

한국기상학회 원격탐사 분야 학술 발전 현황

안명환^{1)*} · 김준²⁾ · 이규원³⁾ · 김상우⁴⁾

¹⁾이화여자대학교 기후에너지시스템전공, ²⁾연세대학교 대기과학과,
³⁾경북대학교 천문대기과학과, ⁴⁾서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2023년 3월 7일, 게재확정일: 2023년 3월 17일)

A Progress Status of Remote Sensing in the Korean Meteorological Society

Myoung-Hwan Ahn^{1)*}, Jhoon Kim²⁾, GyuWon Lee³⁾, and Sang-Woo Kim⁴⁾

¹⁾Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

²⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

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

⁴⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 7 March 2023; accepted 17 March 2023)

Abstract Remote sensing becomes a new and core framework for the atmospheric sciences and closely related areas concerning with the ever-changing global environmental status. However, remote sensing in the Korea Meteorological Society is relatively new, where the first relevant paper is appeared in 1983, as well as is an area with relatively limited number of research groups. Here, we review and summarize some of the key progress in this area within Korea Meteorological Society focusing on the areas of satellite, radar, and ground based remote sensing such as lidar, spectrometer and sun photometer. Overall, the area is shown to have the most significant progress occur along with the acquisition of the key infra structures such as the COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) and S-band radar system led by Korea Meteorological Administration in early 2000. After that, the area has quickly developed into a status playing important roles to lead and support the overall activities in the atmospheric measurements. It is expected that the importance and role of the remote sensing will increase in the coming years.

Key words: Remote Sensing, satellite, radar, lidar, spectrometer and sun photometer

1. 서론

원격탐사는 대기과학 분야에서의 관측 패러다임을 근본적으로 변화시켰고, 그 중요성과 역할은 기후변화에 따른 대기과학의 새로운 역할이 요구되는 상황에서 앞으로 더 증대될 것으로 예상된다. 높은 시공간 해상도의 관측 자료를 공백없이 24시간 365일 연속적으로 제공할 수 있는 능력뿐 아니라, 추가적으로

생산할 수 있는 정보의 종류, 양, 정확도가 지속적으로 개선되고 있어, 대기과학 분야에서는 반드시 필요한 핵심 도구로 자리 잡은 지 오래다.

본 논문에서는 1963년 발족된 한국기상학회의 60주년 기념으로 원격탐사 분야의 큰 축을 이루는 위성, 기상레이더, 라이다 분야에 대한 연구 활동을 국내학회지에 발간된 논문과 학회 회원이 국제 학회지에 발표한 논문 중 학술적 가치가 뛰어난 내용을 위주로 조사하였다. 게재된 논문에서도 나타나지만, 원격탐사 분야는 다른 분야에 비해 출발이 빠른 편은 아니었다. 위성 자료를 활용한 최초의 논문이 1983년에 처음으로 게재된 것만 보아도 알 수 있다(Lee, 1983). 그렇지만 최근에 들어서는 원격탐사 분야 자체에 대한 연

*Corresponding Author: Myoung-Hwan Ahn, Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University, Ewha Yeodaegil 52, Seoul 03760, Korea.
Phone: +82-2-3277-4462, Fax: +82-2-3277-2966
E-mail: terryahn65@gmail.com

구 결과뿐 아니라 다양한 분야에서 원격탐사를 통해 생산된 자료를 활용하는 방대한 논문들이 보고되고 있다. 따라서 여기에서는 원격탐사 자료의 생산, 알고리즘, 자료처리 및 활용 등과 같은 직접적으로 관련되는 연구 분야를 중심으로 정리하였다. 2장에서는 위성 분야, 3장에서는 기상레이더 분야, 4장에서는 지상원격탐사 분야를 정리하고, 종합정리를 5장에 제시하였다.

2. 위성 분야

국내 학술지에 위성 자료를 활용하거나 처리하는 내용으로 소개된 최초의 연구는 정지위성영상을 이용하여 제주도 남쪽에서 발생하는 칼만와도의 특성을 분석한 것으로(Lee, 1983), 이 논문이 1983년도 한국기상학회지에 게재되면서 관련분야 연구결과가 우리 학회지에 본격적으로 소개되기 시작하였다. 2022년까지 학술지에 소개된 위성 분야에서의 발전은 2000년대 초반 우리나라 최초의 정지궤도 복합위성인 천리안위성에 기상관측임무가 포함되는 시점을 기준으로 여러 측면에서 크게 구분될 수 있는 것으로 파악된다. 이전의 연구는 외국 자료의 활용, 외국에서 소개되거나 도입된 기술의 적용이나 평가 등이 주를 이루었다면, 2000년대 이후에는 우리 위성 자료의 활용을 위한 노력이 강화되면서 위성 자료를 이용한 다양한 산출물을 추가적으로 생산하기 위한 알고리즘의 개발 및 개발된 산출물의 활용 기술 개발이 활발하게 진행되었다. 따라서 2000년대 이전의 시기를 도입기라고 정의할 수 있으며, 그 이후의 시기를 도약기 또는 자립기라고 표현할 수 있겠다.

위성 분야에서의 주요 학술 활동은 크게 위성을 이용한 정보를 생산하기 위한 과정과 생산된 자료를 활용하는 분야로 구분할 수 있다. 정보생산의 경우에는 원시 자료의 검보정, 개별 정보를 생산하기 위한 알고리즘 기술 및 그 정확도에 대한 평가 등의 소분야가 보인다. 또한 활용 분야의 경우에는 단기예보, 수치예보, 기후 및 환경 분야 등으로 크게 구분될 수 있다. 학술지에 위성 분야 연구가 소개되기 시작한 초창기에는 주로 단기예보(태풍을 포함한)를 지원할 수 있는 산출물에 집중되었다면, 최근에 와서는 위성 자료의 수치모델 활용에 대한 다수의 논문이 게재되고 있어, 전세계적인 위성 분야 연구 활동 경향과 궤를 같이하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 조사에서는 위성의 주요 활용 분야별로 국내 학술지에 발표된 주요 내용들을 요약하였다.

2.1 기상현상 분석

2.1.1 주요 현상 분석

우선 강수 현상에 대한 분석으로는 1시간 간격의

정지위성 자료를 이용하여 구름 합류에 의한 강수 현상 패턴의 조사(Lee et al., 1993), 마이크로파 휘도온도와 대기수상체의 관계를 이용한 열대해양에서의 대기 상하운동에 대한 연구(Yoo, 1996), 마이크로파 자료에서 생산된 정보를 이용하여 수증기의 수평이류가 태풍 물수지에 가장 큰 영향을 미침을 보인 연구(Kim et al., 1997), 대기중의 수적이 마이크로파의 산란에 미치는 영향을 조사하여 위성 자료와 레이다 강수 자료의 관계를 조사한 연구(Yoo et al., 1998), 열대지방의 시간별 강수 특성을 분석하기 위해 적외영상과 우량계 자료를 함께 활용한 연구(Byun and Lim, 1999), 강우관측 위성을 이용한 매든-줄리안 진동의 대류성 및 층운형 강수 특징(Son and Seo, 2010), 적외채널의 휘도온도를 이용한 대류 세포의 발달 단계별 강우강도 특성에 대한 연구 등(Kim and Kwon, 2011) 다양한 연구가 보고되었다.

또 다른 중요한 분야로는 다양한 대기 현상의 분석 시 그 정확도를 높이기 위해 위성 자료를 활용하는 것으로, 위성에서 산출된 총가강수량 자료를 이용하여 여름 몬순 기간 중 수증기 운송 메커니즘에 대한 연구(Sohn et al., 1998), 적도지방에서의 대기운동에 대한 이해를 높이기 위해 마이크로파 관측 휘도온도와 해수면온도의 장기간 통계분석(Yoo et al., 1998), Terra/MODIS (Terra Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)에서 산출된 온도 프로파일을 이용하여 연안 지역에서의 대기경계층 산출 가능성에 대한 조사(Kim and Kwon, 2007), GK-2A (GEO-KOMPSAT-2A)에서 산출되는 자료를 좀 더 효과적으로 활용하기 위한 태풍 및 장마의 개념모형 설계(Moon et al., 2016), 천리안 위성 자료의 수증기 영상정보를 이용한 대류권계면 접합난류 탐지 가능성(Kim and Kim, 2017), 우리나라에서 발생하는 안개의 객관적인 유형 분류 정확도를 높이기 위해 위성 자료를 함께 활용한 연구(Lee and Suh, 2019) 등 다양한 분야에서 활용되고 있음을 보였다.

2.1.2 구름정보

열대해양 및 극지방 해양에서 적외채널 자료를 이용한 권운 관측에 대한 연구(Yoo, 1992c; Yoo, 1993), 천리안 위성 구름탐지 알고리즘 개발을 위한 구름정보 생산 알고리즘 비교(Choi and Ho, 2003; Lee et al., 2003) 등이 보고된 이후, 구름정보에 대한 다양한 연구들이 보고되었다. 관측자동화 추세에 맞추어 주관적 관측으로 구해지던 전운량을 정지위성 자료를 이용한 운량 산출 연구(Oh et al., 2006; Lee et al., 2007) 등이 2000년대 중반에 보고되어 GK-2A 위성의 전운량 산출 방법의 기반이 되었다. 또한, 인도 연구진에 수행한 마이크로파 탐측기를 이용한 구름빙정량을 산

출하는 방법이 소개되기도 하였다(Piyush et al., 2019).

2.1.3 강우관측

강우관측은 기본적으로 지상 기반의 우량계를 이용하지만, 넓은 지역을 연속적으로 감시하기 위한 수단으로 원격탐사 장비의 활용이 확대되고 있다. 원격탐사 장비로는 레이더가 핵심 수단으로 활용되고 있으며, 레이더가 커버하지 못하는 해상, 산악지대 등에서 위성 자료가 활용되고 있다. 위성관측의 경우 전반적으로 기후나 에너지수지 연구 등으로 활용되고 있으며, 일부의 경우에는 실시간 강우정보 생산을 위한 보조수단으로 활용되고 있다. 따라서 대부분의 경우 위성에서의 강우강도 정보는 저궤도 위성에 탑재된 수동형 마이크로파 복사계나 일부 위성의 레이더 관측 자료를 활용하는 것이 핵심으로 보인다. 다만, 우리나라에서는 실시간 강우예보를 위한 정보생산에 많은 관심을 두고 가능성이 시도되고 있는데, 24시간 연속 관측이 가능하고, 쉽게 확보할 수 있는 적외 자료를 이용하는 다양한 방법들이 보고되었다(Yoo, 1992b; Lee et al., 1994; Lee and Sohn, 1999). 1992년 방출장파복사를 이용한 강우량 추정에 관한 연구에서부터(Yoo, 1992a), 통계적 방법(Ha, 2005), 수동형 마이크로파 센서를 이용한 강우강도 산출 방법(Yoo et al., 2003; Kwon et al., 2017), 지상관측 자료를 함께 활용한 위성 자료의 편차보정 방법(Yeh et al., 2020) 등 다양한 방법들이 보고되고 있으나, 적외 또는 가시채널이 가지는 한계와 마이크로파 센서를 탑재한 위성을 국내에서 운영하지 않는 상황으로 다양한 연구 결과들이 보고되지는 않은 것으로 사료된다.

