

기상학회 60년간 환경분야 연구 역사와 전망

김철희^{1)*} · 박록진²⁾ · 김상우²⁾ · 이영희³⁾ · 이상현⁴⁾ · 송창근⁵⁾

¹⁾부산대학교 대기환경과학과, ²⁾서울대학교 지구환경과학부, ³⁾경북대학교 천문대기과학과,
⁴⁾공주대학교 대기과학과, ⁵⁾울산과학기술원 도시환경공학과

(접수일: 2022년 12월 27일, 수정일: 2023년 2월 27일, 게재확정일: 2023년 3월 1일)

60-Year Research History and Future Prospects in Environment Field in Korean Meteorological Society

Cheol-Hee Kim^{1)*}, Rokjin Park²⁾, Sang-Woo Kim²⁾, Young-Hee Lee³⁾,
Sang-Hyun Lee⁴⁾, and Chang-Keun Song⁵⁾

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

²⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

³⁾Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

⁴⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

⁵⁾Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute
of Science and Technology, Ulsan, Korea

(Manuscript received 27 December 2022; revised 27 February 2023; accepted 1 March 2023)

Abstract Research papers in the field of atmospheric environment published in three Journals: Journal of Korean Meteorological Society, Atmosphere, and Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences, are all summarized over period of 60 years since the establishment of Korea Meteorological Society (KMS) in 1963. In addition, current research trends and future outlook in the atmospheric environment field has been also highlighted. The results of historical records published in three KMS journals indicated that the activities, contents, and scope of researches carried out by KMS members in the field of atmospheric environment have yielded the enormous and rapid progress in each of the all four areas over 60 years. In particular, as the chronological progress of observational instruments and availability of satellite data such as from GEMS can be a great asset to deepen the observational and modeling researches in the current and future studies, it is highly anticipated that the more progressive and in-depth studies can be achievable to abate the air pollutants over the Korea as well as northeast Asia.

Key words: Atmospheric environment, KMS journals, APJAS

1. 서론

1963년 (사)한국기상학회가 창립된 후, 1965년 3월에 11편의 논문을 실어서 한국기상학회지 창간호 1권

(1호)가 발행되면서 기상학회지 논문의 역사가 시작되었다. 현재 (사)한국기상학회 60년이 되는 시점에서 지금까지 한국기상학회지(이하 기상학회지로 명명) 논문의 역사를 정리하는 것은 매우 필요해 보이며 학문적으로도 매우 의미심장하다 할 수 있다. 학회 초창기인 1960~1970년대에 연구자들의 어려운 여건속에서도 학회지 논문이 지속적으로 출판되었고, 1980년대부터 연구자들이 늘어나고 연구 내용도 다양화되면서 2000년대에 기상학회지가 국문 학술지와 영문 학술지

*Corresponding Author: Cheol-Hee Kim, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-3687, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

로 구분되었다. 국문 학술지는 2007년 ‘대기’지로 일원화하여 국내 연구자들의 연구의 연속성을 유지하였고, 영문 학술지인 Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences (APJAS)는 2008년 첫 발간된 이후 지금까지 국내·외 연구활동의 역사를 이어가고 있다. 국·영문 기상학회의 다양한 연구 분야 중 환경분야도 많은 연구자들의 눈부신 연구 결과들이 출간되고 있으며, 향후에도 본 학회지를 통해 환경분야 논문의 질과 양에서 우수한 연구 역사를 만들어 나갈 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 기상학회가 창립된 1963년 이후 현재에 이르기까지 60년간(1963~2022년) 학회지에 수록된 논문 중에서 환경분야의 역사를 살펴보고 초창기 어려운 여건속에서도 어떤 대기환경 연구가 수행되었으며, 시대에 따라 어떤 연구 특징들이 있었는지를 살펴보고 환경분야 논문의 역사를 정리하고자 한다. 나아가 향후 환경분야 연구의 연구 전망을 논의해 보고, 눈부신 후속 연구 결과를 도출하는 데에 기여하고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 자료, 방법 및 조사 범위

본 연구의 자료 조사 기간은 학회지 창간호 1권(1호)가 발행된 1965년부터 2022년까지이며, 조사기간의 기상학회지, 대기지, APJAS에 출판된 모든 논문 중에서 환경분야에 국한하여 시대별로 논문에 나타나 연구의 특징을 조사하였다. 연구 방법으로서 환경분야 논문 내용을 몇 가지로 다시 세분한 후, 이를 시대 별로 그 특징을 추적하여 연구 내용의 변천사를 정리하는 것에 주력하였다. 조사된 연구 논문들은 대부분 기상학회 저널(기상학회지, 대기지, APJAS)에 출판된 연구 논문들을 우선 대상으로 하였으나, 당시의 시대적 특징을 설명하는 데 필요하다고 판단되어 SCIE 등 외국 저널에 출판된 환경분야 논문들도 부분적으로 인용하였다.

2.2 환경분야 연구내용 구분

기상학회지에 출판된 논문 중에서 내용상 환경분야라 함은 광의적으로 대기오염과 연관되는 연구를 모두 포함하므로, 본 조사에서는 대기오염과의 연관성을 다루는 모든 연구들, 예를 들어, 오존과 미세먼지(에어로졸) 등의 관측 결과 분석, 대기오염 모델링 연구뿐만 아니라 대기오염의 유·불리를 해석하는 국지 기상, 종관기상, 미기상 규모 현상의 분석적 연구들을 모두 포함시켰다. 따라서 기상 영향 분석뿐만 아니라 미세먼지(에어로졸)의 광화학 및 화학적 특성, 위성자료 알고리즘 연구 등 대기오염 관련 연구들은 모두

본 연구의 대상에 포함되며, 특히 2002년 이후 몇 년간 특히 자주 발생했던 황사 사례와 황사에보 현업화가 진행됨에 따라 황사 관련 연구 논문이 많이 출판되었으므로 황사 관련 분야를 독립된 세부 분야로 구성하였다. 그 결과, 60년간 기상학회에서 출판된 환경분야 연구 논문들을 크게 5개 세부 영역: ① 대기질 관측 및 분석 연구, ② 황사 및 대기질 모델링 연구, ③ 대기경계층 및 난류 연구 ④ 위성 및 지상 원격탐사 연구, ⑤ 상세 바람장 구형 연구 및 기타로 분류하였다.

분류 특성상 분야 ①은 지상 대기질 관측기반 연구이며, 분야 ②는 황사를 포함한 미세먼지 등의 대기질 모델링 연구를 총칭하며, 분야 ③은 대기오염물의 연직 확산과 연관된 대기경계층 연구와 난류 플럭스 혹은 난류강도 등 미기상 기반의 난류 연구들도 분야 ③에 포함시켰다. 분야 ④는 위성 분야 외에도 지상 원격탐사 장비, 예를 들어 에어로졸 라이다(Aerosol Lidar), 스카이라디오미터(sky-radiometer), 네펠로미터(Nephelometer) 등을 이용한 상공의 에어로졸 혹은 대기오염물의 연직 구조 등을 파악하는 연구분야이다. 이 분야는 고도별 대기오염물질 정보를 입체적으로 분석한다는 점에서 지상자료만을 다루는 분야 ①과 구분하였다. 분야 ⑤는 3차원 대기질 모델에 필요한 입력자료인 상세 기상장 구축 연구와 아울러 도시 스케일 대기환경 구형분야를 의미하며, 기타 애매한 분야의 소수 논문 또한 분야 ⑤에 할당하였다.

이상의 5개 세분된 영역에서의 논문 편수 등을 고려하여 시간적으로는 3 시대, 즉, ① 1990년 이전, ② 1991~2000년, ③ 2001~2010년, ④ 2022년 이후로 구분하였고, 각 시대별 환경분야 논문의 특징을 세부 분야별로 요약하였다. APJAS의 경우 출판 역사가 길지 않아서 독립적인 장(3장 3절)으로 그 특징을 기술하였고, 제4장에서는 지금까지의 연구 쟁점들을 기술하였으며, 제5장에서는 현재와 향후 연구 방향을 검토하고 이를 요약하였다.

3. 결 과

3.1 기상학회지 및 대기지 60년 환경연구 역사

60여년간 기상학회지(대기지 포함)에 출판된 환경분야 총 논문 편수는 1990년 이전 36편, 1990~2000년 62편, 2001~2010년 78편, 2010년 이후 75편으로 파악되었다(Fig. 1). 각 세부 연구분야별 논문 특징은 아래에 요약하였다.

① 대기질 관측 및 분석 연구 - 대기질 관측 연구 분야의 논문 출판 편수는 시대에 따른 급격한 변화는 없는 반면, 연구 내용에서는 시간에 따라 지상 측정 장비와 대기질 자료가 많아지면서 대기질을 해석하는

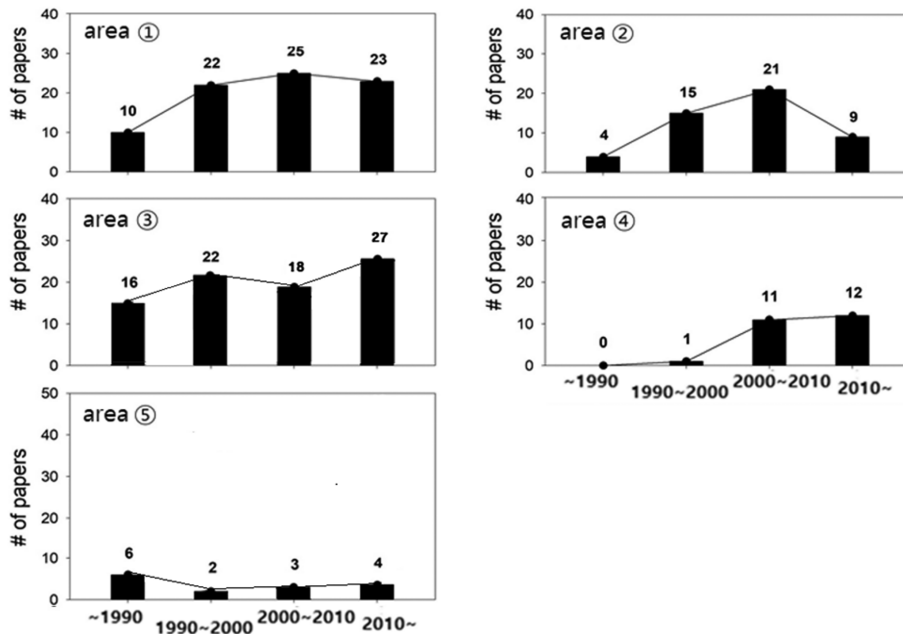


Fig. 1. Number of publications of five sub-divided research areas in environment field in the 60-year history of Korean meteorological society.

내용이 다양해지는 것이 특징이었다. Figure 1에서 알 수 있듯이 논문 편수는 1990년까지 10여편, 1990~2000년 22편, 2001~2010년 25편, 2010년 이후 23편 등 매년 큰 변동 없이 꾸준히 유지되었다. 대기오염 지상 관측 자료가 부족했던 초창기 관측기반 논문은 많지 않았으나, 대기질 관련 기상조건 해석 연구가 매년 일정 수준 이상 출판되었다. 그러나 관측장비가 부족했던 초창기(1990년 이전)에도 입자상 물질의 분석적 연구들이 출판되었다는 것은 주목할 만하였는데, 예를 들어 에어로졸 입자 크기(size distribution) (Cho, 1980) 혹은 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth; AOD) (Cho et al., 1984) 등 입자상 오염물질의 물리적 특성 연구 결과가 초창기에 출판된 바 있으며, 지상 오존 (Kim, 1982), 오존전량 변동(Cho et al., 1989) 등 기체상 오염물질 특성 연구 또한 관측 기반으로 출판되었다. 학회지에 수록된 논문 작성 시기는 초창기 관측 장비가 턱없이 부족했던 1970년대로서, 열악한 연구 환경을 딛고 기초적인 관측기반 연구가 시작되었다는 점에서 당시의 연구 열정을 확인할 수 있었다.

1990년대에는 한반도 대기질 특성과 기상조건의 연관성 연구가 매우 활발하였다(Jhun, 1991; Oh and Yoon, 1996; Lim and Kim, 1996; Jung et al., 1996; Lee and Park, 1997). 당시에는 산성비 문제가 이슈화 되면서 빗물 속 대기오염물질 화학성분을 분석한 논문이 출판되기 시작하였다(Choi et al., 1997; Kim et al., 2000a;

Choi et al., 2000). 1990년대 후반에는 지상 오존 및 에어로졸과 같은 2차 대기오염물질의 실측 자료가 공개되면서 우리나라 지역별 대기질 특성 분석이 가능해졌고 이와 연관된 국지기상조건 연구 역시 매우 활발하였다(Kim et al., 1997; Choi et al., 1999; Kim et al., 2000b). 2000년대에 와서는 특히 황사 발생이 빈번해지면서 황사의 물리적 특성(수농도, 크기분포), 화학적 특성(질량농도, 화학 조성), 광학적 특성(산란계수, 흡수계수) 연구들이 본격화되었고 논문 출판 편수도 절정을 이루었다(Choi et al., 2002; Kim et al., 2003; Choi, 2003; Kim and Song, 2004; Kim et al., 2004; Cha et al., 2005; Kim et al., 2007; Lee et al., 2008; Jo and Kim, 2010; Lim et al., 2010).

2010년 이후에는 안면도 기후변화 감시소에서 관측된 기후변화 원인물질을 포함한 기체 및 입자상 물질의 물리 및 화학적 특성이 출판되기 시작하였다(Goo et al., 2008; Ham et al., 2019a; Yoo et al., 2021; Choi et al., 2020; Seo et al., 2021). 안면도 기후변화 감시소는 1998년 설립되었으나 논문 출판은 2000년 후반부터 시작하여 2010년대에 본격화된 것으로 조사되었다(Ham et al., 2019b). 2020년대에 와서는 항공기 관측을 이용한 상층 대기오염물질 관측 캠페인이 시작되었는데, 2016년 4~6월까지 국립환경과학원과 미국 NASA 주도하에 수도권 중심 Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) 캠페인이 수행되면서 항공기 및

기상 관측선 기상 1호 등 육지 및 해양에서의 에어로졸, 구름 응결핵, 미세먼지 질량 및 다양한 미세먼지 화학성분 관측 농도가 분석되었다(Cha et al., 2016; Park et al., 2016).

전반적으로 평가해 볼 때, 환경분야 관측기반 연구는 기상학회 60년 전 기간에 걸쳐 대기질 관측자료와 이와 연관된 기상 특성 분석연구는 시대를 초월하여 연구 내용의 주류를 이루었다. 예를 들어 고농도 발생시 종관기상 변수 특성(Lim and Kim, 1996; Jung et al., 1996; Lee and Park 1997), 장거리 수송과 연관된 동아시아 상층 대기 순환 특성(Jhun, 1991), 지역 대기오염과 연관된 국지 기상 특성(Jung et al., 1996; Lim et al., 1996; Lee and Jung, 2001; Kim et al., 2002; Jee et al., 2022), 대기질 관련 대기경계층 특성 연구(Lee et al., 1997b; Min et al., 1999; Choi, 2003; Kim and Kwon, 2007), 황사 발생시 종관기상 특성(Lee and Kim, 1997; Chung and Yoon, 1996; Jhun et al., 1999; Song and Kim, 2005) 등 다양한 규모의 기상 특성이 대기질과 연관되어 분석되었다. 국지 규모 기상효과 해석을 위해 1990년대 활용되기 시작한 짧은 주기와 높은 해상도의 AWS (Automatic Weather System)의 활용 방안(Hong et al., 2013) 등의 연구도 당시의 연구 목표가 대기환경 영향 분석을 위한 기상 자료 활용이라는 측면에서 논문이 다루어졌으며, 이러한 논문들을 통해 당시의 연구 경향과 방법을 확인할 수 있었다.

