 에어러솔과 구름에 대한 광학적, 미세물리적 특성을 관측하고 이해하는데 어려움을 초래한다. 또한, 앞으로 항공기 관측에 필요한 다양한 분야의 기술 축적도 필요하다. 대형항공기는 유효적재량이 커서 많은 관측 장비와 인원을 실을 수 있고 비행시간이 길고 비행고도가 높아 그 활용도가 크지만 항공기 도입비용이 커서 곧바로 도입하기에는 예산 획득의 어려움이 따른다. 따라서 중·소형 항공기나 무인항공기 도입을 통하여 꾸준히 기술축적을 도모하는 것도 하나의 대안이 될 수 있다. 또한, 에어러솔에 관한 연구가 활성화되기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 지상, 선박, 항공기, 위성 등 다양한 플랫폼에 의한 집중 관측이 동시에 캠페인 형태로 이루어지는 것이 효과적이다. 왜냐하면, 에어러솔은 크기분포, 화학조성, 시공간적 분포(시계열, 연직 프로파일, 공간적 단면 등)가 다양하기 때문에 이와 같은 특성을 동시에 파악하기 위해서는 이들을 포함할 수 있는 다양한 관측기기를 이용한 관측 자료의 생산이 동시에 이루어져야 하기 때문이다. 이는 또한 왜 IGBP/IGAC이나 서구의 국가들이 장소를 매년 지역을 달리해가며 에어러솔 집중관측 캠페인을 실시하는 가하는 것에 대한 이유이기도하다. 집중관측을 통해서 관측기법에 따른 자료의 상호비교연구(closure study)가 가능하고, 위성관측 결과의 검증과 개선, CTM 모델의 검증과 개선이 효과적으로 이루어질 수 있다. 따