2.1.4 지표 분야

위성관측 자료를 이용한 다양한 지표면 특성 정보 산출은 위성을 이용한 지구관측 초기부터 활발하게 이루어진 연구 분야이다. 그렇지만 우리나라의 경우 위성 분야 연구가 가끔 보고되기 시작하던 초창기인 1986년에 지표면온도 산출을 위해 정지기상위성의 복사관측값을 이용하는 연구가 게재된 이후(Choi and Cho, 1986) 위성을 이용한 표면온도 또는 표면정보 산출에 관한 연구는 오랜 기간 보고되지 않았다. 기상청의 위성 자료 직수신장비 현대화가 이루어진 1998년 이후부터 정량적 정보생산에 대한 연구들이 다시 보고되기 시작하였다. 2000년대 초반부터 해수면 정보(Kim and Hong, 2002; Ahn et al., 2011), 지표면온도(Hong et al., 2009), 토양수분(Kim et al., 2013), 지표특성 및 반사도 산출(Yeom and Han, 2009; Cho and Suh, 2013; Lee et al., 2020; Seong et al., 2020)을 위한 방법들이 연이어 보고되기 시작하였으며, 이들 산출 알고리즘에 관한 연구 외에도 고해상도 자료

를 이용한 한반도 및 아시아 지역의 피복 분류(Kang et al., 2009; Kang et al., 2010), 해수면 온도 산출 알고리즘의 개선 및 특성 분석에 관한 연구들(Kim et al., 2011; Park et al., 2020)이 보고되었다. 최근에는 적외채널로는 산출이 어려운 변수인 토양수분을 위성 자료와 추가적인 보조 자료를 함께 활용하는 방법(Kwon et al., 2020), 산출된 해수면온도를 이용한 해류 산출(Kim et al., 2020)이 시도되는 등 활발한 연구 활동이 보고되고 있다.

2.2 예보지원

위성 자료의 중요 활용 분야로 전기간에 걸쳐 꾸준히 연구되는 분야 중의 하나가 초단기 및 중기예보에 활용하는 분야이다. 1986년에 출간된 기상위성 자료를 이용할 경우 종관분석 정확도를 개선할 수 있는지에 대한 연구(Lee, 1986)를 시작으로, 2000년대 초반에는 위성 자료를 이용한 태풍 정보 생산 가능성 및 활용이나 위성 자료를 이용한 단시간 강우예보 모형 등이 주를 이루었고(Ahn et al., 2002; Park et al., 2003a, 2003b), 최근 들어서는 정지위성 자료를 이용한 여름철 대류 시스템의 특성(Baek et al., 2006), 위성에서 산출된 온도정보를 이용한 태풍 예측에 추가적인 정보제공 가능성에 대한 연구(Lee et al., 2015), 그리고 대류운 발생 가능성에 대한 전조탐지(Khandan et al., 2018) 등에 대한 연구들이 꾸준히 보고되고 있으며, GK-2A 자료의 시공간 해상도 증가에 따라 그 활용성 및 활용 방법에 대한 추가적인 연구들(예를 들어 대류운 전조탐지(Lee et al., 2020))이 지속적으로 보고될 것으로 기대된다. 추가적으로 다음에 주어지는 특이 현상들에 대한 연구들도 활발하게 진행되었다.

2.2.1 태풍정보

위성영상을 이용한 태풍 정보 생산 방법이나 기술에 관한 연구도 위성개발 초창기부터 꾸준히 발표되었으나, 최근에는 추가적인 연구활동이 보고되지 않는 분야이기도 하다. 90년대 초 드보락 방법을 GMS (Geostationary Meteorological Satellite) 위성영상에 적용하여 태풍의 중심을 찾기 위한 시도가 이루어진 후(Suh et al., 1992), 국외기술의 국내 적용을 위한 경험적 방법이 다양하게 시도되었다. 수증기 영상을 이용한 태풍 진로 예측, 태풍의 최대풍속 반경을 추정하는 방법(Lee et al., 1996; Ha et al., 1997; Kwon, 2012; Lee and Kwon, 2015.) 등이 보고되었다. 1990년대 중반 자동화된 드보락 방법이 개발되고, 그 기술이 고도화되면서 현업에 이용되는 상황이므로, 주관적 방법에 따른 태풍 정보 생산 및 추가적인 드보락 방법의 개선 등에 대한 연구 결과는 더 이상 보고

되지 않고 있다. 그렇지만, 위성을 이용한 태풍 정보 생산(Ahn et al., 2002) 및 현업 기상업무에서의 활용은 영상기의 시공간 해상도 증가 및 추가적인 고성능 탐측기 개발 추세에 맞춰 지속적으로 증가될 것으로 기대된다.

2.2.2 안개탐지

위성을 이용한 안개탐지 분야는 그 필요성에 의해 지속적으로 보고되는 분야이다. 1994년에 처음으로 보고된 적외영상 자료를 이용한 층운의 분포(Yoo, 1994)를 시작으로 위성을 이용한 안개탐지가 가지는 한계를 극복하기 위한 다양한 연구들이 보고되었다. 그 첫 번째인 안개 상부에 구름이 존재하는 경우의 정확도를 개선하기 위한 노력의 일환으로, 구름 존재 시 안개탐지 정확도를 개선하기 위한 시도들(Yoo et al., 2006; Yoo et al., 2010), 그 다음으로는 일출 또는 일몰 시에 사용할 수 있는 관측채널의 한계에 의해 발생할 수 있는 안개탐지의 불연속성을 개선하기 위한 연구로 정지위성을 이용하여 시간적으로 연속적인 안개탐지(Lee et al., 2011), 적외채널과 마이크로파 채널을 함께 이용한 안개탐지(Park and Kim, 2012), 신경망 모델을 이용한 방법(Shin et al., 2013), 채널이 추가된 방법(Kim et al., 2019) 등 다양한 연구들이 보고되고 있다. 위성관측을 이용한 안개탐지의 중요성을 감안할 경우 그 정확도를 개선하고 활용성을 증가시키기 위한 연구들이 지속적으로 이루어질 것으로 기대된다.

2.2.3 수치모델

2000년대 초반 최신경향인 복사 자료의 직접동화를 위한 1차원 변분법을 이용한 위성 자료의 수치 자료 활용에 대한 연구와 고해상도 해수면온도가 초단기 수치모델 온도예측에 미치는 영향에 관한 연구(Lee and Ahn, 2001)가 보고되면서, 위성 자료의 수치모델 활용에 관한 다양한 연구들은 2005년부터 본격적으로 등장하기 시작하였다. 연구의 대부분은 수치모델의 초기장 개선을 위한 다양한 방법들에 관한 연구로, 변분법을 이용한 지상온도장 보정(김 et al., 2005) 같은 초기연구에서부터 위성에서 산출된 정보를 수치모델에 활용하는 다양한 연구들이 보고되었다. 예를 들어 마이크로파 센서에서 산출된 수분장 및 강우강도(Ha et al., 2007; Kim et al., 2007), 고해상도 광학 센서에서 산출되는 지표면 정보(Lim et al., 2012), 산란계 센서에서 구해지는 해상풍이나 마이크로파 센서에서 구해지는 수증기 정보(Jun et al., 2020), 그리고 세계 최초의 위성기반 능동형 라이다 센서에서 생산되는 바람장 정보(Jo et al., 2018; Lee et al., 2022)를 활용한 분석장 및 예측장 실험 등의 예를 들 수 있다. 센서에서 관측된 복사회도를 직접 동화하기 위한 연

구들도 진행되었는데, 특히 전처리 작업의 일환으로 마이크로파 탐측기의 전처리 및 편향보정에 관한 연구들(Lee et al., 2013; Lee et al., 2014; Jeong et al., 2019), 오차공분산의 개선에 관한 연구(Joo and Lee, 2007), 수천 개 채널중에서 가장 적절한 채널의 선정 등에 관한 연구(Noh et al., 2020) 등이 보고되었다. 마지막으로 위성 자료를 수치모델에 동화함으로써 나타나는 효과들에 대해서 전반적인 평가(Lee et al., 2011; Park et al., 2016), GPS 자료(Kim et al., 2015), 마이크로파 탐측기에 의한 영향(Kim and Kim, 2017; Lee et al., 2018; Kim et al., 2018) 등에 관한 연구가 보고되었다.

앞으로 국내 독자기술로 개발된 KIM 모델의 본격적인 운영과 지속적으로 운영되는 천리안위성 및 야심 차게 준비중인 정지궤도 초분광적외센서의 활용 방안을 준비하려는 점 등을 고려하면 향후 이 분야에서 가장 활발한 연구가 진행될 것으로 기대된다.

2.2.4 온습도

위성탐재 탐측기 TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) 자료를 이용한 온도산출 과정에서 초기값의 중요성에 대한 연구(Ahn and Lee, 1994)와 열대 태평양에서의 총가강수량 산출에 관한 연구(Chung, 1994)가 보고된 이후, 오랫동안 관련 연구가 보고되지 않았다. 이후 MODIS에서 새롭게 생산되는 연직 온습도의 정확도에 대한 평가나 구름이 연직 온습도 산출에 미치는 영향 등에 관한 연구와 GPS 자료의 기상 분야 활용 가능성이 높아지면서 GPS 자료를 이용한 수증기 정보생산에 관한 연구(Ha et al., 2009)가 소개되었으며, 저궤도위성에서 생산된 총가강수량 자료를 효과적으로 활용하기 위한 통계적 방법(Heo et al., 2020)에 대한 소개 등이 간간히 이루어졌으며, 최근에는 드롭존대를 이용하여 GK-2A에서 산출되는 연직 온습도 자료의 수준에 대한 평가(Kim et al., 2020)에 관한 연구가 보고되었다. 다만, 온습도 산출 자료의 활용성 및 가용 관측 자료의 한계성 때문에 다른 산출물 알고리즘에 비해 활발한 연구가 보고되지 않은 측면이 있다.