② **황사 및 대기질 모델링 연구** - 황사 모델링 연구 역사는 2000년 초 시행된 황사예보 현업화라는 시대 흐름과 함께 발전하였음을 확인하였고, 황사 이외의 대기오염물질 모델링 연구는 2000년대 후반 공용 모델(Community model)이 등장하면서 그 연구 방법과 내용이 크게 변화하였음을 알 수 있었다. 학회지에 출판된 황사 및 대기질 모델링 논문 편수는 2001~2010년 21편으로 절정을 이루었으나 2010년 이후 오히려 감소하는 경향을 보였는데(Fig. 1), 이는 2013년 APJAS의 특별호가 출간하는 등 상당수의 논문이 APJAS와 양분된 것에 일부 기인한 것으로 보인다(제 3.2절). 2010년 후반부터 KORUS-AQ와 같은 대규모 관측 캠페인 자료가 공개되면서 이를 검증하는 모델링 연구 논문이 다시 증가하여 2022년 이후에는 다시 증가하는 경향을 확인하였다.

황사 모델링의 기반 연구는 역사적으로 1990년대에도 일부 진행되었으나(Chung and Park, 1997a, 1997b), 2002년 4월 서울 미세먼지 농도가 시간평균 $3,311 \mu\text{g m}^{-3}$ 를 기록하면서 황사 현업모델 운영의 계기가 되면서 급변하였다. 황사 관련 연구로서 2000년 초반부터 발원지 토양 성분 분석, 황사 플럭스 매개변수화, 발원지의 입계 풍속 연구 등 현업에 필요한 인자가 분

석되었으며(Park and In, 2003; In and Park, 2003a, 2003b; Park and Lee, 2004), 황사 사례의 발원지 기상 특성(Chun et al., 2003a; Chung et al., 2004; Lee and Kim, 2008), 황사 발생시 물리화학적 특성 분석 및 모델링-관측 비교연구(Chun et al., 2003b; Kim and Song, 2004; Shin et al., 2004; Cho et al., 2007; Park et al., 2013), 현업 모델 성능 연구(Lee et al., 2012a; Kang et al., 2022) 등이 2000년 중반 이후까지 이어졌다. 그러나 2010년 이후에는 황사 발생이 줄어들었고, 논문 편수도 감소한 것으로 나타났다(Fig. 1).

대기질 모델링 연구는 Community model 등장 전후로 상당한 차이를 보였다. 초창기인 1970년대까지는 대기질 모델링 연구는 전무한 것으로 조사되었으며, 1980년대에는 환경영향평가가 의무화됨에 따라 가우시안 모델(Gaussian model)을 이용한 연구가 일부 존재하였으나(Park, 1983a), 본격적으로 3차원 기상장 기반의 모델링 연구가 시작된 것은 1990년대이다. 그러나 여전히 3차원 대기질 모델링에 필요한 입력자료인 격자 기반 중규모 3차원 기상장을 도출하는 작업이 수월하지 않았던 시기로서, 모델링 입력자료인 3차원 기상장 도출 방법을 논의한 논문이 많았다. 대기질 모델링을 위한 3차원 국지 기상장은 중규모 기상모델을 이용한 예측적(prognostic) 방법과 관측 기반의 진단적(diagnostic) 도출 방법으로 구별하여 그 장단점 논의 및 실제 활용 여부가 연구 주제였을 정도로 당시의 열악한 대기질 모델링 연구 환경을 대변해 준다(Park, 1992a, b; Kim and Park, 1993; Kim and Jhun, 1992; Han and Park, 1992). 결국 당시에는 복잡한 지형이 반영되는 3차원 바람장 및 난류장 도출에 대한 다수의 논문과 이를 이용한 단순한 비반응 대기오염 확산 모델링 성공 여부가 당시의 연구의 관심사로 보인다(Park and Kim, 1996). 1990년대 후반에 와서는 대기 중 화학 반응까지 고려한 대기질 모델링 결과가 출판되기 시작하였고(Kim and Park, 1999a; Kim and Park, 1999b), 모델링에 필요한 배출량 연구들이 다수 게재되기도 하였다(Park and Kim, 1996; Kim et al., 1999). 이러한 연구 경향은 2000년 중반까지 이어지면서 상당히 오랫동안 모델링 연구분야의 풀어야 할 중요한 이슈로 인식된 것으로 판단된다.

2000년 중반에 와서는 Community 모델인 CMAQ (The Community Multiscale Air Quality Modeling System) 혹은 WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry) 등의 공용 모델이 보급되면서 대기질 모델링 분야의 연구저변이 크게 확대되었고(Kim et al., 2006), 2010년대에 와서는 공용 모델을 이용한 미세먼지 현업 예보가 시행되면서 대기질 모델 연구의 전성기로 평가할 만하였다. 당시의 미세먼지 현업 예보의 기상장 정확도를 높이기 위하여

현업 기상모델과 직접 커플링 하거나, 배출량 개선을 위한 인버스 모델링 기법을 도입하여 배출량을 보정하는 등 실제에 가까운 대기질 모델링 결과를 도출하기 위하여 그 입력자료를 고도화하는 연구가 많았다(Lee et al., 2012a; Lee et al., 2015; Kim et al., 2016). 비슷한 시기에 국내에서도 국지규모 모델이 아닌 전지구 대기화학 모형인 GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System-Chemistry)을 이용한 연구가 시작되었으며, GEOS-Chem의 화학적 상세화 기법을 지역모델에 접합하여 동아시아 대기오염물질을 정량적으로 연구하거나 시베리아 산불과 같은 사건이 한반도에 미치는 영향을 분석하는 연구도 진행되었다(Park et al., 2009).

③ 대기경계층 및 난류 연구 - 대기경계층 및 난류 연구분야의 출판된 논문 편수는 1990년 이전 16편, 1990년대 22편, 2000년대 18편, 2010년 이후 27편으로 지금까지 매년 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 시대적으로 특징을 살펴보면, 학회지 초창기인 1970년대와 1980년 중반까지는 대기경계층 및 난류 연구에 사용될 국내의 관측자료의 부족으로 인해 대부분 외국의 관측자료를 분석한 논문들이 주류를 이루었다(Lee, 1973a, b; Lee, 1975; Park, 1983b; Kim and Rho, 1983; Yoon, 1986). 예를 들어 Lee (1973a)는 미국 Brookhaven 국립연구소 대기환경실험실에서 얻은 관측자료를 이용하여 캐노피 내부 난류구조와 바람구조, 난류 스펙트럼 분석결과 등이 대표적이다.

1980년대에는 모델링 연구들이 활발하게 이루어졌는데 주로 1차원 대기경계층 모델링 개발과 그 활용 연구들이 다수를 이루었다(Kwon and Joung, 1981; Lee, 1987; Kim and Yoon, 1988; Park and Yoon, 1988). 1980년대 후반에 와서는 라디오존데 등의 국내 특별 관측자료와 정규 기상 관측 자료가 대기경계층 연구에 활용되면서 국내 관측 자료를 이용한 대기경계층 성장 및 연직구조 산출, 이와 연관된 국지 기상 특성을 분석하는 논문이 출판되었다(e.g., Park et al., 1989; Lee et al., 1989; Park and Yoon, 1991; Park, 1992a, b; Jhun and Lee, 1995; Min et al., 1999). 미기상 및 난류의 모델링 분야에서는 1990년대 초반에는 간단한 2차 모멘트 난류 종결을 이용한 대기 경계층 수치실험(Han and Park, 1992)과 대기 경계층 3차원 바람장에 관한 진단적 모델링(Kim and Park, 1993)이 수행되었고 1990년 후반부터는 큰 에디 모사(Large Eddy Simulation; LES)를 이용한 대기경계층 난류 연구들이 이루어지기 시작했다(Shin and Lee, 1997; Noh et al., 1997; Kim and Noh, 1999). 모델링과 관측결과를 분석하는 연구 외에도 이론 연구로서 해석해(analytical solution)를 구하여 대기경계층 꼭대기의 역전층에서의 내부 증력과의 공진 조건과 에너지 스펙

트럼을 분석한 연구(Kim et al., 1998) 연구들이 주목할 만하였다.

2000년대에는 새로운 관측 장비가 등장하면서 관측 기반 대기경계층 연구들이 활발하였다. 국내에 에디 공분산 장비가 보급되어 지표층의 난류 플럭스를 분석하여 활용하는 연구결과가 출판되었으며(Park and Lee, 2003; Oh and Ha, 2005; Oh et al., 2007), 라디오존데, UHF 레이더, Terra/MODIS 자료를 활용한 대기 경계층 연직구조에 관한 연구(Kwon et al., 2001; Suk et al., 2004; Kim and Kwon, 2007), CASES-99 국제 대규모 미기상학 관측 프로그램에서 얻어진 관측자료를 기반으로 하여 안정한 대기의 경계층에 특성을 분석한 연구(Ha et al., 2001; Hyun and Ha, 2001; Hyun et al., 2003; Jeon et al., 2004) 등 다양한 논문들이 출판되었다. 모델링 분야에서도 대기경계층 모수화가 대규모 모델에 미치는 영향(Shin and Ha, 2003, 2005; Shim and Hong, 2006) 등이 출판되면서 관측 및 모델링 연구의 논문들이 모두 상당한 연구의 진척을 보였던 시대로 평가할 만하였다.

2010년대에는 보성 종합기상탑(307 m)에 의한 난류의 연직 구조에 대한 입체 관측이 시작되었고 수도권에 도시관측망이 구축(Park et al., 2017)되는 등 다양한 목적으로 대기경계층 및 난류 관측이 크게 증가하였다. 이에 따른 관측기반 연구들이 활발히 이루어졌고(Kwon et al., 2014; Hong et al., 2014; Lim et al., 2016; Lim and Lee, 2019) 특히 도시 난류 및 도시 미기상에 관한 연구도 본격적으로 시작되었다(e.g., Kim et al., 2014; Lee 2015; Lee et al., 2016). 관측기반 연구와 병행하여 수치모델 기반의 대기경계층 연구로서 지면피복 변화에 따른 미기상의 변화를 다룬 연구 등(Park and Kim, 2011; An et al., 2017; Hong et al., 2021) 논문이 최근까지 출판되었다.

④ 위성 및 지상 원격탐사 연구 - 위성자료 활용 연구는 대기오염물질, 특히 오존과 미세먼지를 대상으로 하는 연구 활동이 최근에 더욱 활발해졌고, 2020년 우리나라가 2020년 정지 환경위성 탑재체인 Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS)를 발사함에 따라 과거나 현재보다는 오히려 미래의 연구가 더 기대되는 분야이다.

기상학회지에 출판된 논문 수는, 2000년 이전 레인존데와 도플러 레이더 관측 자료를 이용한 입자상 물질의 연직구조 연구(Lee et al., 1997a) 등 1편을 제외하고는 2001~2010년 11편, 2010년 이후 12편으로서 모두 2000년 이후에 출판되었다(Fig. 1). 이러한 특징은 다양한 지상 원격측정장비가 출현한 시기와 무관하지 않으며, 이는 역으로 위성자료나 원격 탐사 장비가 없었던 2000년 이전까지는 당시의 원격탐사 분야의 열악한 연구환경을 반증하는 것으로도 해석할

수 있다.

2000년 이후 GEMS 발사 이전까지 연구에 사용된 주요 위성자료는 MODIS가 탑재된 극궤도위성인 Terra/Aqua, OMI가 탑재된 극궤도위성위성 Aura, 최근 발사된 정지궤도 위성인 GOES 등에서 산출된 자료로 요약할 수 있다. 시대에 따라 위성자료가 다양해지기 시작하면서 관련 논문 편수도 증가하였다. 주요 연구 내용은 동아시아 AOD 연구(Song et al., 2009), OMI를 이용한 오존 전량 분석 연구(Kim et al., 2013), MODIS를 이용한 황사 탐지 연구(Park et al., 2012), MODIS와 OMI를 동시에 이용한 분석 연구(Lee et al., 2007), 위성과 스카이라디오미터 자료를 통해 수도권 연무를 비교 분석한 연구(Shi et al., 2016) 등 다수의 논문이 출판되었다.

위성분야 외에도 지상 원격탐사 장비로서 에어로졸 라이다, 스카이라디오미터, 네펠로미터 등이 있으며, 에어로졸 라이다는 되돌아오는 레이저 신호를 통해 에어로졸 연직구조를 파악하거나, 에어로졸 연직 정보를 파악하지는 못하지만 스카이라디오미터를 통한 입자상 대기질의 지역 특성을 파악하는 등의 연구가 진행되었다. 이 연구 분야도 최근으로 올수록 활발하였는데, 주요 연구 내용을 시대적으로 살펴보면, 2000년대에는 안면도에서의 에어로졸 광학깊이 분석(Yoon et al., 2007), 스카이라디오미터로 관측한 에어로졸 특성 분석(Koo et al., 2007), 네펠로미터로 관측한 에어로졸 특성 연구(Shim et al., 2008) 등이 있으며, 2010년 이후에도 백령도 등 관측 기반 에어로졸 특성 연구가 절정을 이루었다(Lee et al., 2011; Choi et al., 2011; Lee et al., 2012b; Lee et al., 2013a; Lee et al., 2013b; Shi et al., 2016). 연구내용 또한 과장별 에어로졸 광학두께, 웅스트롬 지수, 입자 크기분포의 물리적 특성뿐만 아니라, 관측 기반 대기오염물질의 장거리 이동(Long-range transport) 원인분석과 지역 배출량 기여도 평가와 연관된 사례별 기상특성 연구 결과 등 관련 연구 내용이 조금씩 변하고 있는 것으로 해석되었다. 아울러 2015~2016년에는 종합 에어로졸 관측 캠페인인 Megacity Air Pollution Studies-Seoul (MAPS-Seoul) campaign과 KORUS-AQ campaign을 수행하면서 항공기를 이용한 입자상 및 기체상 오염물질의 화학성분별 연직 자료까지 입체적으로 수집되면서 기상학회 저널(기상학회지, 대기, APJAS) 뿐만 아니라 SCIE 저널에도 다수 게재된 것으로 알려져 있다.