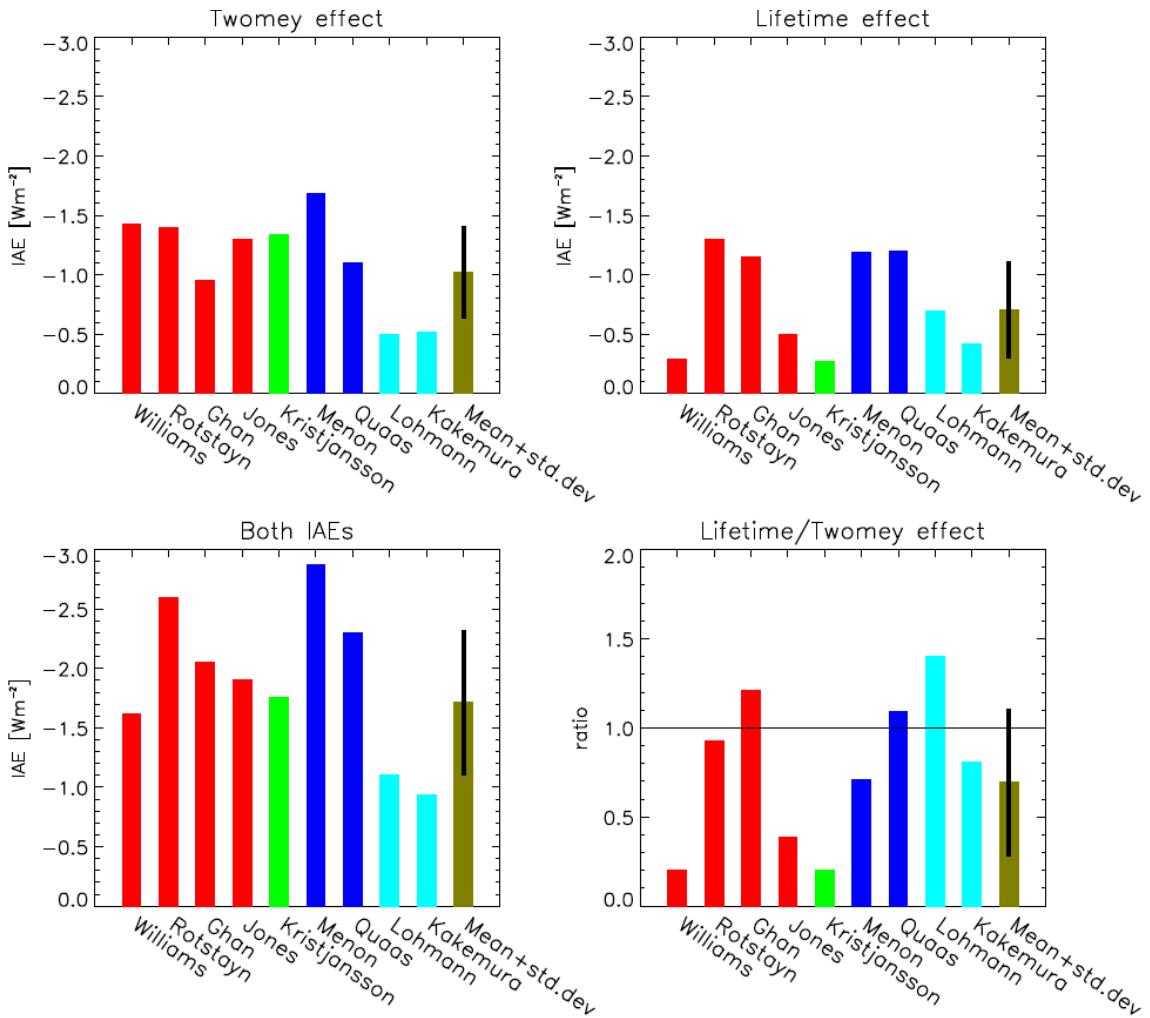


Fig. 5. Global mean Twomey effect, lifetime effect, effect of both and the ratio of lifetime effect to Twomey effect of anthropogenic sulfate aerosols (McFiggans *et al.*, 2006). 여기서 IAE는 indirect aerosol effect를 나타냄.

라서 첨단 에어러솔 관측 장비가 동원된 입체적 관측 캠페인을 정기적으로 실시할 필요가 있다.

에어러솔-구름-복사 간의 상호작용에 대한 관측과 모델링 연구도 앞으로 대폭 확대되어야 할 분야이다. 특히, 자연적 및 인위적 요인에 의해 생성된 다양한 종류의 에어러솔은 흡습성 (hygroscopic properties)이 각기 다르고, CCN으로서의 역할 또한 달리 나타나게 된다 (Fig. 5) (McFiggans *et al.*, 2006). 특히, 인위적 에어러솔에 의한 간접효과를 산출하고 평가하기 위해서는 각 인위적 에어러솔의 종류 별 (internal mixing에 의한 효과를 포함) 구름의 생성과 수명에 미치는 영향을 이해하고 모델링 (또는 모수화)하는 기술의 개발