2.3 기후 및 환경 분야

2.3.1 환경 분야

위성 자료를 이용한 오존홀 파괴과정에서 나타나는 미량기체 분포변화 특성(Choi and Lim, 2010), Odin 위성을 이용하여 오존과 이산화질소 산출을 위한 시도(Moon et al., 2002), 산불탐지 및 이에 의한 배출량 산정(Chung et al., 2001; Junpen et al., 2013), 위성 및 지상기반 에어로졸 원격탐사 자료의 비교(Kim et al., 2014; Tariq et al., 2016), 위성 자료를 이용한 동아시아

아 대기오염 특성분석(Baek et al., 2010) 및 AOD (Aerosol Optical Depth; 에어로졸 광학두께)를 이용한 미세먼지 농도산출에 대한 리뷰 논문(Ranjan, 2021), 위성관측 자료를 이용하여 오존과 에어로졸이 지상에서의 Erythral UV Radiation에 미치는 영향(Lee et al., 2013) 등이 보고되었다. 또한, 탄소중립을 지원하기 위한 위성활용의 중요성이 증가되면서 국내에서도 관련된 연구들이 보고되기 시작하였는데, 위성 및 지상기반 원격탐사 장비에서 산출된 메탄농도와 항공기 관측 자료의 상호비교(Kenea et al., 2019), 위성산출 이산화탄소 기주농도를 이용한 대도시 지역에서의 이산화탄소 농도증가 탐지 가능성에 대한 연구(Park et al., 2021) 등이 보고되었다.

2.3.2 에어로졸

기상 및 기후현상의 이해과정에서 에어로졸에 의한 불확실성은 향후 기후변화를 예측함에 있어 가장 큰 불확실성을 유발하는 요인으로 여전히 존재한다. 대기중 에서 단기간 체류하면서, 급격한 변화과정을 거치는, 전지구적인 에어로졸 정보는 위성에 의존할 수밖에 없다. 그러므로 위성을 이용한 황사 또는 에어로졸 탐지뿐 아니라 AOD와 같은 정량적 정보생산은 지금은 없어서는 안 되는 중요한 도구가 되었다. 우리나라에서 위성을 이용한 에어로졸 정보생산과 관련된 연구가 활발하게 시작된 것은 2003년 봄, 내몽고 지역에서 발생한 강한 황사가 내습하면서 이를 정확하게 예보하지 못한 국민의 불만에 기상청장이 공개적으로 사과하면서 많은 관심을 받기 시작하였다. 이를 반영하듯, 비록 제한된 채널 자료이지만, 위성자료를 이용하여 AOD를 추정하는 연구가 대기지에 최초로 보고되었고(Urm and Sohn, 2005), 그 뒤를 이어 위성관측 자료를 이용하여 정량적인 에어로졸 및 황사정보를 생산하기 위한 연구들이 보고되기 시작하였다(Yoon et al., 2007; Kim et al., 2008). 특히 24시간 연속으로 관측이 가능한 장점을 활용한 적외채널 자료의 황사나 에어로졸 탐지 활용 및 이들 방법의 개선에 대한 연구결과가 꾸준히 보고되고 있다(Park et al., 2012; Jee et al., 2020; Shin et al., 2021).

이와 같은 에어로졸 자체에 관한 연구뿐 아니라 파생되는 분야에 관한 연구도 활발하게 진행되었는데, 에어로졸이 위성관측에 미치는 영향(Ahn et al., 2003; Sohn et al., 2013), 위성관측 자료를 이용한 넓은 지역에서의 에어로졸 변화 특성 분석(Lee et al., 2006), 위성산출 AOD와 지상에서의 PM10 농도가 가지는 시간 및 공간 변동성에 대한 조사, 위성기반의 에어로졸 정보를 이용하여 지상에서의 미세먼지 농도 및 배출량 산출 시도(Ku and Park, 2013; Ranjan et al., 2021), 위성 및 지상기반의 원격탐사 자료를 함께 이

용하여 가치를 높이는 연구(Song et al., 2009; Kim et al., 2014; Tariq et al., 2016), 황사의 분광학적 특성 연구(Lee et al., 2009; Shin et al., 2013) 등이 보고되었으며, 제한된 채널의 한계를 극복하기 위해 추가적인 채널을 활용하기 위한 연구도 진행되었는데, 에어로졸 유형을 좀 더 정확하게 분리하기 위해 가시뿐 아니라 자외선 영역의 자료를 함께 활용하는 연구와 다른 위성들을 융합 활용한 연구(Lee et al., 2007)가 좋은 예이다.

AOD를 비롯한 정량적 정보는 가시채널을 주로 활용하지만, 최근에는 적외채널에서의 신호를 이용하여 제한적이거나 강도정보를 생산하기 위한 연구들도 보고되고 있다. 정지궤도에서의 대기질 관측이 가능해진 GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer)의 성공적인 발사에 따라 위성을 이용한 에어로졸 관련 연구는 지속적으로 발전할 것으로 기대된다.

2.3.3 기후변화

마이크로파 자료를 이용한 전지구 온난화의 증거를 제시하는 연구에서 시작하여(Yoo, 1992a), 대류권과 하부 성층권의 온도변화(Yoo et al., 2001; Yoo et al., 2011; Spencer et al., 2017), 모델과 위성 자료의 비교(Yoo et al., 1999) 및 모델과 위성 자료를 함께 활용하여 온도변화 경향(Yoo et al., 1999), 물순환 변동성 분석(Seo et al., 2012), 계절 및 연변동 기후변동성 분석(Sumi and Nakazawa, 2002), 식생의 시간 변동성 및 인간활동에 의한 식생변화 감시(Suh and Nam, 2003; Han et al., 2015), 등이 보고되었다. 2000년대 이전에는 위성을 이용한 분석들이 시도되었지만, 최근에는 위성 자료 자체를 이용한 기후변화의 감시보다는, 위성 자료를 이용한 기후모델의 객관적 검증 또는 기후모델과 함께 활용하여 좀 더 정밀한 분석작업이 진행되고 있다. 기후모델에서 제시되지 못하거나 정확도가 낮은 요소들(예를 들어 식생지수나 피복분류 등)에 대한 위성 자료 또는 기후모델과의 결합을 통한 분석이 시도되고 있다.

2.3.4 복사량

1992년 위성탑재 센서에서 관측된 적외채널 복사휘도를 이용한 지구방출적외복사량 추정(Oh, 1992)이나 위성 자료를 이용한 해양에서의 열속 산출(Kim et al., 1999; Cho and Oh, 2000) 등이 보고된 이후, 지표도 달 일사량 산출 정확도 평가 및 정확도를 높이기 위해 천리안 위성 등을 포함한 위성 자료를 활용하는 연구(Zo et al., 2016)가 소개되었으며, 최근에는 GK-2A가 가지는 증가된 가시 및 근적외 채널을 이용한 대기상한에서의 광대역 알베도를 산출하기 위한 방법

(Lee et al., 2018), 지표면 형태에 따른 적외상향복사 산출 정확도를 개선하는 방법(Jung et al., 2020) 등에 대해서 간간히 소개되고 있다.

2.4 기타

2.4.1 비교검증

위성 자료의 효율적인 활용을 위해서는 가장 기본이 정확한 자료 생산이며, 독자적인 위성보유와 상관없이 위성 자료 활용을 위한 기반 연구이므로 우리 학술지에서도 활발하게 소개된 분야이기도 하다. 1991년 극궤도 위성 TOVS에서 산출되는 온습도 프로파일을 라디오존데 자료와 비교한 결과(Cho et al., 1991) 이후로, 다양한 위성 자료에 대한 비교분석들이 이루어졌다. 가장 활발한 연구가 보고된 분야는 위성기반 강우강도 자료의 검증이나 활용성에 대해서이다. 예를 들어, 마이크로파 기반의 강우강도 산출 알고리즘에 미치는 배경관측 휘도온도의 영향(Seo, 2009), 다양한 시공간 환경에서의 위성산출 강우강도의 특성분석 및 정확도 평가(Suh et al., 2004; Koo et al., 2009; Lee and Lee, 2018; Masood et al., 2020), 가장 최신의 강우강도 관측용 GPM (Global Precipitation Measurement) 위성 자료가 강수특성 이해에 얼마나 효과적인지에 대한 평가(Mahmud et al., 2017) 등 다양한 연구가 보고되었다. 그 외에도 수동 마이크로파 센서에서 산출된 우리나라 주변 해역에서의 해상풍 정확도 평가(Lee, 1998), GPS 자료를 이용한 가강수량 정확도 평가(Joh et al., 2001), 지면탐사 위성의 특성 및 보정방법(Suh and Suh, 2003), 정지위성에서 유도된 상층 수증기 자료의 검증(Park et al., 2007), 위성에서 산출된 태양복사조도 및 태양광 정보의 특성분석, 증발산량의 검증(Jang et al., 2009; Lee et al., 2020), 오존전량 위성 자료와 지상 자료의 상호비교 및 구름이 오존산출에 미치는 영향분석(Hong et al., 2013; Choi et al., 2015), 위성에서 탐지된 안개화소의 분석(Shin et al., 2013), 마이크로파 자료에서 생산된 연직온도분포를 통해 계산된 대류권계면 고도의 정확도 평가(Cho et al., 2014) 등 다양한 산출물에 대한 특성과 정확도 평가에 대한 연구들이 보고되고 있다. 앞으로도 우리가 보유하고 있는 위성에 대한 연구가 지속적으로 증가될 것으로 기대되며, 이와 더불어 국외 위성과 국내 위성의 상호비교 또한 더욱 활발하게 진행될 것으로 기대된다.

2.4.2 복사검증

독자적인 위성보유에 따른 효과로 새롭게 보고되는 분야로 위성센서의 검정에 관한 연구들로, 천리안위성 가시채널의 복사검정 정확도에 관한 연구(Kim et al., 2014), 가시채널의 상호비교를 위한 이론적 복사량 계산 정확도 향상을 위한 연구(Chun and Sohn,

2014), 그리고 새롭게 발사된 GEMS 편광보정에 관한 연구(Choi et al., 2021) 등이 학술지에 보고되었다.

2.4.3 정책 분야

1998년 천리안위성 프로그램에 적극적으로 참여하기 위한 사전준비 성격의 한국기상위성 보유정책에 대한 연구(Park et al., 1998) 및 위성 자료 처리 및 활용에 관한 조사, 앞으로 발사될 국외 위성 자료를 국내에서 잘 활용하기 위해 준비해야 할 사항들을 공유한 연구, 새로운 정지궤도 기상위성의 이득과 활용성 강화를 위한 방법(Kim and Jang, 2018) 등과 같은 주요정책을 수립하기 위한 방향을 소개한 연구나, 국외 위성프로그램의 정책적 측면을 소개한 연구(Ahn, 2012, 2014) 등이 여기에 포함된다.

3. 기상레이더(Radar: RAdio Detection and Ranging) 분야





본 절에서는 국내 기상레이더 운영 및 연구개발에 대한 내용을 정리하였다. 국내 여건상 기상레이더는 정무기관, 특히 기상청 주도로 운영되었고 대학에서 이들 레이더를 활용하는 형태로 연구가 진행되었다. 먼저, 국내 레이더 운영에 대한 변천사를 살펴보고 이를 활용한 연구에 대하여 요약하였다.