⑤ **상세 바람장 및 기타** - 급속한 도시화에 따라 도심지 규모의 대기환경은 상세 대기오염 모델링 연구를 필요로 한다. 대기오염 농도가 높은 도심지 영역(100~1,000 km²)의 특성을 구현하기 위해서는 상세 기상장(바람장)이 필요하며 이를 구현하는 연구는 크게 두 가지, 즉 도시모수화 방안과 미규모 수치모형 연

구로 나누어 요약된다. 도시모수화 방안 연구는 중규모 기상 모델에 도시 스케일의 물리 과정을 현실적으로 반영하는 연구이며, 미규모 수치모형 연구는 도시 지역의 건물 형태 정보를 반영하는 전산유체역학 모형(Computational Fluid Dynamic Model; CFD)이나 LES 모형을 독립적으로 이용하는 연구이며, 이런 측면에서 연구 분야 ③의 난류 연구와 부분적으로 중첩된다.

도시 모수화 모형 연구는 중규모 기상모형을 이용하여 도시 지표층 형성에 기여하는 복사, 난류 등 다양한 물리 과정을 명시적으로 모수화하는 연구로서 주로 2000년대 초반에 개발되기 시작하였다. 국내에서는 2008년 논문이 발표되었고(Lee and Park, 2008), 이를 활용한 도시 지역 상세 기상장 산출 연구가 이어졌다(Lee, 2011; Lee and Baik, 2011; Ryu et al., 2011). 이러한 도시모수화 연구는 3차원 중규모 기상 모형과의 결합을 통해 수 km 이내의 제한적인 영역에 적용이 가능한 미규모 수치 모형에 비해 수십 km 이상의 도시 영역에 적용할 수 있어 다중 규모의 복잡한 대기경계층 생성과 활용 연구에 활용되었다.

도시모수화가 연구되기 이전인 1980년까지는 중규모 기상모델 기반으로 다운스케일링 방법을 이용하거나 AWS 자료를 포함한 지상 기상 관측자료를 이용한 진단적 상세화 연구 등과 같이 중규모 대기로부터 도심 대기오염의 확산 분해능을 확보하는 정도의 연구가 있었다(Park and Yoon, 1991; Park, 1992a). 그 이후 오랫동안 MM5, WRF 등의 중규모 대기역학 모델들을 이용한 상세 바람장 적용 연구가 있었고(Hyun and Lee, 1990; Park, 1990; Lee et al., 1998), 2000년대 중반 이후 대기경계층 역학에 기반한 상세 난류 성분을 고려하여 협곡(Park and Kim, 2014b), 방풍벽(Song et al., 2007)에 적용한 연구가 있었다.

독립적 미규모 수치모형 개발 연구는 지역 내 건물과 도시지표 구조물 영향을 반영하는 CFD 모델을 상세 바람장 도출에 활용하였다(Kim and Baik, 2005; Choi et al., 2012; Yang and Kim, 2015; Kim et al., 2019a; Kim et al., 2020). 최근에는 컴퓨터 성능의 비약적인 향상으로, 지리 정보 시스템(Geographical Information System; GIS)을 통해 실제 도시 지역의 복잡한 지표 형태적 특징을 표현하면서 실제 도시 지역에 미규모 수치 모형을 이용한 수~수십 m 격자 해상도의 바람 및 난류 모델링 연구가 활발해지고 있다(Lee and Kim, 2011).

전반적으로 상세 바람장 구현 연구는 다른 연구분야에 비하면 매년 10편 이하로서 상대적으로 논문 편수가 많지 않았으나(Fig. 1), 최근 특히 컴퓨터의 발달로 미세규모에 대하여 고분해능 계산 능력의 개선 및 지형정보를 사용하여 실제 도시구조물의 영향을 파악

할 수 있는 자료 생산이 가능해짐에 따라 향후에도 도시환경 특성에 적합한 맞춤형 상세 모델링 연구가 기대된다. 그 외 기상학회지에 출판된 연구분야에서 제외된 논문, 예를 들어 대기오염 농도의 유·불리를 따지는 연구로서 향후에도 중요하게 다루어질 것으로 보이며, 본 연구에서는 구체적인 연구내용은 생략하였다.

이상 언급된 ①~⑤의 연구 논문 외에도 정책적 연구로서 에어로졸 연구 발전을 위한 정책연구(Kim et al., 2010), 조건부 가치 설문조사를 통한 대기오염에 대한 서울 시민의 인식 변화 조사(Hong et al., 2019) 등이 대기환경 연구 이외의 논문으로 주목할 만하였다.

3.2 APJAS (Asia-Pacific J. of Atmospheric Sciences)의 대기환경연구 역사

APJAS는 2008년 논문 출판이 시작되었고, 2010년 SCIE에 등재되면서 외국 논문들도 본격적으로 포함되기 시작하였다. 2008~2021년 APJAS에 게재된 대기환경분야 연간 논문 편수를 Fig. 2에 제시하였다. APJAS가 SCIE에 등재되기 이전인 2008~2009년에는 2~9편이었고, SCIE 등재 첫해인 2010년 이후 외국 논문도 출판되면서 논문 편수가 소폭 증가하였다. 특히 2013년 APJAS의 특별세션으로 “Dust and Sand Storms (DSS) in East Asia, Vol(49)”이 게재됨에 따라 논문 편수가 30여편으로 급증하였다(Fig. 2).

APJAS 논문의 시대적 흐름은 기상학회지(혹은 대기지)와 다른 양상을 보였다. 연구 내용상 에어로졸을 대상으로 하는 관측 분야(분야 ①)와 위성 원격탐사 연구(분야 ④)가 상대적으로 월등히 많았다는 점과, 분야 ①과 분야 ④의 논문들이 대기질 모델링 연구(분야 ②)와 통합적으로 접근한 논문들이 돋보였다. APJAS에 게재된 각 연구 분야별 내용과 특징을 아래에 요약하였다.

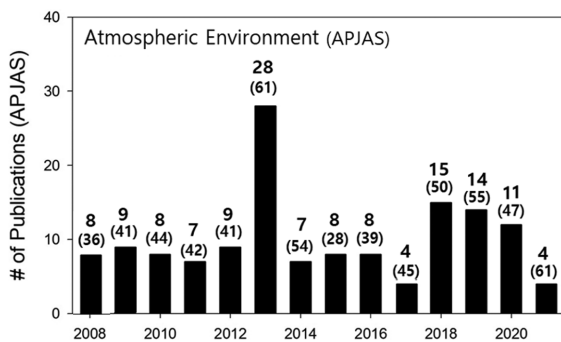


Fig. 2. Annual changes in number of manuscripts published in the environmental field and annual total manuscripts (in parentheses) published in Asian Pacific Journal of the Atmospheric Sciences during the period of 2008~2020.

분야 ①의 대기질 관측 및 분석 분야에서는 에어로졸 측정 분석 연구가 논문의 대부분을 차지하였고(Kim et al., 2012; Ali et al., 2013; Kim and Chun, 2013; Sugimoto et al., 2013; Lee, 2014; Park et al., 2014; Bae et al., 2019; Cha et al., 2019; Dahari et al., 2019; Li et al., 2020; Zhang et al., 2020b), 연구내용에서도 관련 자료의 기상 조건 해석 시 한반도 주변 국지기상 조건보다는 종관기상 분석이 대부분을 차지하였다(Spiridonov and Curic, 2009; Hong et al., 2009; Kim and Chung, 2010; Yoon et al., 2010; Shaeb et al., 2020; Liao et al., 2020). 이는 APJAS의 외국 논문 편수가 늘면서 연구 영역이 우리나라 국지규모보다는 동아시아로 연구대상 영역이 확대된 것에 기인한 것으로 분석되었다. 앞서 언급한 2016년 KORUS-AQ 캠페인 연구결과 또한 APJAS에서도 중요한 관측 및 분석 연구 주제로서 다수의 논문이 출판되었다(Bae et al., 2019; Cha et al., 2019; Lim et al., 2019).

황사 및 대기질 모델링 연구분야(분야 ②)에서는 2013년 황사 특별 세션에서의 많은 논문 편수가 돋보였다. 특별세션 내용은 주로 황사모델의 예측률 향상에 대한 주제가 많았는데 현업모델의 예측률 개선 연구(Chun et al., 2013; Kim and Lee, 2013; Lee et al., 2013a, b; Park et al., 2013; Sugimoto et al., 2013), 발원지의 황사 배출 플럭스 모듈 개선 연구(Kang et al., 2013; Ku and Park, 2013; Mao et al., 2013), 위성 자료 활용한 현업 모델 검증 연구(Lee et al., 2013c; Ku and Park, 2013), 자료 동화 적용 연구(Lee et al., 2013b) 등이 논의되었다.

황사 모델 이외의 대기질 모델분야에서는 공용 대기질모델을 이용한 화학성분 모의성능 연구(Kim and Chun, 2013; Jung et al., 2018), 배경농도 모의 오차 분석(Zang et al., 2015), 한중일 3국을 포함한 동아시아 국가 모델링 비교연구(Kim et al., 2011) 등이 출판되었고, 그 외 전지구 규모 기후변화 관련 대기질 모델링 연구(Park and Kim, 2014a; Wang and Kau, 2015; Jeong et al., 2016; So et al., 2018) 등이 있었다.

대기경계층 및 난류 연구분야(분야 ③)에서는 캐노피를 포함한 다양한 지표 조건에서의 난류 플럭스 분석 연구와 이를 이용한 경계층 발달 해석이 국내외 연구자들에 의해 꾸준히 출판되었다(Hong et al., 2009; Lee, 2009a; Lee and Kim, 2010; Lee and Bail, 2011; Yin et al., 2018; Liu et al., 2021). 그 외에도 특히 열섬(heat island)을 다루는 연구가 국내외를 막론하고 상당하였음을 확인하였고(Shin et al., 2004; Ganbat et al., 2013; Meng, 2017; Barat et al., 2018; Karaku, 2019; Zhang et al., 2020a), 이를 통해 도시화에 따른 관심과 연구가 점점 활발해지는 것을 확인할 수 있었다. 위성 및 지상 원격탐사 연구(분야 ④)의 출판 편

수는 2017년 이후 급증하는 경향을 보였고, 내용면에서는 동북아시아 AOD 특징과 국내 지상 $PM_{2.5}$ 농도와 연관시켜 분석하는 연구가 많았다(Tariq et al., 2016; Feng et al., 2019; Park et al., 2020; Ranjan et al., 2021; Shin et al., 2021). 또한 2020년 발사된 환경위성 GEMS 활용에 관한 연구로는 2010년경부터 GEMS의 산출물 자료처리 알고리즘 연구가 시작되어 현재까지 출판되고 있음을 확인하였다(Choi et al., 2020; Shin et al., 2021).

상세 바람장 구현 연구(분야 ⑤)에서는 상세 규모와 중규모 모델 접합연구(Kadaverugu et al., 2019), 모델 격자의 다운스케일링 연구(Alizadeh et al., 2019), 지표 특성에 따른 상세 바람장 특성 연구(Kwun and You, 2009; Lee, 2012; Prasanna et al., 2018) 등으로 대기경계층 및 난류 연구(분야 ③)와 일부 연관되는 논문이 주로 출판되었다. 그 외에도 국내 에어로졸의 변동성을 동아시아 몬순, 엘니뇨 등 기후변화와의 연관성 연구 논문이 2010년 이후 활성화되기 시작하였으며(Yoon et al., 2010; Mahendranth and Bharathi, 2012; Yun et al., 2014), 연구 방식 또한 관측 및 분

석 연구(분야 ①)는 모델링 연구(분야 ②) 혹은 원격 탐사 연구(분야 ④)와 통합적으로 접근하는 방식이다. 수의 논문에서 확인하였다(e.g., Ku and Park, 2013; Sugimoto et al., 2013; Tariq et al., 2016).

3.3 대기환경 분야의 현재 연구 쟁점들

60여년간 학회 논문을 통해 나타났던 대기환경 분야 연구 쟁점들은 시대에 따라 이슈가 상이함을 확연히 알 수 있다. 1990년 이전에는 대기환경 이론의 적용 방법과 그 결과의 장단점 해석에 주력하였고, 1990년대에는 관측적 연구가 늘어나면서 기상학적인 이론과 입력자료를 이용하여 모델을 통해 대기의 대기오염 농도를 재현하기 시작하였다. 2000년에는 공용모델의 저변 확대와 함께 황사 현업 예보 개선을 위한 연구가 주요 쟁점으로 부각되었고, 2010년 이후에는 관측기반의 대규모 캠페인 등을 통해 다양한 대기오염물질의 실측자료들이 연구에 활용되면서 위성 산출 알고리즘 연구, 미세먼지 현업 모델 적용 연구 등이 탄력을 받았다. 이러한 격변기를 지나면서 환경분야에서 이슈화되었던 몇 가지 쟁점을 아래에 기술하였다.

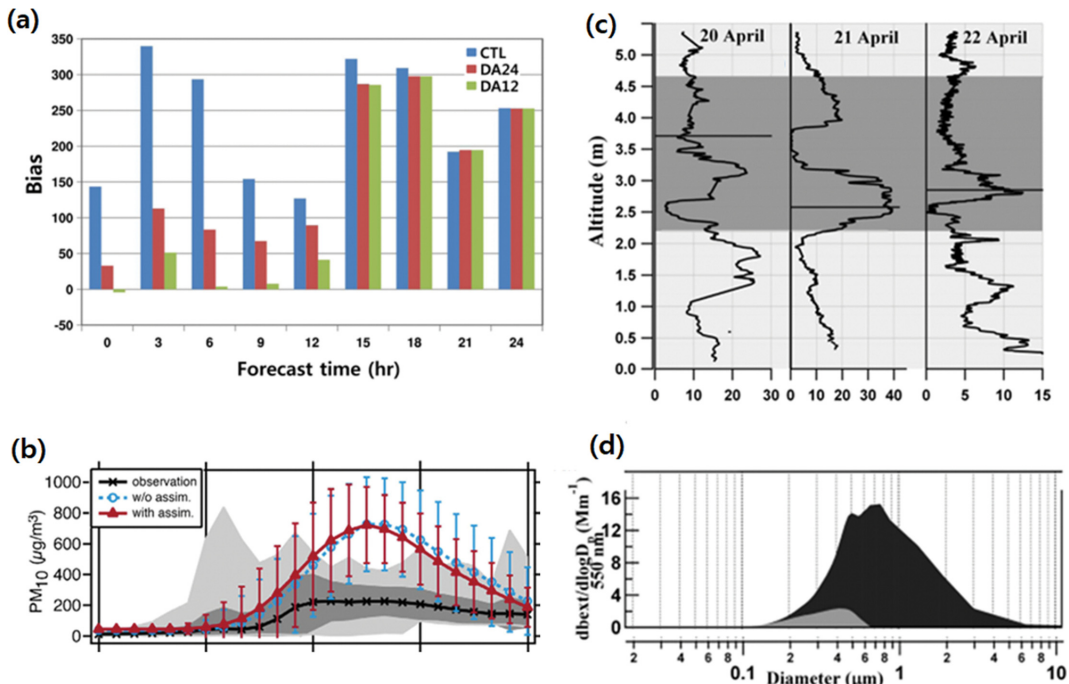


Fig. 3. (a) PM_{10} prediction capabilities as a function of forecasting time by applying the data assimilation technique over south Korea to the operational Asian dust forecasting model (ADAM2) (from Lee et al., 2013b), and (b) data assimilation results (from Yumimoto et al., 2016). Also shown are (c) Vertical profiles of scattering coefficients, and (d) aerosol scattering coefficients as a function of size distribution observed in California Monterey area during Asian Dust Above Monterey (ADAM-2003) campaign (from Lee, 2009b).