이 필요하다. 또한 구름 내부에서의 역학적·운동학적 환경 변화에 따른 구름 미세물리 과정 (cloud microphysical processes)에 대한 이해와 모델링 기술, 그에 따른 복사 플럭스의 변화 연구 등 다양하고 폭넓은 분야에 대한 연구가 수행될 필요가 있다.

2009년 7월 29일에 미국의 상원의원인 John Rockefeller는 ‘BC와 기타 에어러솔 연구법 (S.1538- Black Carbon and Other Aerosols Research Act of 2009)’ 법안을 입법 발의하였다. 이 법안은 NOAA에서 수행하고 있는 에어러솔의 관측, 감시, 모델링 등에 관한 연구 프로그램을 구축하기 위한 법안이다. 에어러솔이 기후변화나 국민 보건에 미치는 영향에 대한 연구를 보다 강화하

기 위해서 에어러솔 연구를 촉진시킬 수 있는 법의 제정도 정책적으로 검토해 볼 필요가 있다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 기후변화와 관련된 에어러솔 연구의 국제적 현황과 경향을 분석함으로써 향후 우리나라의 에어러솔 관련 연구를 어떻게 전략적이면서도 효과적으로 발전시킬 수 있는가에 대한 정책적 대안을 제시하고자 하였다. 에어러솔 연구 정책의 방향에 대하여 몇 가지 제언을 하면 다음과 같다.