3.1 기상레이더 현업운영 역사

국내 최초의 기상레이더는 관악산에 설치된 S-밴드 전통레이더(Conventional radar)이다. 1969년 11월 29일에 설치되었고 1970년 2월 1일부터 정식관측을 시작하였다(Table 1: 표의 일부 내용은 기상청에서 발간한 대한민국 기상레이더 50년사에서 발췌한 것임). 일본 도시바(Toshiba)에서 제작한 제1세대 아날로그형 전통레이더로 레이더 반사도만을 관측하였으며 서울과 수도권 영역에 위험기상 관측을 위하여 활용되었다. 기상청은 1988년에 관악산 레이더를 제2세대 도플러레이더(C-밴드)로 교체하고 순차적으로 구덕산, 고산, 동해, 오성산에 도플러레이더를 설치함으로써 국내 최초의 디지털 도플러 기상레이더망이 수립되었다. 기존에는 아날로그 예코영상을 스케치하여 예보관에게 전달하였지만, 디지털 레이더의 도입으로 여러 개의 PPI (Plan Position Indicator) 관측을 통하여 강수 분포도, 에코꼭대기(echo top), 도플러속도 등 다양한 컬러 영상이 제공되었다.

2000년에는 C-밴드 백령도 도플러 기상레이더를 도입하면서 서로 다른 제작사의 자료처리를 위하여 UF (Universal Format)을 기상청 레이더 자료 표준 포맷으로 지정하여 활용하였다. 이후 순차적으로 진도, 광덕산, 관악산, 구덕산, 고산, 성산, 오성산, 강릉에 S-

Table 1. Chronological deployment of Korea Meteorological Administration (KMA) operational radars and their characteristics.

| Year | Type | Band Type | Site (installation data) | Others |
|-------------------|-------------------|-----------|---|--|
| 1969 | Conventional | S | Gwanak-san (29 Nov. 69) |  Gwanak-san radar |
| 1988 ~ 1922 | | C | Gwanak-san (Sept. 88), Gudeok-san, Gosan (Dec. 90), Donghae (Jun. 91), Ohsung-san (Feb. 92) |  Gwanak-san radar |
| 2000 ~ 2010 | Doppler | S (8) | Jindo (Aug. 01), Gwangdeok-san (Dec. 03), Gwanak-san, Gudeok-san (Nov. 05), Gosan, Seongsan (Jun. 06), Ohsung-san (May 07), Gangneung (Mar. 10) |  Opening of Weather Radar Center (Apr. 10) Utilization of Multi-agency data (Jun. 10) |
| | | C (2) | Backryumg-do (Jul. 00), Myunbong-san (Jun. 04) | |
| 2014 ~ 2019 | Dual-polarization | S | Backryumg-do (Apr. 14), Testbed (Jul. 14), Myunbong-san, Jindo (Nov. 15), Gudeok-san, Gwanak-san (Nov. 16), Gwangdeok-san, Gosan (Oct. 17), Seongsan, Ohsung-san (Sept. 18) | Designation of cooperative research institute for weather radar (Apr. 12)  Testbed radar |

밴드 레이더, 면봉산에 C-밴드 레이더를 신설 또는 교체하여 두 파장이 혼합된 레이더망을 구성하였다. 이 시기 동안은 자료형식이 통일되었음에도 제작사 및 파장이 상이하여 자료처리 및 운영에 어려움을 겪었다. 또한, 공군은 전투지원을 위하여 기지에 총 9기의 C-밴드 레이더를 자체 운영하였으며, 홍수통제소에서는 홍수예보에 기상레이더 자료를 활용하기 위하여 S-밴드 이중편파레이더망의 구축 계획을 수립하여, 2009년 비슬산을 시작으로 소백산, 서대산, 모후산, 가리산, 예봉산, 감악산에 S-밴드 이중편파레이더를 설치하여 내륙의 강수 관측을 위한 레이더망을 구축하였다.

2009년 8월 케네스 크로포드(Kenneth C. Crawford) 기상선진화 추진단장이 부임하면서 기상청 기상레이더 운영 및 연구는 새로운 국면을 맞이하였다. 12개의 기상선진화 과제 중, 기상레이더 발전을 우선과제로 추진하여 2010년에 기상레이더센터(Weather Radar Center; WRC)를 설립하고 중장기계획을 수립하였다. 기상청, 홍수통제소, 공군 등에서 산발적으로 운영되던 레이더들에 대한 공동기술개발 및 활용을 추진하

였고, 기상레이더의 활용을 극대화할 수 있는 연구를 위하여 경북대학교를 기상레이더 협력연구기관으로 지정하여 현재까지 장기간의 협력연구를 추진해오고 있다. 또한, 상이한 제작사 및 파장대의 문제점을 극복하기 위하여 2014년부터 기상청의 모든 레이더를 동일 제작사 이중편파레이더로 교체하여, 2019년 강릉을 끝으로 S-밴드 이중편파레이더망을 완성하였다. 또한 레이더 하드웨어 개발, 유지보수, 알고리즘 개발 및 시험 등을 목적으로 현업에서 분리된 레이더 테스트베드(2014년 7월)를 용인에 설치하여 레이더 연구의 새로운 전기를 마련하였다.

Figure 1은 현재 레이더를 현업운영하고 있는 3개 정부기관(기상청: 원, 공군: 세모, 홍수통제소: 네모)의 레이더망의 위치와 현재 관측전략으로 시뮬레이션한 최저관측고도(Lowest observable height)와 지점별 관측 가능한 레이더 개수를 나타낸다. 기상청 레이더만을 이용하여 강우를 추정할 경우 레이더가 설치된 해안선 근처에서만 하층 관측이 가능하며 태백산맥 및 소백산맥이 위치한 지역에서는 1.5 km 이하 하층 관측이 어렵다(Fig. 1a). 반면 세 기관의 레이더를 동시

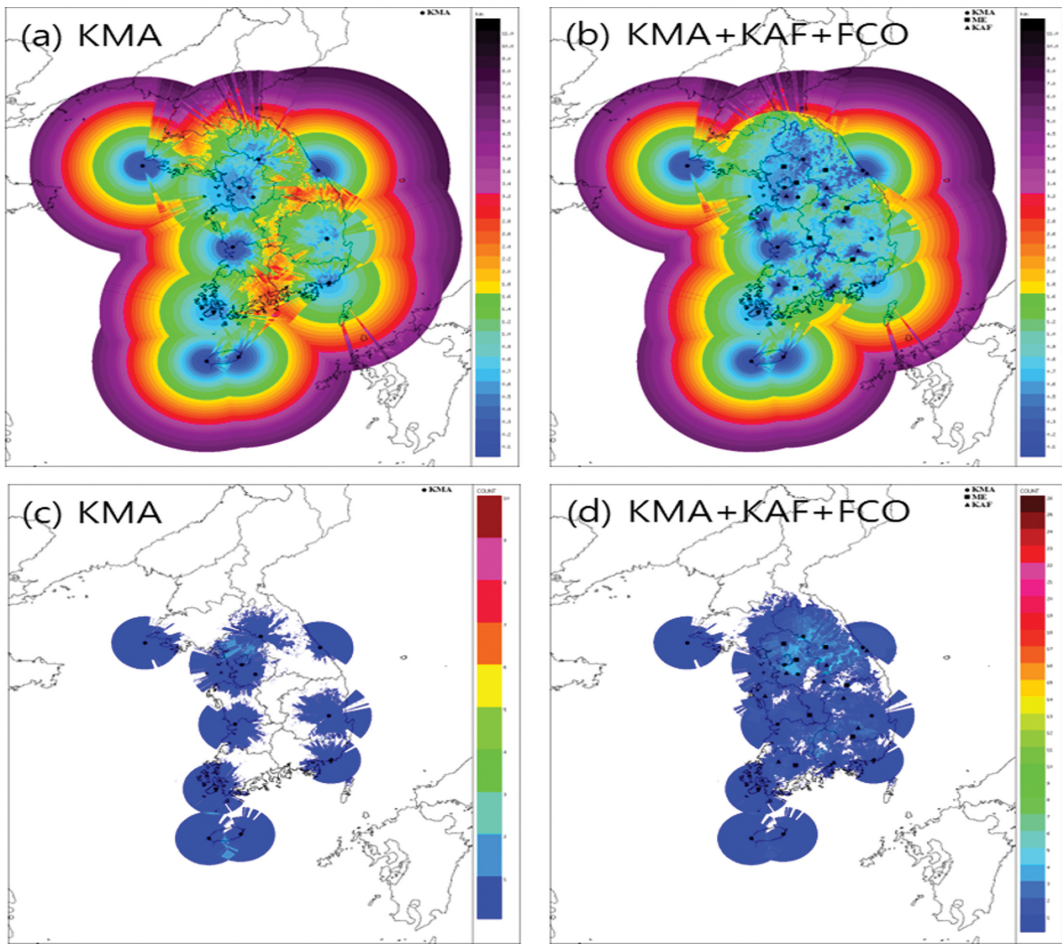


Fig. 1. (a), (b) Simulated lowest observable heights with radar networks of (a) Korea Meteorological Administration (KMA) and three agencies, KMA, KAF (Korea Air Force), and FCO (Flood Control Office). (c), (d) a number of observable radar with networks of KMA and three agencies. The current scanning strategies are used in the simulation.

에 활용할 경우 1 km 이하 관측이 가능한 영역이 전국 내륙으로 확대된다(Fig. 1b). 또한, 다중도플러 바람장 산출을 나타내는 관측 가능한 레이더 개수(Figs. 1c, d)에서도 기상청 레이더만을 이용하면 해안선 인근지역에서 고도 1 km 이하에서 3차원 바람장 산출이 가능하지만 세 기관의 레이더를 모두 활용할 경우 전국에서 3차원 바람장 산출이 가능하다. 현재 기상청에서는 실시간 타기관 자료까지 공동으로 활용하여 3차원 바람장은 물론 다양한 산출물을 생산하여 예보 및 연구에 활용하고 있다.

3.2 기상레이더 활용 연구

1988년 기상청에 디지털 도플러레이더가 도입되고 2000년 자료가 UF로 표준화되면서 기상레이더 자료를 이용한 연구가 가능하게 되었다. 본 절에서는 디

지털 레이더 도입 이후 국내에서 수행한 다양한 레이더 관련 연구를 분야별로 정리 요약하였다.

3.2.1 강수량 추정

강수량 추정은 레이더 응용의 매우 중요한 분야이다. 하지만 국내에서는 상대적으로 기상레이더 강수량 추정에 관한 연구는 비교적 많이 이루어지지 못했고 2010년 레이더센터의 개소와 기상레이더 연구의 활성화를 통해서 현업에 운용 가능한 첨단 알고리즘들이 개발되었다.