2000년대의 황사 예보율 확보 연구는 자료동화기술과 연관되었다. Figure 3은 당시 황사 현업 예보율을 연구한 논문(Lee et al., 2013b)에 수록된 결과로서, 현업 모델인 Asian Dust Aerosol Model II (ADAM2)에서 고비사막 등 발원지에서 관측한 황사 자료를 6, 12, 48시간 간격으로 각각 자료동화(data assimilation) 기법을 적용하였을 경우, 현업 모델에서 확인되는 예측을 개선 효과는 12시간을 넘지 못하고 대부분 9시간 이내에 불과하였다. 이 결과는 24-48시간 황사 예보율의 개선을 목표로 한 관측자료 활용의 한계를 보여주었으며, 당시 자료동화 기반 예보 연구 기술 개발의 필요성을 역설적으로 지적해 주었다(Fig. 3a). 외국의 경우 역시 유사한 결과가 있었는데, 일본의 황사 모델인 MASINGAR2 (Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere Re Mark 2)의 결과(Fig. 3b)에서도 백령도 지점의 낮은 황사 관측농도는 자료동화 기술을 적용하였음에도 불구하고 예측율이 크게 개선되지 않았다(Yumimoto et al., 2016). 이 쟁점은

황사뿐 아니라 이후 시작된 미세먼지 예보율 개선 연구분야에서도 중요한 이슈로 부각되었으며, 최근의 GEMS 산출물이 공개됨에 따라 미세먼지 예보 모델을 이용한 자료동화 영향분석 연구는 당분간 계속될 것으로 보인다.

환경분야의 또 하나의 쟁점은 동북아시아 대기오염 물질의 국내의 기여도 분석연구에 있었다. 특히 우리나라 대기오염 고농도 사례 시 그 기여도가 국내 배출량이나 혹은 중국과 같은 외부요인이나의 쟁점은 최근까지도 주요 이슈로 남아 있다. Figures 3c, d는 미국 캘리포니아 Monterey 해안가에서 시행된 Asian Dust Above Monterey (ADAM-2003) 캠페인 기간에 네펠로미터로 관측한 550 nm 파장의 산란계수(scattering coefficient)의 연직분포와 입자 크기별 감쇄상수(extinction coefficient) 분포이다(Lee, 2009b). 관측 당시 NOAA HYSPLIT 역제적 모델로부터 추정된 미국 동부 해안가 상층 대기오염물질의 발원지는 아시아 지역으로 규정하였고, 그 판단 근거는 관측된 광학 특

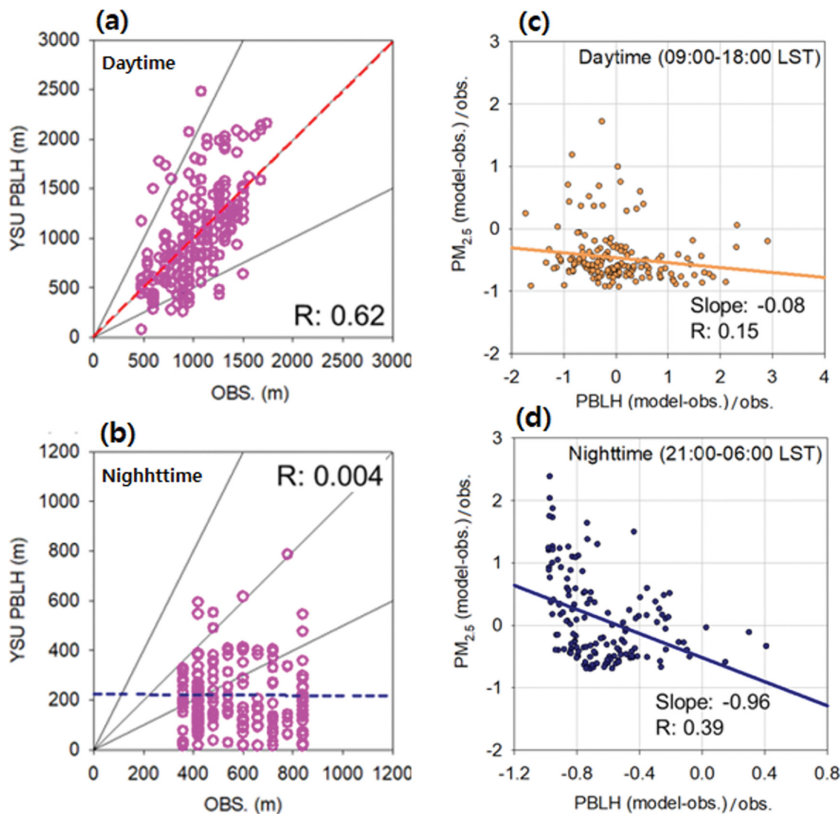


Fig. 4. Scatter diagrams of simulations versus observations of planetary boundary layer (PBL) heights for (a) daytime (09:00-18:00 LST) and (b) nighttime (21:00-6:00 LST) during the KORUS-AQ campaign. Simulations are from WRF model with YSU-PBL scheme. Normalized Mean Biases (NMB = (Simulation - Observation)/Observation) of PBL height versus $PM_{2.5}$ are also shown for (c) daytime and (d) nighttime, respectively. From Lee et al. (2023).

징이 아시아 관측 결과와 동일하다는 특징에서 찾았다. 이러한 대기오염물질의 장거리 이동 연구는 2010년대 이후 에어로졸 연직 분포 연구에 기반한 대기경계층 고도의 중요성에 대한 재고찰로 이어졌으며(Lee et al., 2019; Park et al., 2021a), 최근 KORUS-AQ 캠페인과 같은 대규모 캠페인에서도 관측 및 모델링 연구분야에서 모두 중요한 쟁점으로 남아 있다.

대기질 예보를 확보를 위한 대기경계층 연구 분야의 최근 쟁점은 중규모 기상모델에서 야간 대기경계층 고도의 과소모의와 연관되어 있다. 한 예로 Figs. 4a, b는 2016년 KORUS-AQ 캠페인 기간에 운고계로 관측한 대기경계층 고도와 WRF-Chem으로 모의된 대기경계층 고도 차이를, 그리고 Figs. 4c, d는 대기경계층 고도 오차에 대한 미세먼지농도 예측오차의 민감도를 주-야간으로 나누어 나타낸 그림이다(Lee et al., 2023). 그림에서 알 수 있듯이, 주간 대기경계층 고도 예측결과는 관측 대비 상관성이 $R=0.6$ 이상의 성능을 보이는 반면, 야간에는 0.2 이하의 낮은 예측률을 보였다. 또한 미세먼지 예측농도 민감도는 대기경계층 고도와 연관되는데, 주간에는 $R=-0.15$ 와 기울기 -0.08 을, 야간에는 $R=-0.39$ 와 기울기 -0.96 을 보였는데, 이는 야간에 미세먼지 농도가 대기경계층 고도 예보에 매우 민감하게 반응한다는 사실을 의미한다. 따라서 야간의 대기경계층 고도의 오보는 곧바로 미세먼지의 피크 농도 오바로 연결된다는 것을 의미하므로, 최근 윈드 도플러 라이더 및 운고계(ceilometer) 관측 자료 등으로부터 야간 대기경계층 고도의 예측률을 개선하기 위한 관측 및 모델 연구가 진행되고 있으며, 향후에도 계속될 것으로 전망된다.

그 외에도 대기질 예보에 있어서 중요한 요소중의 하나인 지상 풍속이 중규모 기상 모델에 의해 자주 과대 예측됨에 따라 미세먼지 등 대기질이 과소 예측되는 경향도 중요한 쟁점이었다. 이 이슈는 2010년대에 들어 윈드 도플러 라이더를 이용한 대기경계층을 포함하는 대류권 하부의 연직 바람 분포 특성(3차원 풍속, 풍향) 관측 연구가 활발히 진행되었으며(Park and Choi, 2016; Kim et al., 2022), 향후에도 기상 모델에서 자주 과대 모의되는 지표 부근의 풍속 모의 결과의 검증 및 개선 연구가 진행될 것으로 전망된다.

3.4 최근 연구 동향과 미래 연구 전망

① **대기질 관측 및 분석 연구** - 2016년 진행된 한·미 대기질 관측 국제공동 캠페인인 KORUS-AQ 캠페인을 통해 국내 대기오염물질의 배출 특성 및 국외 수송 기여분에 대한 입체적인 관측이 수행되었고, 그 후속으로 대규모 추가적인 캠페인 연구가 향후에도 계속될 것으로 예정되어 있다. 그 준비 단계로서 이미 수도권 중심으로 2020~2021년 Geostationary Environment

Monitoring Spectrometer Map of Air Pollution (GMAP) 캠페인과 2022년 Satellite Integrated Joint Monitoring of Air Quality (SIJAQ) 캠페인이 수행된 바 있다. GMAP 캠페인 기간 지상원격관측 장비인 Max-DOAS를 설치하여 GEMS 환경 위성 검증에 필요한 기체상 오염물질(NO_2 , O_3 , HCHO)의 농도를 관측하였으며, 2021년에는 신규 관측장비인 Car-DOAS를 이용하여 수도권 대기오염물질 배출량과 미량기체의 공간 비균질성에 대한 관측을 진행하였다(Chang et al., 2022).

KORUS-AQ 캠페인 이외에도 국내로 유입되는 장거리 이동 대기오염물질과 황사에 의한 영향 분석 및 서해상 관측 공백을 해소하기 위하여 최근 기상청·국립기상과학원은 2018년부터 국내 다수 연구기관 및 대학과 협력하여 ‘지상-선박-위성-항공기’ 동시 관측을 수행하는 서해상 대기질 입체관측 캠페인(Yellow Sea-Air Quality; YES-AQ)을 매년 수행하였다(Yoo et al., 2021; Shin et al., 2022). 이 캠페인을 통해 서해상 에어로졸의 물리적, 화학적, 광학적 특성과 서해상 공간분포를 분석하여 고농도 사례들의 원인분석을 수행하여 왔다. 이러한 자료들을 통해 상세 비교와 대기질 모델의 검증 자료로 활용하거나 국내로 유입되는 에어로졸의 특성을 이해할 수 있으며, 나아가 우리나라 미세먼지 예보 향상에 크게 기여할 것으로 기대하고 있다.

② **황사 및 대기질 모델링 연구** - 황사의 현업모델 연구는 최근 고농도 황사 사례가 감소하면서 현업모델의 원형을 개선하는 연구는 많지 않을 것으로 예상된다. 다만 위성 자료 등을 통해 황사 발원지 지표 특성 변화를 반영하여 모델의 예측 성능을 개선하는 연구는 당분간 계속될 것으로 보인다. 반면 황사를 제외한 대기질 모델링 분야는 계속 확대될 것으로 보인다. 현재까지 국내 대기질 모델링 연구의 큰 제약 중 하나는 한반도나 동아시아의 관측자료가 선진국에 비해 상대적으로 빈약한 점이었다. 따라서 대기질 연구에 사용되는 모델 검증이 부족하였고 모델 결과의 신뢰도가 크지 않았다. 그러나 KORUS-AQ 캠페인을 통해 양질의 관측자료가 생산됨에 따라, 국내 모델링 연구에서도 한단계 업그레이드된 것으로 평가된다(Park et al., 2021b). 그 예로 KORUS-AQ 캠페인 기간 대기질 모의에 중요한 배출량 자료의 불확실성을 줄이기 위하여, 원격탐사 자료를 이용한 top-down 배출량 자료 개선되었다(Kwon et al., 2021). 향후에도 이러한 과정을 통해 한반도와 동아시아 대기질 연구가 상당히 개선될 것으로 기대된다. 또한 KORUS-AQ 캠페인을 통해 한반도 주변 입상 오염물질의 화학성분 모델링 연구의 취약성이 다수 발견되었는데, 특히 유기에어로졸의 과소 모의(Oak et al., 2022)와 질산염 에어로졸의 과대 모의 이슈는 앞으로 해결되어야 할

문제로 보인다.

전지구 규모의 대기화학수송 모델을 이용한 대기질 연구는 기후 문제 등 여러 요인으로 인하여 활발해질 전망이다. 과거 국내 대기질 연구는 상대적으로 많은 전산자원이 소요되는 전지구규모 모델 사용이 쉽지 않았으나, 2000년 초 시베리아 산불이 한반도에 장거리 수송되어 미세먼지 혹은 오존 농도에 미친 영향 연구 등 전지구 모델 활용이 점차 활성화되는 추세이며(Jeong et al., 2008; Park et al., 2009), 전산자원의 고도화에 힘입어 모델 격자의 상세화 연구를 통해 전지구 모델 활용이 확대될 전망이다.

최근 기후변화에 대한 사회적 관심이 높아지고 있으며, 온실기체 배출량이 가장 많은 동아시아 지역에서는 최근 대기질 개선을 위한 대기오염물질 감소 정책을 강하게 추진하고 있다. 또한 미세먼지, 대류권 오존, 메탄 등은 대기오염물질이면서 동시에 기후변화에 직간접적으로 영향을 끼치는 단기체류 기후변화 유발물질(Short Lived Climate Pollutants; SLCP)로서 그 감소 정책이 주목을 받고 있다. 특히 대기 중 잔존기간(life time)이 짧음으로 인해 장기 체류하는 온실기체보다 지역 기후에 미치는 영향이 상당하므로, 향후 SLCP가 지역기후에 미치는 영향연구가 점차 확산될 전망이다. 이에 따라 기후모델에 대기화학 과정을 포함하는 Chemistry-Climate model 연구가 확대될 전망이며 국내에서도 GEOS-Chem과 GRIMs 전지구 모델을 coupling 하여 개발한 모델을 활용한 기후변화-대기화학 피드백 과정과 동아시아 SLCP와 지역기후변화와의 연관성에 대한 연구들이 활발하게 수행될 것으로 보이며 그 활용성 또한 매우 기대된다(Jeong et al., 2019; Lee et al., 2022; Koo et al., 2022).

③ 대기경계층 및 난류 연구 - 대기 경계층 및 난류 연구는 2010년대 중반부터 도시관측망의 지상원격탐사관측과 보성표준관측소의 307 m 높이의 종합기상 관측탑으로부터 대기경계층 연직구조에 관한 자료들이 산출됨에 따라 이를 활용한 대기경계층 분석 연구가 활발히 진행될 전망이다. 보성 종합기상탑에서는 11 고도(10, 20, 40, 60, 80, 100, 140, 180, 220, 260, 300 m)에서 풍속, 기온, 습도 관측이 이루어지고 4 고도(지면, 60, 140, 300 m)에서 플럭스가 관측되면서 대기 경계층의 연직 구조에 대한 기상관측자료가 연속적으로 생산되고 있다. 현재 종합 기상탑에서 생산된 자료는 복잡한 지형에서의 대기 경계층 구조에 관한 연구(Lee, 2021), 드론이나 지상 원격 탐사장비 관측결과 비교분석, 혹은 모델의 검증(Kim et al., 2019b; Lim and Lee, 2019) 등에 활발히 활용되고 있다.