첫째로, 지금까지의 에어러솔 연구는 주로 지상관측에 크게 의존하여 왔다. 향후에는 항공기와 선박을 이용한 현지관측 (in-situ measurement)이 병행될 필요가 있으며, 때로는 위성 및 라이다 관측 등 원격탐사 결과와 상호 결합된 형태의 통합적 관측 연구가 필요하다. 이를 위해 기상·기후 관측전용 항공기의 도입이 필요하다.

둘째로, 인위적 에어러솔에 의한 직간접 복사강제력을 산출할 수 있는 GCM 및 CTM의 개발이 시급히 이루어져야 하며, 우리나라의 독자적인 모델 결과를 생산하여 국제모델비교 프로그램에 지속적으로 참가할 수 있는 역량을 확보하여야 한다.

셋째로, 향후에 발사될 환경기상위성에 기후감시용 에어러솔과 그 전구물질을 감시할 수 있는 기능을 소화할 수 있도록 다양한 복원 알고리즘 (예를 들어, 에어러솔 광학적 특성, 구름의 미세물리적 특성, 기체성분 등) 개발을 위한 연구역량 강화가 필요하다.

넷째로, 한반도 주변의 에어러솔 집중관측 캠페인이 주기적으로 개최되고 타 지역에서 실시되는 캠페인에 적극적으로 참여함으로써 첨단 관측기술 교환, 정보공유, 인적네트워크 구축 등을 도모함으로써 우리의 연구역량을 강화하는 것이 필요하다.

마지막으로 에어러솔이 기후변화나 국민 보건에 미치는 영향에 대한 연구를 보다 강화하기 위해서 에어러솔 연구 (관측, 감시, 모델링 등)를 촉진시킬 수 있는 법의 제정을 정책적으로 검토해 볼 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청의 2010년도 주요사업 “기상기술 전략개발연구”(승인번호: NIMR-2010-B-6)의 지원으로 수행되었습니다. 이 연구에서 언급된 내용은 연구

자 개인의 의견이며, 기상청의 공식적인 견해가 아님을 밝힙니다.

참고문헌

- 기상청, 2008: 태양에너지 최적 활용을 위한 기상자원 분석 보고서. *기상청*, 458 pp.
- 김정수, 2008: 항공기를 이용한 대기환경 감시. *기상기술정책*, **1(3)**, 67-74.
- 김지영, 최병철, Anne Jefferson, 문길주, 2003: 2001년 봄철 제주도 고산에서 측정된 에어러솔의 광산란 및 흡수 특성. *한국기상학회지*, **39(2)**, 239-250.
- 송근용, 염성수, 2004: ACE-Asia 기간 중 해양성/대륙성 구름의 미세물리적 대조에 대한 연구. *한국기상학회지*, **40(2)**, 177-189.
- 윤순창, 김지영, 2008: 유/무인항공기를 이용한 기후변화 감시. *기상기술정책*, **1(3)**, 85-93.
- Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227-230.
- Chameides, W. L., and M. Bergin, 2002: Soot takes center stage. *Nature*, **297**, 2214-2215.
- Chand D., T. L. Anderson, R. Wood, R. J. Charlson, Y. Hu, Z. Liu, and M. Vaughan, 2008: Quantifying above-cloud aerosol using spaceborne lidar for improved understanding of cloudy-sky direct climate forcing. *J. Geophys. Res.*, **113**, D13206, doi:10.1029/2007JD009433.
- Charlson, R. J., J. E. Lovelock, M. O. Andreae, and S. G. Warren, 1987: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate. *Nature*, **326**, 655-661.
- Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley Jr., J. E. Hansen, and D. J. Hofmann, 1992: Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, **255**, 423-430.
- Choi, Y. S., R. J. Park, and C.-H. Ho, 2009: Estimates of ground-level aerosol mass concentrations using a chemical transport model with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol observations over East Asia. *J. Geophys. Res.*, **114(D4)**, doi:10.1029/2008JD011041.
- Christner, B. C., C.E. Morris, C.M. Foreman, R. Cai, and D.C. Sands, 2008: Ubiquity of biological ice nucleators in snowfall. *Science*, **319**, 1214.
- Collins, W. D., P. J. Rasch, B. A. Boville, J. J. Hack, J. R. McCaa, D. L. Williamson, B. P. Briegleb, C. M. Bitz, S. J. Lin, and M. Zhang, 2006: The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model: CAM3. *J. Climate*, **19(11)**, 2122-2161.
- Collins, W. J., et al., 2008: Evaluation of HadGEM2 model, Hadley Centre Technical Note 74, available at <http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html> last access: 11 November 2009.
- Cox, P. M., P. P. Harris, C. Huntingford, R. A. Betts, M. Collins, C. D. Jones, T. E. Jupp, J. A. Marengo, and C.