Lee et al. (1994)는 레이더에서 산출된 강우강도를 Z-R 관계식을 이용하여 산출하고 이를 위성강수 산출을 위한 기준 튜닝 자료로 활용하였다. 전통레이더의 강우강도 산출에 사용되는 Z-R 관계식은 주로 빗방울 크기분포의 관측을 통하여 이론적으로 계산되었고

국내 입자크기 분포의 관측 및 Z-R 관계식 산출 연구는 Yum et al. (2023)에서 기술하였다. 이외에도 우량계와 레이더 강우량을 비교하여 실시간 레이더 강우강도를 조정하는 기법에 관한 연구가 이루어졌다(Nam et al., 2003; Suk et al., 2005; Jung et al., 2005). 특히 레이더-우량계 강우쌍을 강수유형 또는 영역별로 구분하여 각각의 누적밀도함수를 비교하여 레이더 강우강도를 조정하는 WPMM (Window Probability Matching Method)나 우량계와 레이더 강우강도의 비를 다양한 시, 공간 윈도우 크기로 산출하여 레이더 강우에 적용하는 연구가 주로 있었다. 이러한 연구는 기상청에서 상당 기간 사용한 RAR (Radar-AWS Rainrate)의 개발로 연결되었다. RAR 시스템을 개선하기 위하여 미국 NMQ (National Mosaic and Multi-sensor Quantitative Precipitation Estimation)의 한국버전인 RMQ (Radar-based Multi-sensor Quantitative Precipitation Estimation)을 개발하여 RAR보다 정확도가 뛰어남을 보였다(Lee et al., 2014).

이중편파레이더를 이용한 강우추정은 비교적 2000년대 후반부터 진행되었다(Lee, 2006, 2007; Crisologo et al., 2014; Kwon et al., 2015a, b). S-밴드 이중편파레이더를 이용하여 강우를 추정할 때 단일편파레이더에 비하여 보다 다양한 오차 원인이 존재한다(Lee, 2007). 특히 이중편파변수의 관측 오차는 이중편파레이더 강우추정의 정확도를 저해하며 이를 해소하기 위하여 레이더 펄스 개수를 증가시키거나 시, 공간 평균을 수행할 수 있다(Lee, 2006). 반면, C-밴드 이중편파레이더는 감쇠가 발생하지만 비차등위상차가 증가하여 강우추정에 S-밴드 이중편파레이더 보다 유리할 수 있다(Crisologo et al., 2014). 또한, 단일 및 이중편파레이더가 공존할 경우 강우 자료는 두 자료의 특성을 고려하여 합성하면 정확도를 향상할 수 있다(Lee et al., 2014). 또한, 레이더 주위 구조물에 의해 나타나는 빔의 부분차폐를 자기상관성(Self-consistency)을 이용하여 개선함으로써 강우 개선 효과를 보였다(Lee et al., 2017).

최근에는 이중편파레이더 변수를 이용하여 품질관리를 수행하여 양질의 레이더 자료를 생산하며 지표면에 가까운 레이더 관측값을 활용하여 강수량을 산정하는 HSR (Hybrid Surface Rainfall)을 개발, 현업화하였고(Kwon et al., 2015a, b), 우량계와 레이더 강우를 지구통계기법(조건부 융합, 크리깅, 구형기저함수 융합 등)을 이용하는 연구들이 수행되었다(Yoon et al., 2015; Ryu et al., 2021). 강설시 레이더를 이용하여 강수강도를 산출하기 위하여 무게식 강수량계나 매뉴얼 강수 관측으로 획득된 적설상당수량(Water equivalent of snow cover) 자료를 레이더 자료와 비교하여 관계식을 산출하고자 하였다(Jung et al., 2016).

3.2.2 바람장 산출

1990년대에는 단일 도플러레이더 자료를 이용하여 특정 지점에서 고도에 따른 바람프로파일 산출이 가능한 VAD (Velocity Azimuthal Display)와 VVP (Volume Velocity Processing)기법이 주로 개발되었으며(Kim et al., 1996; Bang et al., 1996), VVP를 변형하여 난류를 산출하는 TVP (Turbulence Velocity Processing)이 개발되어 다양한 강수계에 적용되었다(Lee and Kim, 1999). Kim et al. (1996)은 VAD를 변형하여 바람장과 강수입자의 낙하속도를 추정하였고, Bang et al. (1996)은 용해층에서 대기냉각률을 계산하였다. 또한, 3차원 바람장 산출을 위하여 PPI 자료들을 방위각 영역(e.g., VAP (Velocity Azimuthal Processing))이나 부피영역(Modified Volume Velocity Processing; MVVP)으로 나누어 바람을 산출하는 기법들이 개발되어(Oh and Jhun, 1991; Park et al., 1998) 위험기상에 대한 역학적 구조 연구가 가능하게 되었다.

그러나 이러한 방법들은 여전히 선형바람이나 공간 평활화 가정으로 인하여 바람의 정확도에 한계가 존재하며 이를 극복하는 방법으로 초기장(대부분 수치 모델 자료나 존재 자료)으로 산출된 점선성분 바람을 산출하여 시선속도에 더해주거나 연속보정법(Kim et al., 2004), 이중 또는 다중도플러기법(Nam et al., 2005), 변분론을 사용하여 비용함수를 최소화하는 방식(Lim et al., 2000; Lee et al., 2007; Tsai et al., 2018, 2022, 2023) 등을 개발하였다. 특히 변분론을 이용한 방법은 비용함수별 가중치, 초기치, 최소화 회수 등에 민감하지만 레이더 개수와 관계없이 3차원 바람장을 산출할 수 있어 그 활용도가 매우 높으며 현재 기상청에서 Tsai et al. (2023)의 방법을 적용하여 현업 운영하고 있다.

3.2.3 자료 품질관리

레이더 반사도 품질관리를 위하여 기상청에서는 2000년대 초반까지 미국 기상청 ORPG (Open System Radar Product Generation)를 도입하여 활용하였다. Cho et al. (2006)이 캐나다 McGill 대학의 이중편파레이더 자료에 퍼지품질관리 알고리즘을 적용하였고 이를 국내 단일 및 이중편파레이더에 응용하여 국내 최초의 레이더 품질관리 알고리즘을 현업화하였다(Ye et al., 2015). Park et al. (2014)은 ORPG와 퍼지품질관리 알고리즘을 비교 분석하였고 Han et al. (2011)은 위성 자료를 이용하여 채프를 제거하는 알고리즘을 개발하였다. 이후 이중편파 자료의 품질 저하에서 나타나는 다양한 문제(감쇠, 부분차폐, 빔폭 증가, 민감도 저하 등)를 해소하기 위하여 CLEANER (CLutter Elimination Algorithm for Non-precipitation Echo of Radar data)를 개발하여 현재 현업에 운영 중이다(Oh et al., 2020).

현업용 기상레이더 이외에도 Ka-밴드 구름레이더에 대한 품질관리 알고리즘이 개발되어 구름통계 분석에 활용되었다(Ye et al., 2015).

도플러 시선속도의 접힘풀기를 위한 다양한 알고리즘이 개발되었다. Heo et al. (1999)은 수정 중앙값 필터를 이용한 도플러속도 개선 방안을 제안하였고 Kim et al. (2000)은 국내 최초로 다양한 접힘풀기 알고리즘을 시도하였다. 접힘풀기 알고리즘 적용에 앞서 속도 접힘에 대한 통계분석을 통하여 최적의 알고리즘을 개발하고자 하는 노력도 있었다(Chu et al., 2014).

레이더 반사도의 보정오차는 레이더 강수량 추정에 편차로 작용한다. 기존에는 우량계를 이용한 조정이나 우적계 자료와의 비교를 통한 레이더 반사도 보정이 많이 사용되었으며(Lee and Zawadzki, 2006), 이후 보정된 레이더와 주위 레이더의 반사도 비교를 통하여 레이더망 전체를 보정할 수 있다(Park and Lee, 2010). 그러나 최근에는 레이더 관측번수간의 자기상관성을 이용하여 레이더 반사도를 보정할 수 있는 기법이 개발되어 현업에 활용되고 있다(Lee and Zawadzki, 2006; Kwon et al., 2015b).

3.2.4 위험기상 추적 및 예측

국내에서 레이더를 이용한 실황예보로 관악산 레이더 반사도 자료에 캐나다에서 개발한 SHARP (SHort-term Precipitation Forecasting Procedure)와 레이더 예코 중심이동기법이 시도되었다(Chung et al., 1992). 또한, Lim and Lee (1996)은 5분 관악산 레이더 강수와 지상 자료를 합성하여 형상상관법(Pattern correlation method)으로 이동벡터를 산출하고 이를 850 hPa 바람과 비교하였다. 그러나 이러한 시도는 현업으로 이어지지 못하였고 2010년 캐나다 McGill 대학과의 협력사업을 통해 MAPLE (McGill Algorithm for Precipitation nowcasting by Lagrangian Extrapolation)을 도입하여 현재까지 현업으로 활용하고 있다(Bellon et al., 2010; Lee et al., 2010). 이후 MAPLE의 이동벡터를 향상하기 위하여 버거스방정식을 도입하여 예측의 정확도를 향상하였으며(Ryu et al., 2020) 최근에는 기계학습을 이용한 실황예보기법에 대한 연구가 진행 중이다(Kim and Hong, 2022).

이러한 화소 기반의 레이더 실황예보 이외에도 위험기상을 연직적분 액체수함량(Vertically Integrated Liquid water; VIL)이나 임계 반사치를 이용하여 세포로 구분하여 이를 추적 및 예측하고자 하였다(Seo et al., 2004; Jung et al., 2011). 특히 반사도 임계치를 이용하여 3차원 위험기상 세포를 탐지하고 이를 퍼지기법을 이용하여 추적하는 FAST (Fuzzy logic Algorithm for Storm Tracking)를 현업화함으로써 위험기상의 감시 기능을 강화하였다(Jung and Lee, 2015). 또한, 변

분예코추적을 통한 제주도 여름철 강수의 이동 특성을 조사하였다(Kim et al., 2018).

3.2.5 중규모 기상현상 분석

중규모 기상현상에 대한 분석은 가장 기본 도구인 바람장 산출 알고리즘과 연관되어 있다. 초기에는 바람 연직프로파일을 이용한 분석이 주로 이루어졌는데, 국내 도플러레이더 자료의 부족으로 주로 해외 자료(열대지역, 프랑스, 일본 등)를 이용한 분석이 주를 이룬다. Kim et al. (1995)와 Lee et al. (1998)는 단일 도플러레이더 분석은 통하여 열대적운의 형성 및 강수 발달에 대한 분석을 수행하여 온난우의 생성, 유행층의 발달, 한랭우/온난우의 상호작용의 중요성을 강조하였다. 이후 국내 자료를 이용하여 서해 구름줄(Yu and Kim, 2005), 한랭전선(Heo et al., 2003) 및 동해(일본 북서부) 강설운, 온난형/한랭형 강수(Kim et al., 2019)에 대한 연구가 진행되었다. 특히 Heo et al. (2003)는 이중편파레이더 자료를 이용하여 한랭전선의 역학구조와 지상전선 위에서 큰 입자의 존재 가능성을 밝혔다.