최근 드론이나 도심 공중 교통체계 등이 미래형 이동 수단으로 떠오르면서 이들이 운행되는 대기 경계층에 대한 바람 및 난류 정보에 대한 요구가 증가하

고 있다(Kim et al., 2021). 따라서 기존에 설치되었던 도심 관측망에 더하여 향후 대기 경계층에 대한 3차원 관측망이 더욱 확충될 전망이며 이를 활용한 연구들이 활발히 진행될 것으로 전망된다. 또한 컴퓨터 계산 속도가 빨라짐에 따라 대기경계층의 난류를 분해할 수 있는 고해상도모델링 연구가 활발해지면서 이를 이용한 다양한 대기 경계층 응용분야 연구도 이어질 것으로 전망된다.

④ 위성 및 원격탐사 연구 - 위성 연구에서는 최근 발사된 GEMS를 활용한 분석적 연구가 계속될 전망이다. GEMS 산출물의 자료처리 알고리즘은 2010년부터 개발이 시작되어 2021년 대기질 정보 14종(에어로졸, 이산화질소, 이산화황, 오존 등)의 자료가 공개되었으며, 2022년에는 7종(포름알데히드, 각 가스상 물질의 대류권 농도 등)이 추가 공개되면서 실시간 대기질 감시에 활용이 가능해졌다. 또한 2016년 KORUS-AQ 캠페인 자료는 GEMS 시범 자료의 정확도를 검증하기 위해 사용되었으며, 그 후속으로 2020년부터 국내 연구진과 미국, 벨기에, 독일 연구진들과 공동으로 수행한 한반도 대기질 국제공동조사 캠페인인 2020~2021년 GMAP, 2022년 SIJAQ 캠페인을 통해 항공관측 자료, 지상 화학성분 자료, 원격탐사 자료 등의 입체적 관측자료가 분석될 전망이다.

지상 원격관측분야는 앞 절에서 언급한 야간 대기 경계층 문제점, 즉 현업 미세먼지 예보에서 얇은 야간 경계층에 의한 미세먼지 고농도 오보사례가 자주 발생하는 문제를 해결하기 위하여 현재 라이다·운고계에서 산출되는 대기경계층 높이와 대기질 모델의 지표 오염물질 모의 농도와와의 정량적 관계를 도출하여 이를 개선하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Lee et al., 2020; Jo et al., 2022; Park et al., 2022b). 향후 한반도 에어로졸 라이다 관측 네트워크(Korea Aerosol Lidar Observation Network; <http://www.kalion.kr/>)의 (준)실시간 대기경계층 높이 자료를 활용한 기상모델에서의 자료 동화 및 검증을 통해 대기질 모델에서의 지표 농도 모의 정확도 향상 연구가 지속적으로 진행될 것으로 기대된다.

⑤ 상세 바람장 구현 연구 및 기타 - 도시화에 따라 이 분야의 연구 또한 활성화될 전망이다. 중규모 수치 모델을 이용한 도시 상세 기상장 연구는 국외에서는 2010년부터 시작된 도시모수화 모형 비교연구 프로젝트를 통해 지속적인 연구 개발이 이루어지고 있었으며(Grimmond et al., 2010, 2011), 도시모수화 모형 연구는 개발과 검증 단계를 지나, 주요 선진국에서는 현업 활용을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또 3차원 중규모 기상 모형과의 결합을 통해 수 km 이내의 제한적인 영역에 적용이 가능하게 되었으며, 미규모 수치 모형이 적용되기 어려운 수십

km 이상의 넓은 도시 영역 전체를 커버하는 영역에 적용할 수 있어서 향후에도 그 활용 연구는 활발할 것으로 보인다. 최근에는 1 km 이하 격자 규모의 고해상도 기상장 산출을 통해 도시 열섬 등 다양한 연구 분야에 활용되기 시작하였고(Lee et al., 2016), 이는 대기질 모델의 입력자료로서 그 활용성도 조명될 전망이다.

미규모 수치 모델 연구는 CFD 모델과 같이 유체 흐름이나 오염물질 분산 연구를 도시 스케일인 수 m 범위의 해상도까지 구현하고, 그 결과를 지리 정보 시스템(Geographic Information System: GIS)에 탑재하여 실제 도시 지역의 복잡한 지표 형태를 표현하고 있다. 특히 컴퓨터 성능의 비약적인 향상으로 인해 도심지에 미규모 수치 모형을 이용한 수~수십 m 격자 해상도의 바람 및 난류 모델링 연구가 계속 수행되고 있다(Kwak et al., 2015; Park et al., 2015). 최근에는 도심지의 현실적인 기상 정보 산출을 위해서는 건물 형태 특성을 반영해야 할 뿐만 아니라 시간에 따른 건물 표면온도와 측면 경계 조건의 변화의 현실적 적용이 필요하며, 이를 위한 최신 연구들도 진행되고 있다(Lee et al., 2018; Lee and Lee, 2020; Kim et al., 2020).

상세 기상장 산정 관련 연구는 향후에도 기상과 대기질 분야의 다양한 문제를 해결하기 위한 주요한 도구로 활용 범위가 확대될 것으로 기대된다. 중규모 기상 모형에서 종종 나타나는 지상 부근 풍속의 과대모의 경향은 지표 부근 장애물이나 아격자 규모 지형에 의한 지표 항력의 현실적인 매개변수화(parameterization)의 필요성을 암시하며, 이는 지표 장애물에 대한 명시적 지표 항력의 계산이 가능한 미규모 기상 모형을 활용함으로써 개선할 수 있을 것이다. 최근 미규모 기상 모형을 이용한 도시 건물이나 지표 지형에 의한 명시적 항력 모의 결과를 중규모 기상 모형 내에 적용하고자 하는 연구들이 이루어지고 있으며, 이를 통해 중규모 기상 모형의 지상 풍속 예측 성능 향상이 가능할 것으로 기대하고 있다.

마지막으로 1~5 분야를 종합하면, 향후 환경분야에서는 점점 대기질 관측 장비가 개발되면서 종합적인 최신 장비에 의한 입체적 분석 연구가 활발할 것으로 기대된다. 특히 위성, 항공기, 지상 원격탐사 등의 다양한 관측기기를 이용한 입체적 관측 연구가 동시에 일어날 전망이다. 아울러 대기질 예측모델링 연구에서는 항공기의 경로 등을 예측하거나 입체 관측 자료를 기반으로 모델 정확도 개선 등의 연구가 동시에 이루어질 전망이다(Fig. 5). 관측 기기의 고도화 또한 활발히 진행되고 있는데, 한 예로 현재 스카이라디오미터를 활용한 대기 기주(column)의 에어로졸 광학적·물리적 특성 연구는 KORUS-AQ 캠페인을 기점으로

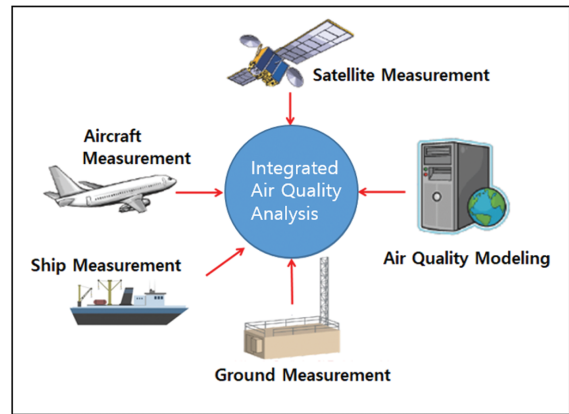


Fig. 5. Integrated air quality study expected in the future in the atmospheric environment field.

초분광계(hyperspectrometer)를 활용한 지상 관측 센서, 예를 들어 Pandora, Max-DOAS, Car-DOAS 및 항공에 GEO-CAPE Airborne Simulator (GCAS) 또는 Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization Spectrometer (GeoTASO) 센서를 탑재하여 대기 기주의 가스상 오염물질 농도를 입체적으로 측정하여 산출하는 연구가 현재에도 진행 중이며(Chong et al., 2018; Park et al., 2019; Choi et al., 2020; Park et al., 2022a), 이러한 입체관측-모델링의 통합적인 연구는 향후에도 지속될 것으로 전망된다. 이상의 입체 관측으로 확보된 자료들은 주요 대기오염 배출원(핫스팟)의 배출 특성뿐만 아니라 기존의 극궤도 환경위성에서 제공하지 못하던 다양한 대기환경에서의 일변화 정보를 제공하고 있으며, GEMS 등 환경 위성 산출물의 검증에도 활용되고 있으며(Baek et al., 2017; Kim et al., 2017; Park et al., 2020; Chang et al., 2022), 향후 주요 대기오염 배출원 지역의 상세 시·공간 농도 특성 변화뿐만 아니라 대기질 모델의 모의 결과와 GEMS 위성 산출물의 검증 및 개선에 크게 활용될 것으로 전망하며, 이러한 자료를 기반으로 자료처리 알고리즘 고도화, 산출자료 정확도 개선, 실시간 예보 모델 정확도 점검 등의 연구의 진전이 비약적으로 이루어질 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기환경 분야를 편의상 대기질 관측, 대기오염 모델링, 대기경계층 및 난류, 원격탐사, 상세 기상장 구현 연구 등 몇 가지 연구분야별로 나누어, 분야별 지난 60년간 기상학회지, 대기지, APJAS에 게재된 논문을 분류 및 검토하여 시대별로 어떤

논문 내용이 다루어졌는지를 살펴보고, 나아가 분야별 현황과 전망을 기술하였다. 그 결과 기상학회지(혹은 대기지)에서 출판되는 환경분야 연구 결과들은 시대에 따라 큰 변화를 거쳐 왔으며, 향후에도 최첨단 대기환경 관측장비의 발달로 매우 빠른 속도로 한반도 혹은 동아시아 대기질 연구가 관측 및 모델링 측면에서 가속될 전망이다. 현재 연구 중인 정지 환경위성인 GEMS의 결과물이 조만간 크게 활용될 전망이며, 이로 인해 지상 원격 탐사 연구와 대기질 모델링 연구 역시 시너지 효과를 낼 것으로 전망된다. 급격히 변화하는 대기환경분야의 최근 및 향후 흐름에 발맞추어 나아가는 기상학회 회원들의 대기환경분야 성공적인 연구를 기대해 본다.

감사의 글

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Ali, M., S. Tariq, K. Mahmood, A. Daud, A. Batool, and U.-H. Zia, 2014: A study of aerosol properties over Lahore (Pakistan) by using AERONET data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 153-162, doi: 10.1007/s13143-014-0004-y.
- Alizadeh, M. J., M. R. Kavianpour, B. Kamranzad, and A. Etemad-Shahidi, 2019: A Weibull distribution-based technique for downscaling of climatic wind field. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 685-700, doi: 10.1007/s13143-019-00106-z.
- An, H.-Y., Y.-K. Kim, and J.-H. Jeong, 2017: Impacts of land cover change of tidal flats on local meteorological in Gyeonggi Bay, West Sea of Korea. *Atmosphere*, **27**, 399-409, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.4.399.
- Bae, M.-S., and Coauthors, 2019: Chemical characteristics of size-resolved aerosols in coastal areas during KORUS-AQ campaign; Comparison of ion neutralization model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 387-399, doi: 10.1007/s13143-018-00099-1.
- Baek, K., J. H. Kim, J. R. Herman, D. P. Haffner, and J. Kim, 2017: Validation of Brewer and Pandora measurements using OMI total ozone. *Atmos. Environ.*, **160**, 165-175, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.034.
- Barat, A., S. Kumar, P. Kumar, and P. P. Sarthi, 2018: Characteristics of Surface Urban Heat Island (SUHI) over the Gangetic Plain of Bihar, India. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 205-214, doi: 10.1007/s13143-018-0004-4.
- Cha, J. W., B. C. Choi, J.-C. Choi, and S. B. Chung, 2005: Characteristics on the two automatic PM₁₀ analyzers of the different measuring method and analysis of the comparing observation data of the analyzers. *J. Korean Met. Soc.*, **41**, 139-148.
- _____, B. Shin, H.-J. Ko, Y. K. Lim, and S.-B. Ryoo, 2020: Water-soluble ionic characteristics of aerosols in the marine boundary layer over the Yellow sea during the KORUS-AQ campaign. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 467-483, doi: 10.1007/s13143-019-00151-8.
- _____, H.-J. Ko, B. Shin, H.-J. Lee, J. E. Kim, B. Ahn, and S.-B. Ryoo, 2016: Characteristics of aerosol mass concentration and chemical composition of the Yellow and South sea around the Korean peninsula using a Gisang 1 research vessel. *Atmosphere*, **26**, 357-372, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.3.357.
- Chang, L.-S., and Coauthors, 2022: Evaluation of correlated Pandora column NO₂ and in situ surface NO₂ measurements during GMAP campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 10703-10720, doi: 10.5194/acp-22-10703-2022.
- Cho, C., Y. Chun, B. Ku, S.-U. Park, S.-S. Lee, and Y.-A. Chung, 2007: Comparison of ADAM's (Asian Dust Aerosol Model) results with observed PM₁₀ data. *Atmosphere*, **17**, 87-99.
- Cho, H. K., 1980: On the size distribution of atmospheric aerosol particles from spectral photometric measurements in Seoul. *J. Korean Met. Soc.*, **16**, 1-9.
- _____, S. M. Lee, and C. Y. Choi, 1989: The seasonal variations of total amounts of ozone at Seoul. *Asia-Pac. J. Korean Met. Soc.*, **25**, 21-29.
- _____, S.-M. Lee, and H.-K. Cho, 1984: The characteristics of the aerosol optical depth in the visible region. *J. Korean Met. Soc.*, **20**, 45-52.
- Choi, H., 2003: Influence of atmospheric circulation and boundary layer on suspended particulate dispersion in the Mountain-Girt metropolitan area. *J. Korean Met. Soc.*, **39**, 301-320.
- Choi, H.-W., D.-Y. Kim, J.-J. Kim, K.-Y. Kim, and J.-H. Woo, 2012: Study on dispersion characteristics for fire scenarios in an urban area using a CFD-WRF coupled model. *Atmosphere*, **22**, 47-55, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.1.047.
- Choi, J.-C., H.-M. Cho, Y., Chun, and K.-J. Park, 1999: A study on metallic elements of aerosol in Seoul during the spring of 1998. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 263-271.
- _____, J.-W. Cha, J.-Y. Bang, and Y.-H. Youn, 2002: A study on physical and chemical characteristics of yel-