- A. Nobre, 2008: Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. *Nature*, **453**, 212-215.
- Han, J. S., K. J. Moon, and Y. J. Kim, 2006: Identification of potential sources and source regions of fine ambient particles measured at Gosan background site in Korea using advanced hybrid receptor model combined with positive matrix factorization. *J. Geophys. Res.*, **111**(D22), doi:10.1029/2005JD006577.
- Holben, B. N., *et al.*, 1998: AERONET: A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16.
- Holben, B. N., *et al.*, 2001: An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET. *J. Geophys. Res.*, **106**(D11), 12067-12097.
- Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell, G. Shi, Y. J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, 2003: An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Hwang, H., and C.-U. Ro, 2005: Single-particle characterization of four aerosol samples collected in ChunCheon, Korea, during Asian dust storm events in 2002. *J. Geophys. Res.*, **110**, D23201. doi:10.1029/2005JD006050.
- Hwang, H., and C.-U. Ro, 2006: Direct observation of nitrate and sulphate formations from mineral dust and sea-salts using low-Z particle electron probe X-ray microanalysis. *Atmos. Environ.*, **40**, 3869-3880.
- Hwang, H., H. Kim, and C.-U. Ro, 2008: Single-particle characterization of aerosol samples collected before and during an Asian dust storm in Chuncheon, Korea. *Atmos. Environ.*, **42**, 8738-8746.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate change 2007- The scientific basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jang, M., N.M. Czoschke, S. Lee, and R.M. Kamens, 2002: Heterogeneous atmospheric aerosol production by acid-catalyzed particle-phase reactions. *Science*, **298**, 814-817.
- Jung, J., H. Lee, Y. J. Kim, X. Liu, Y. Zhang, M. Hu, and N. Sugimoto, 2009: Optical properties of atmospheric aerosols obtained by in situ and remote measurements during 2006 Campaign of Air Quality Research in Beijing (CAREBeijing-2006). *J. Geophys. Res.*, **114**, doi:10.1029/2008JD010337.
- Kahn, R., J. Anderson, T. Anderson, T. Bates, F. Brechtel, A. Clarke, E. Dutton, R. Flagan, R. Frouin, H. Fukushima, B. Holben, S. Howell, B. Huebert, A. Jefferson, H. Jonsson, K. Carrico, O. Kalashnikova, J. Kim, S.-W. Kim, P. Kus, W.-H. Li, J. Livingston, S. Masonis, C. McNaughton, J. Merrill, S. Mukai, T. Murayama, T. Nakajima, P. Quinn, J. Redemann, M. Rood, P. Russell, I. Sano, B. Schmid, J. Seinfeld, N. Sugimoto, J. Wang, E. Welton, J.-G. Won, and S.-C. Yoon, 2004: Environmental snapshots from ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S14, doi:10.1029/2003JD004339.
- Kaufman, Y. J., D. Tanre, O. and Boucher, 2002: A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, **419**, 215-223.
- Kim, B. G., S. E. Schwartz, M. A. Miller, and Q. Min, 2003: Effective radius of cloud droplets by ground-based remote sensing: Relationship to aerosol. *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), doi:10.1029/2003JD003721.
- Kim, B. G., S. A. Klein, and J. R. Norris, 2005: Continental liquid water cloud variability and its parameterization using Atmospheric Radiation Measurement data. *J. Geophys. Res.*, **110**(D15), doi:10.1029/2004JD005122.
- Kim, B. G., M. A. Miller, S. E. Schwartz, Y. Liu, and Q. Min, 2008: The role of adiabaticity in the aerosol first indirect effect. *J. Geophys. Res.*, **113**(D5), doi:10.1029/2007JD008961.
- Kim, D.-H., B. J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Takemura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2003: Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2003JD003387.
- Kim, J., A. Jefferson, S.-C. Yoon, and S.-W Kim, 2006a: Aerosol hygroscopic properties at Gosan, Korea during Asian dust, pollution and biomass burning episodes in April 2001. *Atmos. Environ.*, **40**(8), 1550-1560.
- Kim, J., S.-C. Yoon, S.-W. Kim, F. Brechtel, A. Jefferson, E.G. Dutton, K.N. Bower, S. Cliff, and J.J. Schauer, 2006b: Chemical apportionment of shortwave direct aerosol radiative forcing at the Gosan super-site, Korea during ACE-Asia. *Atmos. Environ.*, **40**(35), 6718-6729.
- Kim, J., C. H. Jung, B.-C. Choi, S.-N. Oh, F. J. Brechtel, S.-C. Yoon, and S.-W. Kim, 2007a: Number size distribution of atmospheric aerosols during ACE-Asia dust and precipitation events. *Atmos. Environ.*, **41**, 4841-4855.
- Kim, J., J. Lee, H. C. Lee, A. Higurashi, T. Takemura, and C. H. Song, 2007b: Consistency of the aerosol type classification from satellite remote sensing during the ABC EAREX campaign. *J. Geophys. Res.*, **112**, p.D22S33.
- Kim, J., J.-M. Yoon, M. H. Ahn, B. J. Sohn, and H. S. Lim, 2008: Retrieving aerosol optical depth using visible and mid-IR channels from geostationary satellite MTSAT-1R. *International Journal of Remote Sensing*, **29**(21), 6181-6192.
- Kim, J. H., S. S. Yum, Y.-G. Lee, and B.-C. Choi, 2009a: Ship measurements of submicron aerosol size distributions over the Yellow sea and the East China Sea. *Atmos. Res.*, **93**, 700-714.
- Kim, M.-K., K. M. Lau, M. Chin, K.-M. Kim, Y. C. Sud, and G. K. Walker, 2006: Atmospheric teleconnection over