수직측풍기 또한 시간에 따라 바람 연직프로파일을 제공하기 때문에 앞 절에서 기술한 분석과 유사한 연구들이 진행되었다. 특히, 수직측풍기를 이용한 대류권계면 접힘 분석(Jung et al., 2000; Heo and Kim, 2003; Heo and Kim, 2005), 상, 하안풍(onshore and offshore wind)과 연계된 대류경계층의 특성(Suk et al., 2004), 강수유형 분류(Baek et al., 2005) 등에 관한 연구가 있었다.

이중 또는 다중 도플러 바람 산출이 가능해짐에 따라 중규모 현상에 대한 상세 구조 분석연구가 진행되었다. 열대에서 발달하는 구름무리(Tropical cloud cluster) 및 스콜선과 돌풍전선(Lee et al., 1998), 무안에 설치된 연구용레이더를 이용한 다중세포 중규모 대류계의 성장과정(Nam et al., 2005), 한반도 중규모 호우계의 구조(Park and Lee, 2008), 장마전선 상에 발달한 중규모 대류계(Lee et al., 2012), 동해안 호우(Park and Lee, 2020), 태풍 중심 추적(Jung et al., 2020)에 대한 분석을 수행하였다. 특히 Lee et al. (2012)는 장마전선 상에 발달한 중규모 대류계의 경우, 대기하층 수렴에 의해 대류셀이 생성되며, 상승기류는 와도의 뒤틀림 와도항에 의해 발생함을 분석하였다. 특히 2006년 7월 12일 고양에서 발생한 중규모 대류계와 연관된 토네이도에 대한 상세 분석이 진행되었다. Choi et al. (2011)는 높은 상당운위가 나타난 전선영역에서 강한 하층제트에 의해 강수계가 발달함을 밝혔고, Jeong et al. (2016)는 레이더 영상에 나타난 후크에코(hook echo), 원형약한에코역(Bounded Weak Echo Region; BWER), 메조사이클론, 반사도 코어의 하강,

시스템의 이동 등을 잘 기술하였다.

3.2.6 기타

위에서 언급한 분야 이외에도 레이더 자료동화를 통한 관측시스템(Observing System Experiment) 연구(Park et al., 2005), 동해 강설시 레이더 자료동화 효과(Choi et al., 2013), 이중편파레이더 변수를 이용한 수상체 분류(Gu et al., 2005), 구름레이더의 이중과장을 이용한 눈입자크기 분포 및 수함량 추정(Kim et al., 2004, 2005), 밝은때 고도 추정(Cha et al., 2007), 대기경계층 내 확산(Kim et al., 2006), 이중편파레이더 산란 시뮬레이션(Kim et al., 2014), 펄스폭에 따른 민감도(Lee et al., 2019) 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이외에도 하드웨어 국산화를 위한 레이더 신호처리 및 신호처리기 개발, 수직측풍기 개발 및 현업화 등이 이루어지고 있다.

4. 라이더 및 지상원격 분야

4.1 라이더 기반 연직 프로파일 관측

국내에서 지상 기반 라이더(Light Detection and Ranging; LIDAR)를 이용한 에어로졸 및 구름 연직 분포 원격 관측은 봄철 유입되는 황사의 연직 분포 관측 중요성이 부각된 1990년대 후반부터 동아시아 황사 관측망(Asian Dust Network; AD-NET)의 일부로 시작되었다(Murayama et al., 2001; Won et al., 2004; Kim et al., 2007). 국내 독자적인 기술 개발을 통한 라이더 장비 보급의 확대로 국내 관측망이 지속적으로 확대되었으며, 2016년 한미 대기질 캠페인(KORUS-AQ) 기간 동안 고분해능 라이더(High Spectral Resolution Lidar; HSRL)를 이용한 지상 및 항공 관측이 이루어졌다(Crawford et al., 2021). 또한, 라만(Raman) 라이더와 더불어 윈드 도플러 라이더(wind Doppler Lidar)가 연구용으로 제한적으로 활용되어 오고 있다. 2016년 황사 및 미세먼지 현업 예보와 인공위성 관측 자료의 검증 그리고 대기질 모의 결과 검증 및 개선 등의 활용 목적으로 기상청과 학계를 중심으로 구축된 한반도 에어로졸 라이더 관측 네트워크(Korea Aerosol Lidar Observation Network; KALION)에서는 국내 도시 및 배경 대기 지역에서의 에어로졸 소산 계수, 유형, 질량 농도(Kim et al., 2015), 혼합고(Yeo et al., 2016; Park et al., 2022), 그리고 운저 관측 정보가 매 1시간 간격으로 제공되고 있다(www.kalion.kr; Yeo et al., 2016).

라이더 관측을 통한 에어로졸 연직 분포 산출 정확도 관련하여, Yoon et al. (2008)은 제주 고산에서 수행된 동아시아 대기갈색구름 관측 캠페인(ABC-EAREX) 동안 서로 다른 제작사의 라이더 비교 관측을 통해,

라이더 기기에 의한 에어로졸 소산 계수 산출 오차가 약 3%, 소산계수 산출 알고리즘에 의한 오차가 약 11.6% 가량 됨을 밝혔다. 또한, Kim et al. (2008)은 위성 탑재 라이더와 지상 라이더의 연직 프로파일 비교를 통해 에어로졸층 높이, 운저 그리고 운고가 모두 0.1 km 이내에서 잘 일치함을 보였다. 에어로졸 라이더의 편광 관측 자료로부터 비구형 황사 입자를 구별해 낼 수 있는 편광도(depolarization ratio)가 황사 입자의 경우 약 10~30%이며, 구형의 입자는 수% 이하로 보고되었다(Kim et al., 2010; Shin et al., 2013; Shin et al., 2018). 전체 소산 중 후방산란의 비율을 나타내는 라이더 상수(lidar ratio)에 대한 연구들은 최근까지도 계속 발표되고 있다(Kim et al., 2011). 특히, Yoon et al. (2011)은 라만-탄성 라이더 관측을 통해 상층에 떠 있는 황사층(elevated Asian dust layer)의 라이더 상수는 약 25~35 sr, 대기경계층 내의 황사층의 라이더비는 오염입자와의 혼합으로 인해 약간 높은 30~40 sr로 보고하였다. 한편, Kim et al. (2014a)은 지상 및 위성 라이더 관측 프로파일의 기울기 분석을 통해 권운의 운저와 운고를 판별한 후 권운층의 편광도가 약 30~34%, 구름 광학적 두께(cloud optical depth; COD)가 532 nm 파장에서 0.41~0.42임을 밝혔다.

장기간의 에어로졸 라이더 관측 자료 분석을 통해 대류권 중하부에서의 에어로졸 소산 계수가 장거리 수송되는 황사로 인해 봄철에 뚜렷하게 증가함을 다수의 연구들에서 보고 되었으며(Kim et al., 2005; Kim et al., 2007; Kim et al., 2010b; Lee et al., 2013), 라이더의 연직 프로파일과 대기복사전달모델을 이용하여 황사층에서의 대기가열효과가 2~3 K day⁻¹로 크게 나타남이 보고되었다(Kim et al., 2004; Won et al., 2004; Kim et al., 2013). 지난 20여년간 지상에서의 황사 및 미세먼지 농도에 미치는 과정을 이해를 위하여 대기경계층 내에서의 상세 연직 분포뿐만 아니라 자유대기에서 대기경계층으로 유입되는 황사와 미세먼지 입자의 연직 거동 특성에 대한 연구들이 특히 많이 수행되었다(Kim et al., 2007). 예를 들어, Park et al. (2021)은 11년간의 라이더 관측 자료를 활용한 혼합고 분석을 통해 고농도 미세먼지 사례 시 장거리 수송과 국지 발생에 의한 기여가 각각 약 32%와 47% 임을 추정하였다. 최근에는 라이더 및 운고계(ceilometer) 관측 자료로부터의 대기 혼합고 산출 및 이를 활용한 대기질 모델링에서의 혼합고 모의 정확도 개선 연구가 활발히 진행되고 있다(Jo et al., 2022; Park et al., 2022). 2010년대에 들어 윈드 도플러 라이더를 이용한 대기경계층을 포함하는 대류권 하부의 연직 바람 분포 특성(3차원 풍속, 풍향) 관측 연구가 활발히 진행되고 있다(Park et al., 2016; Kim et al., 2022). 이를 통해 대부분의 기상 모델들이 과대 모의하는 지표

부근의 풍속 및 주간의 대류 성장 경계층(convective boundary layer) 모의 결과 검증 및 개선 연구가 활발히 진행되고 있다(Park et al., 2022).

4.2 선포터미터 기반 에어로졸 연직 기주 특성 관측

선포터미터(Sun photometer) 혹은 스카이 라디오미터(sky radiometer)를 이용한 직달 및 산란 일사의 관측으로부터 대기 기주의 에어로졸 광학 특성에 관한 국내 관측 연구는 1990년대 후반부터 AEROSOL RObotic NETwork (AERONET; Kim et al., 2007)과 SKYradiometer network (SKYNET; Kim et al., 2004; Nakajima et al., 2020) 관측망의 일부로 시작되었다. AERONET과 SKYNET에서는 통일된 측기와 보정 절차를 거친 자료를 바탕으로 네트워크의 표준 알고리즘을 적용하여 AOD, 단산란알베도(Single Scattering Albedo; SSA), 에어로졸 위상 함수(phase function), 에어로졸 크기 분포(number size distribution) 등의 정보를 제공하여 오고 있으며, 현재 서울(서울대, 연세대), 부산, 울산, 고산, 백령도, 한국외국어대 등 다수의 지점에서 장기 관측이 이루어지고 있다.

선포터미터 관측을 통한 AOD는 지상에서 관측된 미세먼지 농도와 더불어 고농도 미세먼지나 황사 현상을 설명하는 척도로 많은 연구들에서 보고되어 왔다(Kim et al., 2005; Kim et al., 2010; Kim et al., 2014; Park et al., 2019; Choi et al., 2021a; Shim et al., 2022). 5월부터 장마 시작 이전인 6월까지 연중 가장 높은 AOD가 관측되는 월 변화(Kim et al., 2007) 특성 및 최근 미세한 감소 추세를 보이는 연변화 특성(Nam et al., 2018) 그리고 시공간 변동 특성(Choi et al., 2016b; Choi et al., 2021b)에 대한 다수의 연구가 출판되었다. 선포터미터 기반 AOD 관측 자료는 인공위성 산출물의 검증(Lee et al., 2005; Choi et al., 2019; Go et al., 2020)뿐만 아니라 지표면의 미세먼지 농도 추정(Park et al., 2019; Park et al., 2020), 그리고 대기화학수송모델의 에어로졸 모의 결과 검증과 자료동화기법 적용 등을 통한 모의 과정 개선에도 활발히 사용되었다(Park et al., 2011; Park et al., 2018; Lee et al., 2022).