- low sand at Anmyeon-do, Chungnam. *J. Korean Met. Soc.*, **38**, 105-117.
- _____, M.-Y. Lee, S. Kim, and S.-K. Kim, 1997: A study on chemical compositions of precipitation from 1991 to 1995 at Mt. Sobaek area. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 477-486.
- _____, S.-N. Oh, and K.-J. Park, 2000: A study on ion components and metallic elements in aerosol during the spring, 1998 at Seoul. *J. Korean Met. Soc.*, **36**, 552-560.
- Choi, S., L. N. Lamsal, and Coauthors, 2020: Assessment of NO₂ observations during DISCOVER-AQ and KORUS-AQ field campaigns. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 2523-2546, doi: 10.5194/amt-13-2523-2020.
- Choi, Y., Y. S. Ghim, and B.-J. Sohn, 2011: Comparison of aerosol optical properties from different models of skyradiometer. *Atmosphere*, **21**, 311-317, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.3.311.
- Chong, H., and Coauthors, 2018: Regional characteristics of NO₂ column densities from Pandora observations during the MAPS-Seoul campaign. *Aerosol Air Qual. Res.*, **18**, 2207-2219, doi: 10.4209/aaqr.2017.09.0341.
- Chun, Y., K. S. Cho, Y. H. Kim, and J. K. Lee, 2003a: The features of Asian dust events originated in Keoeolchin sandy land. *J. Korean Met. Soc.*, **39**, 251-263.
- _____, J.-Y. Lim, and B.-C. Choi, 2003b: The features of aerosol in Seoul by Asian dust and haze during springtime from 1998 to 2002. *J. Korean Met. Soc.*, **39**, 459-474.
- _____, Y. Shao, and M. Nishikawa, 2013: Dust and Sand Storms (DSS) in East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 1-2, doi: 10.1007/s13143-013-0001-6.
- Chung, K.-Y., and S.-U. Park, 1997a: Numerical simulations of yellow sand events observed in Korea: I. An aerosol modeling and preliminary results. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 179-199.
- _____, and _____, 1997b: Numerical simulations of yellow sand events observed in Korea: I. Characteristic features of uplift and transport of yellow sand. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 201-217.
- Chung, Y.-S., and M.-B. Yoon, 1996: On the yellow sand and a dust storm occurred in the spring of 1995. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 17-27.
- _____, H.-S. Kim, K.-H. Park, J. Dulam, and T. Gao, 2004: Dust-storm observations in China, Mongolia and Korea from March to May 2003. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 241-257.
- Dahari, N., K. Muda, M. T. Latif, and N. Hussein, 2019: Studies of atmospheric PM_{2.5} and its inorganic water soluble ions and trace elements around Southeast Asia: A review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 361-385, doi: 10.1007/s13143-019-00132-x.
- Feng, R., K. Luo, and J.-R. Fan, 2019: Decoding tropospheric ozone in Hangzhou, China: from precursors to sources. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 321-331, doi: 10.1007/s13143-013-0047-5.
- Ganbat, G., J.-Y. Han, Y.-H. Ryu, and J.-J. Baik, 2013: Characteristics of the urban heat island in a high-altitude metropolitan city, Ulaanbaatar, Mongolia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 535-541, doi: 10.1007/s13143-013-0047-5.
- Goo, T.-Y., G.-M. Hong, S.-B. Kim, J.-U. Gong, and M.-S. Kim, 2008: A case study of aerosol features of Asian dust, fog, clear sky, and cloud at Anmyeon island in April 2006. *Atmosphere*, **18**, 97-100.
- Grimmond, C. S. B., and Coauthors, 2010: The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **49**, 1268-1292, doi: 10.1175/2010JAMC2354.1.
- _____, and Coauthors, 2011: Initial results from phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *Int. J. Climatol.*, **31**, 244-272, doi:10.1002/joc.2227.
- Ha, K.-J., J.-B. Ahn, Y.-K. Hyun, and L. Mahrt, 2001: Influence of free atmospheric turbulence on the development of nocturnal stable boundary layer. *J. Korean Met. Soc.*, **37**, 53-64.
- Ham, J., M. Lee, S.-B. Ryoo, and Y.-G. Lee, 2019a: Distribution characteristics and background air classification of PM_{2.5} OC and EC in summer monsoon season at the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) regional station. *Atmosphere*, **29**, 429-438, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.429.
- _____, _____, _____, and _____, 2019b: Distribution characteristics and background air classification of PM_{2.5} OC and EC in summer monsoon season at the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) regional station. *Atmosphere*, **29**, 429-438, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.429.
- Han, J.-I., and S.-U. Park, 1992: A numerical study on nocturnal drainage flows using a simplified second-moment turbulent closure over the mountainous terrain. *J. Korean Met. Soc.*, **28**, 225-241.
- Hong, H., J. Kim, H. Lee, and H. K. Cho, 2013: Inter-comparison of total ozone from the ground-based and satellite measurements at Seoul. *Atmosphere*, **23**, 123-130, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.2.123.
- Hong, J., C. Cho, T.-Y. Lee, and M. Leclerc, 2009: Impact

- of large-scale advection on regional heat flux estimation over patchy agricultural land. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 221-231.
- Hong, J.-W., J. Hong, and J. Kim, 2019: Contingent valuation survey on changes in citizens' perception on atmospheric pollution in Seoul, Korea. *Atmosphere*, **29**, 213-218, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.2.213.
- Hong, S.-O., J.-Y. Byon, D.-H. Kim, S.-S. Lee, and Y.-H. Kim, 2021: Effects of land cover change on summer urban heat island intensity and heat index in Seoul Metropolitan area, Korea. *Atmosphere*, **31**, 143-156, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.2.143.
- _____, Y.-H. Lee, and Y.-J. Lim, 2014: Influence of surface heterogeneity on turbulent transfer in the surface layer. *Atmosphere*, **21**, 317-329, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.3.317.
- Hyun, J.-H., and D.-K. Lee, 1990: Simulation of sea-land breeze over Jeju island on a three-dimensional meso-scale model. *J. Korean Met. Soc.*, **26**, 121-136.
- Hyun, Y.-K., and K.-J. Ha, 2001: Influence of the non-local turbulence on the development of the boundary layer. *J. Korean Met. Soc.*, **37**, 579-588.
- _____, K.-E. Kim, and K.-J. Ha, 2003: Estimation of the depth of atmospheric stable boundary layer by thermal structure and analysis of wind characteristics. *J. Korean Met. Soc.*, **39**, 187-206.
- In, H.-J., and S.-U. Park, 2003a: The soil particle size dependent emission parameterization for an Asian dust (Yellow Sand) observed in Korea in April 2002. *Atmos. Environ.*, **37**, 4625-4636, doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.07.009.
- _____, and _____, 2003b: Estimation of dust emission amount for a dust storm event occurred in April 1998 in China. *Water Air Soil Pollut.*, **148**, 201-221.
- Jee, J.-B., C.-R. Cho, Y.-J. Kim, and S.-S. Park, 2022: Analysis of meteorological characteristics by fine dust classification on the Korean peninsula, 2015~2021. *Atmosphere*, **32**, 119-133, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.2.119.
- Jeon, E.-H., K.-J. Ha, and K.-E. Kim, 2004: Evaluation of similarity relationships using CASES-99 under the stable condition. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 119-134.
- Jeong, G.-R., B. M. Monge-Sanz, E.-H. Lee, and J. R. Ziemke, 2016: Simulation of stratospheric ozone in global forecast model using linear photochemistry parameterization. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 479-494, doi: 10.1007/s13143-016-0032-x.
- Jeong, J. I., R. K. Park, and D. Youn, 2008: Effects of Siberian forest fires on air quality in east Asia during may 2003 and its climate implication. *Atmos. Environ.*, **42**, 8910-8922, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.037.
- Jeong, Y.-C., S.-W. Yeh, S. Lee, and R. J. Park, 2019: A global/regional integrated model system-chemistry climate model: 1. Simulation characteristics. *Earth and Space Science*, **6**, 2016-2030, doi: 10.1029/2019EA000727.
- Jhun, J.-G., 1991: On the characteristics of atmospheric circulations over East Asia associated with the transport of air pollutants. *J. Korean Met. Soc.*, **27**, 180-196.
- _____, and E.-J. Lee, 1995: Analysis of meteorological elements in the atmospheric boundary layer over Kyunggi area. *J. Korean Met. Soc.*, **31**, 453-476.
- _____, S.-W. Yeh, M.-H. Kwon, and Y.-S. Chung, 1999: Classification of atmospheric circulation patterns associated with long-range transport of yellow sands. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 575-586.
- Jo, H.-Y., and C.-H. Kim, 2010: Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena. *Atmosphere*, **20**, 161-172.
- _____, and Coauthors, 2022: A case study of heavy PM_{2.5} secondary formation by N₂O₅ nocturnal chemistry in Seoul, Korea in January 2018: Model performance and error analysis. *Atmos. Res.*, **266**, 105951, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105951.
- Jung, C. H., J. Y. Lee, J. Um, S. S. Lee, and Y. P. Kim, 2018: Chemical composition based aerosol optical properties according to size distribution and mixture types during smog and Asian Dust events in Seoul, Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 19-32, doi: 10.1007/s13143-017-0053-0.
- Jung, Y.-S., S.-U. Park, and I.-H. Yoon, 1996: Characteristic features of local air quality associated with meteorological conditions. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 271-290.
- Kadaverugu, R., A. Sharma, C. Matli, and R. Biniwale, 2019: High resolution urban air quality modeling by coupling CFD and mesoscale models: A review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 539-556, doi: 10.1007/s13143-019-00110-3.
- Kang, J.-Y., T. Y. Tanaka, M. Mikami, and S.-C. Yoon, 2013: A numerical study of the effect of frozen soil on dust emission during an East Asian dust event in December 2009. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 57-65, doi: 10.1007/s13143-013-0007-0.
- Kang, M., W. Lee, P.-H. Chang, M.-G. Kim, and K.-O. Boo, 2022: Assessment of performance on the asian dust generation in spring using hindcast data in asian dust seasonal forecasting model. *Atmosphere*, **32**,

- 149-162, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.2.149.
- Karaku, C. B., 2019: The Impact of Land Use/Land Cover (LULC) Changes on Land Surface Temperature in Sivas City Center and Its Surroundings and Assessment of Urban Heat Island. *Atmos. Sci.*, **55**, 669-684, doi: 10.1007/s13143-019-00109-w.
- Kim, B.-G., and S.-U. Park, 1993: Diagnostic modeling of wind and temperature profiles in the boundary layer. *J. Korean Met. Soc.*, **29**, 281-305.
- _____, Y.-J. Kim, S.-H. Eun, and M.-H. Choi, 2007: A weekend effect in diurnal temperature range and its association with aerosols in Seoul. *Atmosphere*, **17**, 147-157.
- Kim, C.-H., and H.-J. Lee, 2013: Numerical simulations of Asian dust events: A Lagrangian Dust Model and its applications. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 571-586, doi: 10.1007/s13143-013-0051-9.
- _____, and J.-G. Jhun, 1992: Numerical simulations of the three-dimensional land and sea breezes under synoptic flows over South Korea. *J. Korean Met. Soc.*, **28**, 165-181.
- _____, and S.-U. Park, 1999a: Ozone concentration simulation in the Kyongin region using the semi-empirical photochemical box model. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 432-440.
- _____, and _____, 1999b: The development and application of semi-empirical photochemical reaction model. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 421-431.
- _____, C.-K. Song, and S.-U. Park, 1999: Simulations of surface ozone concentration distribution over the Kyongin region under the different synoptic wind fields. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 441-456.
- _____, and Coauthors, 2011: Long-term simulations of the sulfur concentrations over the China, Japan and Korea: A model comparison study. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 399-411, doi: 10.1007/s13143-011-0025-8.
- Kim, D. S., and B. H. Kwon, 2007: Vertical Structure of the Coastal Atmospheric Boundary Layer Based on Terra/MODIS Data. *Atmosphere*, **17**, 281-289.
- Kim, D.-H., S.-O. Hong, J.-Y. Byon, H. S. Park, and J.-C. Ha, 2019a: Development and evaluation of urban canopy model based on unified model input data using urban building information data in Seoul. *Atmosphere*, **29**, 412-427, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.417.
- Kim, D.-J., D.-I. Lee, J.-J. Kim, M.-S. Park, and S.-H. Lee, 2020: Development of a building-scale meteorological prediction system including a realistic surface heating. *Atmosphere*, **11**, 67, doi: 10.3390/atmos11010067.
- Kim, D.-K., A. Kondo, S. Soda, and J.-H. Oh, 2006: Modeling regional and seasonal representative photochemical ozone concentrations over the Osaka bay area of Japan. *J. Korean Met. Soc.*, **42**, 277-290.
- Kim, G.-H., Y.-H. Kim, H.-J. Koo, K.-R. Kim, and H.-S. Jung, 2014: The changes of meteorological environment by urban development. *Atmosphere*, **24**, 69-76, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.1.069.
- Kim, H., H. M. Kim, J. Kim, and C.-H. Cho, 2016: A comparison of the atmospheric CO₂ concentrations Obtained by an Inverse Modeling System and Passenger Aircraft Based Measurement. *Atmosphere*, **26**, 387-400, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.3.387.
- _____, J.-W. Hong, Y.-J. Lim, L. Hong, S.-S. Shin, and Y.-J. Kim, 2019b: Evaluation of JULES land surface model based on in-situ data of NIMS Flux sites. *Atmosphere*, **29**, 355-365, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.355.
- Kim, H.-J., and Y. Noh, 1999: Simulation of convective boundary layer using a new large eddy simulation model with the analysis on the effects of subgrid parameterization. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 587-598.
- Kim, H.-S., and Y.-S. Chung, 2010: Characteristics of mass concentrations depending on synoptic features during airborne dustfall episodes observed at Cheongwon in Korea in 2005. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 209-216, doi: 10.1007/s13143-010-0020-5.
- Kim, H.-T., Y. Chun, and S.-S. Lee, 2004: Characteristics of TSP and PM₁₀ Concentrations in Seoul in the Springtime of 2003. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 587-602.
- Kim, J. Y., S.-W., Kim, Y. S. Ghim, C. H. Song, and S.-C. Yoon, 2012: Aerosol properties at Gosan in Korea during two pollution episodes caused by contrasting weather conditions. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 25-33, doi: 10.1007/s13143-012-0003-9.
- Kim, J., B.-C. Choi, A. Jefferson, and K.-C. Moon, 2003: Aerosol light scattering and absorption measured at Gosan, Korea in spring of 2001. *J. Korean Met. Soc.*, **39**, 239-250.
- _____, J. Kim, H.-K. Cho, J. Herman, S. S. Park, H. K. Lim, J.-H. Kim, K. Miyagawa, and Y. G. Lee, 2017: Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI measurements over Seoul, Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 3661-3676, doi: 10.5194/amt-10-3661-2017.
- _____, Y. Chun, M.-H. Cho, J.-C. Choi, J.-C. Nam, and S. Kim, 2000a: Neutralization of precipitation by alkaline ions in urban and rural area. *J. Korean Met. Soc.*,