- Eurasia induced by aerosol radiative forcing during boreal spring. *J. Climate*, **19**, 4700-4718.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, A. Jefferson, J.-G. Won, E. G. Dutton, J. A. Ogren, and T. L. Anderson, 2004b: Observation of enhanced water vapor in Asian dust layer and its effect on atmospheric radiative heating rates. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L18113, doi:10.1029/2004GL020024.
- Kim, S.-W., A. Jefferson, S.-C. Yoon, E. G. Dutton, J. A. Ogren, F. P. J. Valero, J. Kim, and B. N. Holben, 2005: Comparisons of aerosol optical depth and surface shortwave irradiance and their effect on the aerosol surface forcing estimation. *J. Geophys. Res.*, **110**, D07204, doi:10.1029/2004JD004989.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J. Kim, and S.-Y. Kim, 2007: Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR and AERONET Sun/sky radiometer measurements. *Atmos. Environ.*, **41**(8), 1634-1651.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, and J. Kim, 2008a: Columnar Asian dust particle properties observed by sun/sky radiometer from 2000 to 2006 in Korea. *Atmos. Environ.*, **42**, 492-504.
- Kim, S.-W., S. Berthier, J.-C. Raut, P. Chazette, F. Dulac, and S.-C. Yoon, 2008b: Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using a ground-based lidar in Seoul, Korea. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 3705-3720.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, E.G. Dutton, J. Kim, C. Wehrli, and B.N. Holben, 2008c: Global surface-based Sun photometer network for long-term observations of column aerosol optical properties: intercomparison of aerosol optical depth. *Aerosol Science and Technology*, **49**, 1-9.
- Kim, S.-W., E.-S. Chung, S.-C. Yoon, B.-J. Sohn, and N. Sugimoto, 2009b: Intercomparisons of cloud top and bottom heights from CloudSat, CALIPSO, MODIS, and ground-based LIDAR. *International Journal of Remote Sensing*, Accepted.
- Kulmala, M., *et al.*, 2001: Overview of the international project on biogenic aerosol formation in the boreal forest (BIOFOR). *Tellus*, **53B**, 324-343.
- Lee, K. H., Y. J. Kim, and W. von Hoyningen-Huene, 2004: Estimation of aerosol optical thickness over northeast Asia from Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) data during the 2001 ACE-Asia intensive observation period. *J. Geophys. Res.*, **109**(D19), doi: 10.1029/2003JD004126.
- Lee, Y. S., 2006: Predicted CCN spectra properties by coupling aerosol size distributions and size-resolved hygroscopicity in Houston, Texas in 2004. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**(4), 253-263.
- Lee, Y. S., 2006: In Situ size-resolved hygroscopic growth and size distributions measurements of Asian dust aerosols off the California coast in 2003. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**(5), 313-321.
- Lee, Y. S., *et al.*, 2006: Seasonal aerosol optical properties at Anmyon-do Global Atmosphere Watch Observatory, Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**(5), 265-275.
- Lee, Y. G., H.-W. Lee, M.-S. Kim, C. Y. Choi, and J. Kim, 2008: Characteristics of particle formation events in the coastal region of Korea in 2005. *Atmos. Environ.*, **42**(16), 3729-3739.
- Lelieveld, J., *et al.*, 2001: The Indian Ocean experiment: Widespread air pollution from South and Southeast Asia. *Science*, **291**, 1031-1036.
- McFiggans, G., *et al.*, 2006: The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 2593-2649.
- Menon, S., J. Hansen, L. Nazarenko, Y. and Y. Luo, 2002: Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Nature*, **297**, 2250-2252.
- Myhre, G., 2009: Consistency between satellite-derived and modeled estimates of the direct aerosol effect. *Science*, **325**, 187-190.
- Nakajima T., S.-C. Yoon, V. Ramanathan, G.-Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B.-J. Sohn, S.-W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.-H. Lin, C.-T. Lee, D. Goto, and N. Schutgens, 2007: Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009.
- Nature, 2009a: A dusting snow. *Nature*, **460**, 154.
- Nature, 2009b: Particulate power. *Nature*, **457**, 638-639.
- Nature, 2009c: Time for early action. *Nature*, **460**, 12.
- O'Dowd, C. D., P. Alto, K. Hameri, M. Kulmala, and T. Hoffmann, 2002: Marine aerosol formation from biogenic iodine emissions. *Nature*, **417**, 632-636.
- Park, R. J., *et al.*, 2005: Export efficiency of black carbon aerosol in continental outflow: Global implications. *J. Geophys. Res.*, **110**(D11), doi:10.1029/2004JD005432.
- Petit, J. R. *et al.*, 1997: Four climate cycles in Vostok ice core. *Nature*, **387**, 359-360.
- Pilewskie, P. 2007: Aerosols heat up. *Nature*, **448**, 541-542.
- Quaas, J., S. Bony, W. D. Collins, L. Donner, A. J. Illingworth, A. Jones, U. Lohmann, M. Satoh, S. E. Schwartz, W.-K. Tao, and R. Wood, 2009a: Current understanding and quantification of clouds in the changing climate system and strategies for reducing critical uncertainties. edited by: J. Heintzenberg and R. J. Charlson, *Perturbed Clouds in the Climate System*, Proceedings Ernst Strungmann Forum, MIT press, Cambridge, ISBN 978-0-262-01287-4, p. 576.
- Quaas, J., *et al.*, 2009b: Aerosol indirect effects- general circulation model intercomparison and evaluation with

- satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8697-8717.
- Qian Y., D. Gong, J. Fan, L. R. Leung, R. Bennartz, D. Chen, and W. Wang, 2009: Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling. *J. Geophys. Res.*, **114**, D00K02.
- Ramanathan, V., and G. Carmichael, 2008: Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, **1**, 221-227.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld, 2001a: Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, **294**, 2119-124.
- Ramanathan, V., *et al.*, 2001b: Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J. Geophys. Res.*, **106**, 28, 371-28, 398.
- Ramanathan, V., and A. M. Vogelmann, 1997: Greenhouse effect, atmospheric solar absorption, and the Earth's radiation budget: From the Arrhenius-Langley era to the 1990's. *Ambio*, **26(1)**, 38-46.
- Ro, C.-U., *et al.*, 2000: Determination of chemical species in individual aerosol particles using ultra-thin window EPMA. *Environ. Sci. and Tech.*, **34**, 3023-3030.
- Ro, C.-U., *et al.*, 2001a: Chemical speciation of individual atmospheric particles using low-Z electron probe X-ray microanalysis: characterizing "Asian dust" deposited with rainwater in Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, **35**, 4995-5005.
- Ro, C.-U., *et al.*, 2001b: Single particle analysis of aerosols at Cheju Island, Korea, using low-Z electron probe X-ray microanalysis: a direct proof of nitrate formation from sea salts. *Environ. Sci. and Tech.*, **35**, 4487-4494.
- Roeckner, E., *et al.*, 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: model description, Report No. 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 127pp.
- Seinfeld, J. H., *et al.*, 2003: ACE-ASIA: Regional climatic and atmospheric effects of Asian dust and pollution. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85(3)**, 367-380.
- Szidat, S., 2009: Sources of Asian haze. *Science*, **323**, 470-471.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853-17873.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Takemura, T., M. Egashira, K. Matsuzawa, H. Ichijo, R. O'shi, and A. Abe-Ouchi, 2009: A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3061-073.
- Tett, S. F. B., P.A. Stott, M.R. Allen, W.J. Ingram, and J.F.B. Mitchell, 1999: Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, **399**, 569-572.
- Tollefson, J., 2009a: Climates smoky spectre. *Nature*, **460**, 29-32.
- Tollefson, J., 2009b: Stopping the soot. *Nature*, **460**, 31.
- Twomey, S. A., 1977: The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149-1152.
- Twomey, S., 1991: Aerosols, clouds and radiation. *Atmos. Environ.*, **25A**, 2435-2442.
- Wang, J., S. A. Christopher, F. Brechtel, J. Kim, B. Schmid, J. Redemann, P. B. Russell, P. Quinn, and B. N. Holben, 2003: Geostationary satellite retrievals of aerosol optical thickness during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, **108**, 1-14.
- Won, J.-G., S.-C. Yoon, S.-W. Kim, A. Jefferson, E. G. Dutton and B. Holben, 2004: Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with sun/sky radiometer and lidar measurement at Gosan, Korea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82(1)**, 115-130.
- Yoon, S.-C., J.-G. Won, A. H. Omar, S.-W. Kim, and B.-J. Sohn, 2005: Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and the AERONET data. *Atmos. Environ.*, **39(35)**, 6620-6630.
- Yoon, S.-C., S.-W. Kim, M.-H. Kim, N. Sugimoto, and A. Shimizu, 2008: Ground-based Mie-scattering lidar measurements of aerosol extinction profiles during ABC-EAREX2005: comparisons of instruments and inversion algorithms, *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 377-396.
- Yum, S. S., G. Roberts, J. H. Kim, K. Song, D. Kim, 2007: Submicron aerosol size distributions and cloud condensation nuclei concentrations measured at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Clouds-East Asian Regional Experiment 2005. *J. Geophys. Res.*, **112(D22)**, doi:10.1029/2006JD008212.
- Yum, S. S., J. G. Hudson, K. Y. Song, and B.-C. Choi, 2005: Springtime cloud condensation nuclei concentrations on the west coast of Korea. *Geophys. Res. Lett.*, **32(9)**, doi:10.1029/2005GL022641.