선포터미터 관측에서 제공되는 에어로졸 크기 분포와 옹스트롬 지수(Angstrom exponent)를 통한 조대입자인 황사와 미세입자인 오염 입자 등 에어로졸 유형 구분 연구 또한 많이 보고되었다(Choi et al., 2016; Lee et al., 2018). AOD, SSA, 그리고 에어로졸 위상 함수 정보를 대기복사전달모델의 입력 자료로 활용하여 에어로졸의 복사 강제력 산정한 연구들은 2000년대 초반부터 국내 연구진에 의해 출판되었다(Kim et al., 2004; Won et al., 2004; Kim et al., 2013). 최근에는 지구 온난화 관점에서 파장별 AOD의 변화 특성에 기

초하여 광흡수 에어로졸인 블랙 카본과 브라운 카본, 그리고 황사의 광흡수 특성을 규명하는 다수의 연구가 출판되고 있다(Chung et al., 2012; Choi et al., 2018).

4.3 분광계 기반 오염기체 전량 농도 관측

분광계(spectrometer)를 활용한 지상 기반의 오염기체 전량 농도 및 연직 분포의 관측은 2000년대 중반 Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS)의 국내 도입으로 시작되었으며, 2010년 중반 이후부터는 Pandora를 활용한 관측이 급격히 확대되고 있다. MAX-DOAS와 Pandora 관측은 이산화질소(NO_2), 오존(O_3), 이산화황(SO_2), 포름알데하이드(HCHO) 등의 기체상 오염물질의 전량 농도를 제공하고 있으며, MAX-DOAS의 경우 이러한 기체상 오염물질 뿐만 아니라 에어로졸의 대류권 하부에서의 연직 농도 분포 산출 결과를 제공하고 있다.

MAX-DOAS 혹은 Pandora의 기체상 오염물질의 전량 농도 관측 결과는 주요 산업단지나 자동차 배출량이 많은 도시지역에서 대기오염 진단(Chong et al., 2018; Choi et al., 2020; Lim et al., 2022)뿐만 아니라, 환경위성 관측 자료의 주요한 검증 자료로 활용되었다(Baek et al., 2017; Kim et al., 2017; Park et al., 2018; Park et al., 2020; Park et al., 2022). 2020년 2월 발사된 환경위성(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer; GEMS)의 검증 관련 많은 연구에서 MAX-DOAS 혹은 Pandora 자료가 활용되고 있으며, Pandora Asia Network (PAN)가 한국 주도하에 구축되고 있어 향후 많은 연구성과들이 기대되고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 원격탐사 분야를 편의로 위성, 기상레이더, 라이다를 포함하는 지상원격관측으로 나누고 각 연구 분야별 1963년 한국기상학회 창립 이후 한국기상학회지, 대기지, APJAS 및 국제 저널에 게재된 연구결과들을 종합적으로 정리하고자 하였다. 이를 통해 드러난 특징적인 모습은 그 발전 수준이 관측장비의 확보수준과 궤를 같이 한다는 것이었다. 최초의 기상레이더 관측소 설치, 정지궤도기상위성의 확보, S밴드 이중편파레이더 관측망 구축 등과 같은 전환기적인 기반구축 작업들이 기상청 주도로 이루어졌다. 이 과정에서 대학에서는 이들 기반구축을 지원하기 위한 기술개발, 생산된 자료를 활용하고 가치를 높이기 위한 핵심 기술들을 개발하는 형태로 연구가 진행되었다. 이를 통해 독자적인 국내기술 확보 및 우리 실정에 맞는 활용기술 개발 등도 가능해진 것으로 판단된다.

원격탐사 연구의 발전이 첨단장비의 전환기적인 기반구축과 밀접한 것은 기상학회 60주년을 맞이한 시

점에서 매우 중요한 남긴다. 향후에도 이와 같은 기상청과의 협력관계는 지속적으로 필요할 것이며, 이 전보다 더 긴밀하고 체계적인 협력관계를 통한 원격 탐사 분야의 발전이 지속될 것으로 기대된다. 나아가, 첨단장비를 국내기술로 개발하거나 도입하여 첨단 연구를 수행하거나 이들 원격탐사 장비들을 시험하고 개선하여 현업화할 수 있는 지속적인 연구가 있어야 할 것이다.

한편, 본 논문에서는 국내 기상학회지에 게재된 논문을 위주로 정리하였다. 그렇지만 높은 수준의 연구 결과들이 국외 우수 학회지에 보고된 사례들도 다수 있으므로, 본 연구조사가 국내 연구진들의 수준이나 현황을 그대로 나타내는 것은 아니라는 점을 밝힌다. 향후 이를 보완할 수 있는 작업이 이루어진다면 의미가 있을 것이다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 또한, 논문의 정리를 위해 도움을 주신 이화여자대학교 염다빈, 김진영에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn, M.-H., 2012: Beginning of the meteorological satellite: the first meteorological satellite TIROS. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 489-497, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.4.489.
- _____, 2014: Competing for the responsibility of the operational meteorological satellite program: after the launch of TIROS in 1960. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 265-281.
- _____, S.-H. Bae, and E.-H. Sohn, 2002: Application of NOAA/AMSU data for the tropical cyclone center fixing. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 147-160.
- _____, B.-J. Hwang, and E.-H. Son, 2001: Derivation of sea surface temperature from GMS-5 for the high resolution numerical weather prediction models. *Korean J. Atmos. Sci.*, **4**, 41-56.
- _____, J.-M. Koo, and C.-Y. Chung, 2003: Effects of the tropospheric dust on the sea surface temperature derivation from the GMS-5 IR data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 653-666.
- Ahn, Y.-I., and D.-K. Lee, 1994: A study of first-guess dependence of temperature retrievals from TOVS radiance data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 35-47.
- 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.
- Baek, K.-H., and J.-H. Kim, 2010: Analysis of characteristics of air pollution over Asia with satellite-derived NO₂ and HCHO using statistical methods. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 367-377.
- Baek, S.-K., C.-H. Cho, J.-H. Kim, and H.-Y. Song, 2005: Analyses of precipitation cases using wind profiler. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 1-16.
- _____, Y.-J. Choi, and C.-Y. Chung, 2006: The characteristics and predictability of convective system based on GOES-9 observations during the summer of 2004 over East Asia. *J. Atmos. Sci.*, **16**, 225-234.
- Bang, Y.-S., D.-I. Lee, K.-E. Kim, K.-D. Min, and Y.-S. Moon, 1996: Analysis of cooling rates and wind fields in the tropical stratiform clouds by a Doppler radar. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 347-361.
- Bellon, A., I. Zawadzki, A. Kilambi, H. C. Lee, Y. H. Lee, and G. Lee, 2010: McGill algorithm for precipitation nowcasting by Lagrangian extrapolation (MAPLE) applied to the South Korean radar network. Part I: Sensitivity studies of the Variational Echo Tracking (VET) technique. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 369-381, doi: 10.1007/s13143-010-1008-x.
- Byun, J.-Y., and G.-H. Lim, 1999: Relations between infrared cloud images and the distribution patterns of precipitation in the Tropics. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **35**, 47-59.
- Cha, J.-W., S.-S. Yum, K.-H. Chang, and S.-N. Oh, 2007: Estimation of the Melting Layer from a Micro Rain Radar (MRR) data at the Cloud Physics Observation System (CPOS) site at Daegwallyeong Weather Station. *J. Korean Met. Soc.*, **43**, 77-85.
- Cho, A.-R., and M.-S. Suh, 2013: Detection of contaminated pixels based on the short-term continuity of NDVI and correction using spatio-temporal continuity. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 511-525, doi: 10.1007/s13143-013-0045-7.
- Cho, E.-H., and J.-H. Oh, 2000: Estimation of heat fluxes from NSCAT data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **36**, 35-42 (in Korean with English Abstract).
- Cho, H.-M., J.-W. Lee, K.-R. Kim, and H.-S. Yoon, 1991: Comparison and Analysis of TOVS Retrieved Outputs by the RAOB. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **27**, 119-134 (in Korean with English Abstract).
- Cho, Y.-J., D.-B. Shin, T.-Y. Kwon, J.-C. Ha, and C.-H. Cho, 2014: Retrieval of thermal tropopause height using temperature profile derived from AMSU-A of Aqua Satellite and its application. *Atmosphere*, **24**,