- 36, 15-24.
- _____, _____, and S.-N. Oh, 2000b: Characteristics of spectral aerosol optical depth in terms of synoptic air mass types and trajectories. *J. Korean Met. Soc.*, **36**, 487-498.
- _____, Y. S. Lee, and I. C. Shin, 2010: Policy studies for advancing aerosol research on climate change in Korea. *Atmosphere*, **20**, 49-61.
- Kim, J.-J., and J.-J. Baik, 2005: An investigation of flow and scalar dispersion in an urban area Using a CFD model. *J. Korean Met. Soc.*, **41**, 733-749.
- Kim, K., G. Lyu, S. Baek, K. Shin, and G. Lee, 2022: Retrieval and Accuracy Evaluation of Horizontal Winds from Doppler Lidars During ICE-POP 2018. *Atmosphere.*, **32**, 163-178, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.2.163.
- Kim, P.-S., 1982: Concentration and variabilities of ozone in the planetary boundary layer. *J. Korean Met. Soc.*, **18**, 1-12.
- _____, and C.-S. Rho, 1983: Calculations of time-dependent equivalent mixing heights (EMHs), using sup(222)Rn in the atmosphere. *J. Korean Met. Soc.*, **19**, 109-117.
- Kim, S.-G., S. H. Kim, C.-H. Lim, S.-K. Na, S. S. Park, J. Kim, and Y. G. Lee, 2021: Analysis of future demand and utilization of the urban meteorological data for the smart city. *Atmosphere*, **31**, 241-249, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.2.241.
- Kim, S., and Y. Chun, 2013: Physical and chemical features of Asian dust aerosol mixed with haze during 14~19 March 2009. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 543-550, doi: 10.1007/s13143-013-0048-4.
- Kim, S.-W., H.-U. Chun, and S.-U. Park, 1998: The resonance condition and energy spectrum of internal gravity waves in the overlying inversion of the convective boundary layer without mean wind shear. *J. Korean Met. Soc.*, **34**, 205-215.
- _____, S.-U. Park, and B. Lee, 1997: Variations of SO₂, NO_x, CO and O₃ concentrations in association with synoptic meteorological conditions. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 272-287.
- Kim, Y., M.-L. Ou, S.-B. Ryoo, Y. Chun, E.-H. Lee, and S. Hong, 2013: Soil moisture retrieved from microwave satellite data and its relationship with the Asian dust (Hwangsae) frequency in East Asia during the period from 2003 to 2010. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 527-534, doi: 10.1007/s13143-013-0046-6.
- Kim, Y.-J., and S.-C. Yoon, 1988: A multi-layer PBL model and its response on the heat transfer coefficient. *J. Korean Met. Soc.*, **24**, 14-26.
- Kim, Y.-K., and S.-K. Song, 2004: Synoptic analysis and transport during Asian dust events observed over Korea. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 273-291.
- _____, Y.-S. Moon, I.-B. Oh, and M.-K. Hwang, 2002: Temperature and local wind flow influencing surface ozone enhancement in Seoul and Busan, Korea. *J. Korean Met. Soc.*, **38**, 319-331.
- Koo, J.-H., J. Kim, M.-J. Kim, H. K. Cho, K. Aoki, and M. Yamano, 2007: Analysis of aerosol optical properties in Seoul using Skyradiometer observation. *Atmosphere*, **17**, 407-420.
- Koo, M.-S., and Coauthors, 2022: The Global/Regional Integrated Model System (GRIMs): an update and seasonal evaluation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, doi: 10.1007/s13143-022-00297-y.
- Ku, B., and R. J. Park, 2013: Comparative inverse analysis of satellite (MODIS) and ground (PM₁₀) observations to estimate dust emissions in East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 3-17, doi: 10.1007/s13143-013-0002-5.
- Kwak, K.-H., J.-J. Baik, Y.-H. Ryu, and S.-H. Lee, 2015: Urban air quality simulation in a high-rise building area using a CFD model coupled with mesoscale meteorological and chemistry-transport models. *Atmos. Environ.*, **100**, 167-177, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.059.
- Kwon, B.-H., K.-D. Min, and D.-S. Kim, 2001: Development of the atmospheric mixed layer observed in Kyungpook province. *J. Korean Met. Soc.*, **37**, 31-38.
- Kwon, H.-A., and Coauthors, 2021: Top-down estimates of anthropogenic VOC emissions in South Korea using formaldehyde vertical column densities from aircraft during the KORUS-AQ campaign. *Elem. Sci. Anth.*, **9**, 00109, doi: 10.1525/elementa.2021.00109.
- Kwon, H. J., and C. H. Joung, 1981: A numerical experiment of the diurnal variations of wind and temperature in the planetary boundary layer. *J. Korean Met. Soc.*, **17**, 27-36.
- Kwon, T. H., M.-S. Park, C. Yi, and Y. J. Choi, 2014: Effects of different averaging operators on the urban turbulent fluxes. *Atmosphere*, **24**, 197-206, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.2.197.
- Kwun, J. H., and S. H. You, 2009: Numerical study of sea winds simulated by the high-resolution Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 523-554.
- Lee, B., and S.-U. Park, 1997: Method for forecasting air pollution potential using synoptic meteorological. *J.*

- Korean Met. Soc.*, **33**, 641-656.
- Lee, B.-I., S.-C. Yoon, and Y. Kim, 2008: Analysis of vertical profiles and optical characteristics of the Asian dust using ground-based measurements. *Atmosphere*, **18**, 287-297.
- Lee, D.-I., J.-H. Lee, and S.-H. Lee, 2016: Uncertainly analysis of the eddy-covariance turbulent fluxes measured over a heterogeneous urban area: A coordinate tilt impact. *Atmosphere*, **26**, 461-471, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.3.473.
- _____, J.-W. Woo, and S.-H. Lee, 2018: An analytically based numerical method for computing view factors in real urban environments. *Theor. Appl. Climatol.*, **131**, 445-453, doi: 10.1007/s00704-016-1966-8.
- _____, and S.-H. Lee, 2020: The Microscale Urban Surface Energy (MUSE) model for real urban application. *Atmosphere*, **11**, 1347, doi: 10.3390/atmos11121347.
- Lee, D.-I., K.-E. Kim, K.-D. Min, I.-H. Yoon, and Y.-S. Moon, 1997a: On the fluctuations of atmospheric aerosol particles in winter monsoon near the seashore. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 219-227.
- Lee, D.-K., and Y.-A. Kim, 1997: Springtime weather types over Northeast Asia and relationship with yellow sand events during 1980~1989. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 17-40.
- Lee, E.-H., E. Munkhtsetseg, S.-B. Kim, J.-C. Ha, S.-S. Lee, and Y. Chun, 2013a: Numerical simulation and evaluation of Asian dust events observed in Mongolia in spring 2011. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 111-120, doi: 10.1007/s13143-013-0012-3.
- _____, J.-C. Ha, S.-S. Lee, and Y. Chun, 2013b: PM₁₀ data assimilation over south Korea to Asian dust forecasting model with the optimal interpolation method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 73-85, doi: 10.1007/s13143-013-0009-y.
- _____, S. Kim, J.-C. Ha, and Y. Chun, 2012a: Performance analysis of simulation of Asian dust observed in 2010 by the all-season dust forecasting model, UM-ADAM2. *Atmosphere*, **22**, 245-257, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.245.
- Lee, H., J. E. Kim, and Y. Chun, 2013c: The comparison of two severe Hwangsa (Asian dust) cases of spring and winter in Seoul, Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 49-56, doi: 10.1007/s13143-013-0006-1.
- Lee, H.-J., S.-W. Kim, S.-C. Yoon, S. Lee, and J.-H. Kim, 2011: Comparison of light-absorption properties of aerosols observed in East and South Asia. *Atmosphere*, **21**, 301-309, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.3.301.
- _____, _____, _____, and J.-Y. Kang, 2012b: Examining the non-spherical effect of Asian dust particle on aerosol optical depth. *Atmosphere*, **22**, 175-186, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.175.
- _____, H.-Y. Jo, J.-M. Kim, J. Bak, M.-S. Park, J.-K. Kim, Y.-J. Jo, and C.-H. Kim, 2023: Nocturnal boundary layer height uncertainty in particulate matter simulations during the KORUS-AQ campaign. *Remote Sensing*, **15**, 300, doi: 10.3390/rs15020300.
- _____, _____, S.-W. Kim, M.-S. Park, and C.-H. Kim, 2019: Impacts of Atmospheric Vertical Structures on Transboundary Aerosol Transport from China to South Korea. *Sci. Rep.*, **9**, 13040, doi: 10.1038/s41598-019-49691-z.
- Lee, H.-W., and W.-S. Jung, 2001: Observational evidence of medium-range transport of air pollutants. *J. Korean Met. Soc.*, **37**, 475-486.
- _____, D.-G. Lee, T.-Y. Lee, Y.-K. Kim, G.-M. Won, and H.-W. Han, 1998: A numerical simulation for flow current in coastal urban area. *J. Korean Met. Soc.*, **34**, 75-86.
- Lee, J., J. Kim, H. C. Lee, and T. Takemura, 2007: Classification of aerosol type from MODIS and OMI over East Asia. *J. Korean Met. Soc.*, **43**, 343-357.
- Lee, J.-H., L.-S. Chang, and S.-H. Lee, 2015: Simulation of air quality over South Korea using the WRF-Chem model: Impacts of chemical initial and lateral boundary conditions. *Atmosphere*, **25**, 639-657, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.4.639.
- Lee, J.-J., and C.-H. Kim, 2008: Characteristics of recent occurrence frequency of Asian dust over the source regions - Analysis of the dust occurrences since 2002. *Atmosphere*, **18**, 493-506.
- Lee, J.-Y., D.-I. Lee, Y.-H. Han, and G. Ok, 1997b: Vertical distribution of O₃ and NO₂ concentrations in the atmospheric boundary layer during temperature inversion. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 315-326.
- Lee, K., and Coauthors, 2020: Development of Korean Air Quality Prediction System version 1 (KAQPS v1) with focuses on practical issues. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 1055-1073, doi: 10.5194/gmd-13-1055-2020.
- Lee, M., 2014: An analysis on the concentration characteristics of PM_{2.5} in Seoul, Korea from 2005 to 2012. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 585-594, doi: 10.1007/s13143-014-0048-z.
- Lee, S., R. J. Park, S.-Y. Hong, M.-S. Koo, J. I. Jeong, S.-W. Yeh, and S.-W. Son, 2022: A new chemistry-climate model GRIMs-CCM: Model evaluation of interactive chemistry-meteorology simulations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 647-666, doi: 10.1007/s13143-022-

- 00281-6.
- Lee, S.-H., 2011: Further development of the vegetated urban canopy model including a grass-covered surface parameterization and photosynthesis effects. *Boundary-Layer Meteorol.*, **140**, 315-342, doi: 10.1007/s10546-011-9603-7.
- _____, 2015: LAS-derived determination of surface-layer sensible heat flux over a heterogeneous urban area. *Atmosphere*, **25**, 193-203, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.2.193.
- _____, and H.-D. Kim, 2010: Modification of nocturnal drainage flow due to urban surface heat flux. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 453-465, doi: 10.1007/s13143-010-0026-z.
- _____, and J.-J. Baik, 2011: Evaluation of the vegetated urban canopy model (VUCM) and its impacts on urban boundary layer simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 151-165, doi: 10.1007/s13143-011-0005-z.
- _____, and S.-U. Park, 2008: A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modeling. *Boundary-Layer Meteorol.*, **126**, 73-102.
- Lee, T.-Y., 1987: One-dimensional model for the planetary boundary layer over a vegetated surface. *J. Korean Met. Soc.*, **23**, 25-39.
- _____, D.-B. Shin, and Y.-Y. Park, 1989: Mean structure of surface winds for summertime in South Korea. *J. Korean Met. Soc.*, **25**, 30-42.
- Lee, Y.-B., 1973a: Turbulence structure of forest. *J. Korean Met. Soc.*, **9**, 67-72.
- _____, 1973b: Wind climatology of city. *J. Korean Met. Soc.*, **9**, 87-93.
- _____, 1975: Some characteristics of city wind. *J. Korean Met. Soc.*, **11**, 41-45.
- Lee, Y.-H., 2009a: The spectral features of heat and momentum transfer within open canopies. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 423-437.
- _____, 2012: Influence of non-flat terrain and wind direction shear on canopy turbulence. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 243-252, doi: 10.1007/s13143-012-0024-4.
- _____, 2021: Climatology of nocturnal low-level wind maxima at a topographically complex coastal site in Boseong. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **133**, 643-653, doi: 10.1007/s00703-020-00774-x.
- Lee, Y.-S., and J.-J. Kim, 2011: Effects of an apartment complex on flow and dispersion in an urban area. *Atmosphere*, **21**, 95-108, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.1.095.
- Lee, Y. S., 2009b: In situ measurements of Asian dust aerosols off the California coast: Optical closure. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 221-231.
- Li, Z., X. Yang, C. Zhao, and T. Fan, 2020: Ratio of PM_{2.5} to PM₁₀ mass concentrations in Beijing and relationships with Pollution from the North China plain. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 421-434, doi: 10.1007/s13143-020-00203-4.
- Liao, W., L. Wu, S. Zhou, X. Wang, and D. Chen, 2020: Impact of synoptic weather types on ground-level ozone concentrations in Guangzhou, China. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 169-180, doi: 10.1007/s13143-020-00186-2.
- Lim, H.-J., Y.-H. Lee, C. Cho, K.-R. Kim, and B.-J. Kim, 2016: Estimation of the random error of eddy covariance data from two towers during daytime. *Atmosphere*, **26**, 483-492, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.3.483.
- _____, and _____, 2019: Characteristics of sea breezes at coastal area in Boseong. *Atmosphere*, **29**, 41-51, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.1.041.
- Lim, G.-H., and K.-A Kim, 1996: Transient variation in the concentration of air pollutants in Kyoung-Gi area and the associated evolution of synoptic scale motions. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 153-167.
- Lim, S. H., M. Lee, G. Lee, and K. S. Kang, 2010: Source signature of mass, nitrate and sulfate in supermicron and submicron aerosols at Gosan superstation on Jeju island. *Atmosphere*, **20**, 221-228.
- Lim, Y.-K., J. Kim, H. C. Lee, S.-S. Lee, J.-W. Cha and S. B. Ryoo, 2019: Aerosol physical characteristics over the Yellow sea during the KORUS-AQ field campaign: Observations and air quality model simulations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 629-640, doi: 10.1007/s13143-018-00100-x.
- Liu, L., W. Zhang, Q. Lu, and G. Wang, 2021: Variations in the sensible heating of Tibetan Plateau and related effects on atmospheric circulation over South Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 499-510, doi: 10.1007/s13143-020-00207-0.
- Mahendranth, B., and G. Bharathi, 2012: Interannual variability and temporal variations of total column ozone in Visakhapatnam from ground based observations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 191-195, doi: 10.1007/s13143-012-0019-1.
- Mao, R., C.-H. Ho, S. Feng, D.-Y. Gong, and Y. Shao, 2013: The influence of vegetation variation on North-east Asian dust activity. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 87-94, doi: 10.1007/s13143-013-0010-5.
- Meng, C., 2017: Mitigating the surface urban heat island: Mechanism study and sensitivity analysis. *Asia-Pac.*

- J. Atmos. Sci.*, **53**, 327-338, doi: 10.1007/s13143-017-0036-1.
- Min, K.-D., S.-H. Kim, K.-E. Kim, and B.-H. Kwon, 1999: Seasonal and local characteristics of atmospheric mixed layer over Kyungpook province. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 539-548.
- Noh, Y., H.-J. Kim, and K.-S. Yang, 1997: Large eddy simulation of a two-dimensional thermal. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 497-508. doi: 10.1109/HPC.1997.592145.
- Oak, Y. J., and Coauthors, 2022: Evaluation of Secondary Organic Aerosol (SOA) simulations for Seoul, Korea. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **14**, doi: 10.1029/2021MS002760.
- Oh, H.-M., and K.-J. Ha, 2005: Analysis of marine meteorological characteristics at Jeodo ocean research station from 2003 to 2004. *J. Korean Met. Soc.*, **41**, 671-680.
- _____, _____, J. S. Shim, Y.-K. Hyun, and K.-S. Yun, 2007: Seasonal characteristics of turbulent fluxes observed at Jeodo ocean research station. *Atmosphere*, **17**, 421-433.
- Oh, H.-S., and S.-C. Yoon, 1996: Characteristics of air pollutions and meteorological fields affecting the visibility impairment in Seoul. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 131-138.
- Park, D.-H., S.-W. Kim, M.-H. Kim, H. Yeo, S. S. Park, T. Nishizawa, A. Shimizu, and C.-H. Kim, 2021a: Impacts of local versus long-range transported aerosols on PM₁₀ concentrations in Seoul, Korea: An estimate based on 11-year PM₁₀ and lidar observations. *Sci. Total Environ.*, **750**, 141739, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141739.
- Park, H.-J., and Coauthors, 2019: Retrieval of NO₂ column amounts from ground-based hyperspectral imaging sensor measurements. *Remote Sens.*, **11**, 3005, doi: 10.3390/rs11243005.
- Park, I.-H., and C. B. Lee, 2003: Lateral and vertical dispersion parameters for atmospheric pollutants using observed turbulence data. *J. Korean Met. Soc.*, **39**, 265-277.
- Park, J., J. H. Kim, and S. J. Hong, 2012: Detection of yellow sand dust over Northeast Asia using background brightness temperature difference of infrared channels from MODIS. *Atmosphere*, **22**, 137-147, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.137.
- Park, J.-U., and Coauthors, 2022a: Spatiotemporal inhomogeneity of total column NO₂ in a polluted urban area inferred from TROPOMI and Pandora intercomparisons. *GISci. Remote Sens.*, **59**, 354-373, doi: 10.1080/15481603.2022.2026640.
- Park, M., S. S. Yeom, N. Kim, J. W. Cha, and S. B. Ryoo, 2016: Characteristics of aerosol and cloud condensation nuclei concentrations measured over the Yellow sea on a meteorological research vessel, GISANG 1. *Atmosphere*, **26**, 243-256, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.2.243.
- Park, M.-S., and M.-H. Choi, 2016: Development of a Quality Check Algorithm for the WISE Pulsed Doppler Wind Lidar. *Atmosphere*, **26**, 461-471, doi: 10.14191/atmos.2016.26.3.461.
- _____, S. H. Park, J. H. Chae, M. H. Choi, Y. Song, M. Kang, and J. W. Roh, 2017: High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan area, South Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 1575-1594, doi: 10.5194/amt-10-1575-2017.
- Park, O.-H., 1983a: Validity of similarity approach on the instantaneous lateral diffusion of a mesoscale continuous plume from an elevated source. *J. Korean Met. Soc.*, **19**, 95-108.
- Park, R. J., and S.-W. Kim, 2014a: Air quality modeling in East Asia: present issues and future directions. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 105-120, doi: 10.1007/s13143-014-0030-9.
- _____, J. I. Jeong, and D. Youn, 2009: A study of the effects of Siberian wildfires on ozone concentrations over East Asia in spring 2003. *Atmosphere*, **19**, 227-235.
- _____, and Coauthors, 2021b: Multi-model intercomparisons of air quality simulations for the KORUS-AQ campaign. *Elem. Sci. Anth.*, **9**, 00139, doi: 10.1525/elementa.2021.00139.
- Park, S. K., and J.-H. Kim, 2011: A study on changes in local meteorological fields due to a change in land use in the lake Shihwa region using synthetic land cover data and high-resolution meososcale model. *Atmosphere*, **21**, 405-414, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.4.405.
- Park, S. S., S.-W. Kim, C.-K. Song, J.-U. Park, and K.-H. Bae, 2020: Spatio-temporal variability of aerosol optical depth, total ozone and NO₂ over East Asia: Strategy for the validation to the GEMS scientific products. *Remote Sens.*, **12**, 2256, doi: 10.3390/rs12142256.
- Park, S., and Coauthors, 2022b: Determination of mixing layer height from co-located lidar, ceilometer and wind Doppler lidar measurements: Intercomparison and implications for PM_{2.5} simulations. *Atmos. Pol-*

- lut. Res.*, **13**, 101310, doi: 10.1016/j.apr.2021.101310.
- Park, S.-B., J.-J. Baik, and B.-S. Han, 2015: Large-eddy simulation of turbulent flow in a densely built-up urban area. *Environ. Fluid Mech.*, **15**, 235-250, doi: 10.1007/s10652-013-9306-3.
- Park, S.-J., and J.-J. Kim, 2014b: Effects of building-roof cooling on scalar Dispersion in urban street canyons. *Atmosphere*, **23**, 331-341, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.3.331.
- Park, S.-U., 1983b: The budget of turbulent kinetic energy in a slightly stable boundary layer. *J. Korean Met. Soc.*, **19**, 72-80.
- _____, 1990: Results of a three dimensional numerical model of land-sea breezes over South Korea. *J. Korean Met. Soc.*, **26**, 78-103.
- _____, 1992a: Estimation of the wind profile in the boundary layer using routine meteorological data. *J. Korean Met. Soc.*, **28**, 417-433.
- _____, 1992b: Estimation of wind variances in the boundary layer with results of the three dimensional land-sea breeze model over South Korea. *J. Korean Met. Soc.*, **28**, 435-451.
- _____, and C.-H. Kim, 1996: SO₂ concentrations simulation in the Kyongin region. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 553-568.
- _____, and E.-H. Lee, 2004: Parameterization of Asian dust (Hwangsang) particle-size distributions for use in dust emission models. *Atmos. Environ.*, **38**, 2155-2162.
- _____, and H.-J. In, 2003: Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4618, doi: 10.1029/2003JD003484.
- _____, and I.-H. Yoon, 1988: One-dimensional numerical modeling of the planetary and soil boundary layers over two different physical surfaces. *J. Korean Met. Soc.*, **24**, 49-68.
- _____, and _____, 1991: Estimation of atmospheric boundary layer parameters using routinely available meteorological data. *J. Korean Met. Soc.*, **27**, 32-54.
- _____, Y.-U. Lee, and J.-H. Bong, 1989: Special observations for the growth of the mixed layer. *J. Korean Met. Soc.*, **25**, 138-147.
- _____, A. Choe, and M.-S. Park, 2013: A simulation of Asian dust events observed from 20 to 29 December 2009 in Korea by using ADAM2. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 95-109, doi: 10.1007/s13143-013-0011-4.
- Prasanna, V., H. W. Choi, J. Jung, Y. G. Lee, and B. J. Kim, 2018: High-resolution wind simulation over Incheon international airport with the unified model's Rose nesting suite from KMA operational forecasts. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 187-203, doi: 10.1007/s13143-018-0003-5.
- Ranjan, A. K., A. K. Patra, and A. K. Gorai, 2021: A review on estimation of particulate matter from satellite-based aerosol optical depth: Data, methods, and challenges. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 679-699, doi: 10.1007/s13143-020-00215-0.
- Ryu, Y.-H., J.-J. Baik, and S.-H. Lee, 2011: A new single-layer urban canopy model for use in mesoscale atmospheric models. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1773-1794, doi: 10.1175/2011JAMC2665.1.
- Suk, M.-K., K.-E. Kim, C. Bernard, B.-H. Heo, and J.-H. Pak, 2004: Analysis of the characteristics on onshore and offshore winds and estimation of the height of convective boundary layer by UHF Radar observations. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 395-408.
- Seo, W., H. Lee, and Y.-H. Kim, 2021: Revision of 22-year records of atmospheric baseline CO₂ in South Korea: Application of the WMO X2019 CO₂ scale and a new baseline selection method (NIMS Filter). *Atmosphere*, **31**, 593-606, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.593.
- Shaeb, K. H. B., K. K. Rao, and P. Althaf, 2020: Seasonal characteristics of black carbon aerosols over an urban city in India: Source analysis using concentration weighted trajectories. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 29-43, doi: 10.1007/s13143-019-00126-9.
- Shi, H., S.-S. Lee, H.-W. Chun, H.-J. Song, Y.-C. Noh, and B.-J. Sohn, 2016: Optical properties of aerosols related to haze events over Seoul inferred from skyradiometer and satellite-borne measurements. *Atmosphere*, **26**, 289-299, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.2.289.
- Shim, J.-K., and S.-Y. Hong, 2006: A study on the sensitivity of the simulations of typhoon Saomai (2000) to the cumulus parameterization and planetary boundary layer schemes in MM5. *J. Korean Met. Soc.*, **42**, 75-85.
- Shim, S., Y. J. Yoon, S. S. Yum, J. W. Cha, J. H. Kim, J. Kim, and B.-Y. Lee, 2008: Nephelometer measurement of aerosol scattering coefficients at Seoul. *Atmosphere*, **18**, 459-474.
- Shin, D., J. E. Kim, C.-Y. Chung, and H.-J. Yoo, 2022: Aerosol physical characteristics over the Yellow sea using optical particle counter measurement data onboard Gisang1 vessel during the YES-AQ campaign. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **38**, 203-219, doi: 10.5572/KOSAE.2022.38.2.203.

- Shin, D.-H., and T.-Y. Lee, 1997: Turbulence structure of the stratocumulus-topped marine boundary layer revealed by large eddy simulations. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 75-91.
- Shin, S.-H., and K.-J. Ha, 2003: An experimental study on non-local planetary boundary-layer parameterization in a GCM. *J. Korean Met. Soc.*, **39**, 79-93.
- _____, and _____, 2005: Impact of improvement of variable depth PBL and PBL parameterization on a GCM. *J. Korean Met. Soc.*, **41**, 717-732.
- Shin, S.-S., S.-C. Yoon, and J.-C. Nam, 2004: Analysis of chemical components of aerosols for dust and non-dust cases during 1993-2002. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 345-359.
- Shin, Y.-R., E.-H. Sohn, K.-H. Park, G.-H. Ryu, S. Lee, S.-Y. Lee, and N.-Y. Park, 2021: Improved dust detection over East Asia using geostationary satellite data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 787-798, doi: 10.1007/s13143-021-00230-9.
- So, J., S.-W. Yeh, J.-W. Lee, J. I. Joeng, R. J. Park, and B.-K. Moon, 2018: Simple analysis on the relationship between sea salt aerosols and precipitation in the North Pacific ocean using the global chemical transport model simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 179-186, doi: 10.1007/s13143-018-0002-6.
- Song, C.-K., C.-H. Ho, R. J. Park, Y.-S. Choi, J. Kim, D.-Y. Gong, and Y.-B. Lee, 2009: Spatial and seasonal variations of surface PM₁₀ concentration and MODIS aerosol optical depth over China. *J. Korean Met. Soc.*, **45**, 33-43.
- Song, C.-K., J.-J. Kim, and D.-W. Lee, 2007: The Effects of Windbreaks on Reduction of Suspended Particles. *Atmosphere*, **17**, 315-326.
- Song, S.-K., and Y.-K. Kim, 2005: A case study of an Asian dust (Hwangsa) event observed in November 2002 in Korea. *J. Korean Met. Soc.*, **41**, 707-715.
- Spiridonov, V., and M. Curic, 2009: Numerical simulation on physical and chemical processes in convective clouds. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 1-19.
- Sugimoto, N., Y. Hara, A. Shimizu, T. Nishizawa, I. Matsui, and M. Nishikawa, 2013: Analysis of dust events in 2008 and 2009 using the lidar network, surface observations and the CFORS model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 27-39, doi: 10.1007/s13143-013-0004-3.
- Suk, M.-K., K.-E. Kim, C. Bernard, B.-H. Heo, and J.-H. Pak, 2004: Analysis of the characteristics on onshore and offshore winds and estimation of the height of convective boundary layer by UHF Radar observations. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 395-408.
- Tariq, S., U.-H. Zia, and M. Ali, 2016: Satellite and ground-based remote sensing of aerosols during intense haze event of October 2013 over Lahore, Pakistan. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 25-33, doi: 10.1007/s13143-015-0084-3.
- Wang, K.-Y., and W.-S. Kau, 2015: Simulation of impact from stratospheric ozone on global tropospheric ozone distribution with a chemistry transport model: A case study during the 1990-1991 period. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 137-155, doi: 10.1007/s13143-015-0064-7.
- Yang, H.-J., and J.-J. Kim, 2015: Assessment of observation environment for Surface wind in urban areas using a CFD model. *Atmosphere*, **25**, 449-459, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.3.449.
- Yin, J.-F., D.-H. Wang, Z.-M. Liang, C.-J. Liu, G.-Q. Zhai, and H. Wang, 2018: Numerical study of the role of microphysical latent heating and surface heat fluxes in a severe precipitation event in the warm sector over Southern China. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 77-90, doi: 10.1007/s13143-017-0061-0.
- Yoo, H. Y., and Coauthors, 2021: Characteristics of carbonaceous and organic components in PM_{2.5} over the Yellow sea. *Atmosphere*, **31**, 267-282, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.3.267.
- Yoon, J. M., J. Kim, J. H. Lee, H. K. Cho, B.-J. Sohn, and M.-H. Ahn, 2007: Retrieval of aerosol optical depth over East Asia from a geostationary satellite, MTSAT-1R. *J. Korean Met. Soc.*, **43**, 133-142.
- Yoon, S.-C., 1986: Vertical mixing length of turbulence in a stably stratified fluid. *J. Korean Met. Soc.*, **22**, 1-7.
- _____, S.-W. Kim, S.-J. Choi, and I.-J. Choi, 2010: Regional-scale relationships between aerosol and summer monsoon circulation, and precipitation over northeast Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 279-286, doi: 10.1007/s13143-010-1002-3.
- Yumimoto, K., H. Murakami, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, A. Ogi, and T. Maki, 2016: Forecasting of Asian dust storm that occurred on May 10-13, 2011, using an ensemble-based data assimilation system. *Particulology*, **28**, 121-130, doi: 10.1016/j.partic.2015.09.001.
- Yun, K.-S., Y.-W. Seo, K.-J. Ha, J.-Y. Lee, and Y. Kajikawa, 2014: Interdecadal changes in the Asian winter monsoon variability and its relationship with ENSO and AO. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 531-540, doi: 10.1007/s13143-014-0042-5.
- Zang, Z., Z. Hao, X. Pan, Z. Li, D. Chen, L. Zhang, and Q. Li, 2015: Background error statistics for aerosol variables from WRF/Chem predictions in Southern Cali-

- fornia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 123-135, doi: 10.1007/s13143-015-0063-8.
- Zhang, G., Y. Lun, and S. Zhu, 2020a: Estimation of the spatio-temporal characteristics of anthropogenic heat emission in the Qinhuai district of Nanjing using the inventory survey method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 367-380, doi: 10.1007/s13143-019-00142-9.
- Zhang, K., C. Zhao, H. Fan, Y. Yang, and Y. Sun, 2020b: Toward understanding the differences of PM2.5 characteristics among five China urban cities. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 493-502, doi: 10.1007/s13143-019-00125-w.