- 523-532, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.4.523.
- Cho, Y.-H., G. W. Lee, K.-E. Kim, and I. Zawadzki, 2006: Identification and removal of ground echoes and anomalous propagation using the characteristics of radar echoes. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **23**, 1206-1222, doi: 10.1175/JTECH1913.1.
- Choi, H.-L., K.-M. Lee, J.-J. Seo, and J.-Y. Bae, 2021: The influence of atmospheric composition on polarization in the GEMS spectral region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 587-603, doi: 10.1007/s13143-020-00218-x.
- Choi, H.-S., and H.-K. Cho, 1986: Estimation of surface temperature derived from GMS radiance observations over South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **22**, 82-91.
- Choi, H.-Y., J.-H. Ha, D.-K. Lee, and Y.-H. Kuo, 2011: Analysis and simulation of mesoscale convective systems accompanying heavy rainfall: The Goyang case. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 265, doi: 10.1007/s13143-011-0015-x.
- Choi, M., and Coauthors, 2019: Validation, comparison, and integration of GOCI, AHI, MODIS, MISR, and VIIRS aerosol optical depth over East Asia during the 2016 KORUS-AQ campaign. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 4619-4641, doi: 10.5194/amt-12-4619-2019.
- Choi, S., and Coauthors, 2020: Assessment of NO₂ observations during DISCOVER-AQ and KORUS-AQ field campaigns. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 2523-46, doi: 10.5194/amt-13-2523-2020.
- Choi, S.-H., J.-S. Bak, J.-H. Kim, and K.-H. Baek, 2015: Analyses of the OMI cloud retrieval data and evaluation of Its impact on ozone retrieval. *Atmosphere*, **25**, 117-127, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.1.117.
- Choi, W., J.-G. Lee, and Y.-J. Kim, 2013: The impact of data assimilation on WRF simulation using surface data and radar data: case study. *Atmosphere*, **23**, 143-160, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.2.143.
- Choi, W.-K., and K.-S. Lim, 2010: Variation of tracer distribution during the Antarctic polar vortex breakup shown in ILAS and ILAS-II data. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 367-377.
- Choi, Y., and Y. S. Ghim, 2016a: Estimation of columnar concentrations of absorbing and scattering fine mode aerosol components using AERONET data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 628-13,640, doi: 10.1002/2016JD025080.
- _____, and _____, 2021a: Variations in major aerosol components from long-term measurement of columnar aerosol optical properties at a SKYNET site downwind of Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, **245**, 117991, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117991.
- _____, _____, and B. N. Holben, 2016b: Identification of columnar aerosol types under high aerosol optical depth conditions for a single AERONET site in Korea. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 1264-1277, doi: 10.1002/2015JD024115.
- _____, and Coauthors, 2021b: Temporal and spatial variations of aerosol optical properties over the Korean Peninsula during KORUS-AQ. *Atmos. Environ.*, **254**, 118301, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118301.
- Choi, Y.-S., and C.-H. Ho, 2003: Comparative studies of cloud retrieval algorithm between MODIS/Terra and SEVIRI/MSG. *Atmosphere*, **13**, 120-121.
- 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.
- Chu, Z., Y. Yin, and S. Gu, 2014: Characteristics of velocity ambiguity for CINRAD-SA Doppler weather radars. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 221-227, doi: 10.1007/s13143-014-0010-0.
- Chun, H.-W., and B. J. Sohn, 2014: Climatological assessment of desert targets over East Asia - Australian region for the solar channel calibration of geostationary satellites. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 239-246, doi: 10.1007/s13143-014-0012-y.
- Chung, C. E., S.-W. Kim, M. Lee, S.-C. Yoon, and S. Lee, 2012: Carbonaceous aerosol AAE inferred from in-situ aerosol measurements at the Gosan ABC super site, and the implications for brown carbon aerosol. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 6173-6184, doi: 10.5194/acp-12-6173-2012.
- Chung, H.-S., 1994: Total precipitable water derived by satellite observations over the tropical Pacific Ocean. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 177-195.
- Chung, S.-H., I.-S. Kim, and M.-L. Oh, 1992: Qualitative and quantitative approaches on rainfall nowcasting by radar. *J. Korean Met. Soc.*, **28**, 294-314.
- Chung, Y.-S., 2001: Detection of forest fires and smoke plumes by satellites. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **37**, 567-578.
- Crawford, J. H., and Coauthors, 2021: The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field Study. *Elem. Sci. Anth.*, **9**, 1-27, doi: 10.1525/elementa.2020.00163.
- Crisologo, I., G. Vulpiani, C. C. Abon, C. P. C. David, A. Bronstert, and M. Heistermann, 2014: Polarimetric rainfall retrieval from a C-Band weather radar in a tropical environment (The Philippines). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 595-607, doi: 10.1007/s13143-014-

- 0049-y.
- Go, S., and Coauthors, 2020: Ground-based retrievals of aerosol column absorption in the UV spectral region and their implications for GEMS measurements. *Remote Sens. Environ.*, **245**, 111759, doi: 10.1016/j.rse.2020.111759.
- Gu, J.-Y., D.-I. Lee, M. Jang, K.-E. Kim, and H.-H. Lee, 2005: Characteristics of precipitation type using X-band polarimetric radar. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 909-925.
- Ha, E.-H., 2005: Satellite estimates of rain rate using the relationship between the beam-filling error and area-average rain rate. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 149-158.
- Ha, J.-C., D.-E. Chang, and C.-H. Cho, 2007: The assimilation of SSM/I rain rates into a mesoscale model with the latent heat nudging method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 285-298.
- Ha, J.-H., and K.-D. Park, 2009: Estimation of water vapor vertical profiles in the atmosphere using GPS measurements. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 289-296.
- Ha, K.-J., K.-Y. Kim, and M.-H. Yeo, 1997: An estimation of the radius of maximum wind in typhoon using GMS TBB. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **33**, 677-690.
- Han, H.-Y., B.-H. Heo, S.-H. Jung, G.-W. Lee, C.-H. You, and J.-H. Lee, 2011: Elimination of chaff echoes in reflectivity composite from an operational weather radar network using infrared satellite data. *Atmosphere*, **21**, 285-301, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.3.285.
- Han, K.-S., Y.-Y. Park, and J.-M. Yeom, 2015: Detection of change in vegetation in the surrounding desert areas of northwest China and Mongolia with multi-temporal satellite images. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 173-181, doi: 10.1007/s13143-015-0068-3.
- Heo, B.-H., and K.-E. Kim, 2003: Estimation of the tropopause height using the vertical echo peak and aspect sensitivity characteristics of a VHF radar. *Asia-Pac. J. Atmos. Soc.*, **39**, 109-124.
- _____, and _____, 2005: A comparison of methods to estimate the tropopause height using a VHF radar. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 431-448.
- _____, _____, and S.-G. Kang, 1999: Removals of noises from automatic weather station data and radial velocity data of Doppler weather radar using modified median filter. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 127-135.
- _____, Y.-H. Song, J.-Y. Kim, G.-M. Park, A.-S. Seo, and C.-G. Chang, 2003: Case analysis on the cold front structure observed by a dual-polarization radar. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 631-637.
- Heo, J.-H., G.-H. Ryu, E.-H. Sohn, and J.-D. Jang, 2020: Application of cumulative distribution functions to compositing precipitable water with low earth orbit satellite data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 57-75, doi: 10.1007/s13143-019-00113-0.
- Hong, H.-K., J. Kim, H.-L. 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, K.-O., M.-S. Suh, and J.-H. Kang, 2009: Development of a land surface temperature-retrieval algorithm from MTSAT-1R data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 411-421.
- Jang, K.-C., S.-K. Kang, and H.-W. Kim, 2009: Evaluation of shortwave irradiance and evapotranspiration derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 233-246.
- Jee, J.-B., K.-T. Lee, K.-H. Lee, and I.-S. Jo, 2020: Development of GK-2A AMI aerosol detection algorithm in the East-Asia region using Himawari-8 AHI data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 207-223, doi: 10.1007/s13143-019-00156-3.
- Jeong, H.-B., H.-W. Chun, and S.-H. Lee, 2019: A study of iterative QC-BC method for AMSU-A in the KIAPS data assimilation system. *Atmosphere*, **29**, 241-255, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.3.241.
- Jeong, J.-H., Y.-H. Kim, S.-B. Oh, E. Lim, and S.-W. Joo, 2016: Investigation of Goyang Tornado Outbreak Using X-band Polarimetric Radar: 10 June 2014. *Atmos.*, **26**, 47-58.
- Jo, H.-Y., 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.
- Jo, Y.-S., S.-J. Lim, I.-H. Kwon, and H.-J. Han, 2018: Investigation of analysis effects of ASCAT data assimilation within KIAPS-LETKF system. *Atmosphere*, **28**, 263-272, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.3.263.
- Joh, J.-H., P.-H. Park, J.-U. Park, H.-C. Lim, S.-C. Kim, H.-M. Cho, M.-S. Kim, and A.-S. Suh, 2001: Proof of measurement precision for precipitable water using GPS. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **37**, 557-565.
- Joo, S.-W., and D.-K. Lee, 2007: The impact of statistically calculated observation error of ATOVS radiances on a global data assimilation system. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 17-29.
- Jung, E.-S., B.-H. Heo, and K.-E. Kim, 2000: Analysis of

- tropopause folding by VHF radar. *J. Korean Met. Soc.*, **36**, 317-326.
- Jung, H.-S., K.-T. Lee, and I.-S. Zo, 2020: Calculation algorithm of upward longwave radiation based on surface types. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 291-306, doi: 10.1007/s13143-020-00175-5.
- Jung, S.-H., J.-S. Kim, and H.-C. Shin, 2020: Impact of tropical initial water vapor from MT-SAPHIR observations on medium-range forecasts using the KMA operational model Nuri On. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 397-409, doi: 10.1007/s13143-019-00145-6.
- _____, and G. Lee, 2015: Radar-based cell tracking with fuzzy logic approach: radar-based cell tracking with fuzzy logic approach. *Met. Apps.*, **22**, 716-730, doi: 10.1002/met.1509.
- _____, G.-W. Lee, H.-W. Kim, and B.-J. Kuk, 2011: Development of convective cell identification and tracking algorithm using 3-dimensional radar reflectivity fields. *Atmosphere*, **21**, 243-256, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.3.243.
- _____, K.-E. Kim, and K.-J. Ha, 2005: Real-time estimation of improved radar rainfall intensity using rainfall intensity measured by rain gauges. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 751-762.
- Jung, S.-P., T.-Y. Kwon, J.-Y. Park, and B.-C. Cho, 2016: A study on the radar reflectivity-snowfall rate relation for Yeongdong heavy snowfall events. *Atmosphere*, **26**, 509-522, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.461.
- Jung, W.-M., M.-K. Suk, Y. Choi, and K.-H. Kim. 2020: Improvement of a detecting algorithm for geometric center of typhoon using weather radar data. *Atmosphere*, **30**, 347-360, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.4.347.
- Junpen, A., S. Garivait, and S. Bonnet, 2013: Estimating emissions from forest fires in Thailand using MODIS active fire product and country specific data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 389-400, doi: 10.1007/s13143-013-0036-8.
- Kang, J.-H., M.-S. Suh, and C.-H. Kwak, 2009: Classification of land cover over the Korean Peninsula using MODIS data. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 499-511.
- _____, _____, and _____, 2010: Land cover classification over East Asian region using recent MODIS NDVI data (2006~2008). *J. Atmos. Sci.*, **20**, 415-426, (in Korean with English abstract).
- Kenea, S. T., Y.-S. Oh, T.-Y. Goo, J.-S. Rhee, Y.-H. Byun, L. D. Labzovskii, and S. Li, 2019: Comparison of XCH₄ derived from g-b FTS and GOSAT and evaluation using aircraft in-situ observations over TCCON site. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 415-427, doi: 10.1007/s13143-019-00105-0.
- Khandan, R., S. K. Alavipanah, A. P. Biazar, and M. Gharaylou, 2018: Probabilistic convective initiation nowcasting with reduced satellite - NWP predictors over Iran. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 431-443, doi: 10.1007/s13143-018-0009-z.
- Kim, B.-M., S. Cocke, and G.-H. Lim, 2007: Assimilation of TRMM rain rate into global analysis and its impact on the summer mean circulation over tropics. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 397-409.
- Kim, B.-R., S.-H. Ham, D.-Y. Kim, and B.-J. Sohn, 2014: Post-flight radiometric calibration of the Korean geostationary satellite COMS meteorological imager. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 201-210, doi: 10.1007/s13143-014-0008-7.
- Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Takamura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2004: Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **109**, 1-18.
- Kim, D.-R., and T.-Y. Kwon, 2011: Characteristics of satellite brightness temperature and rainfall intensity over the life cycle of convective cells-case study. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 273-284 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.-S., and B.-H. Kwon, 2007: Vertical structure of the coastal atmospheric boundary layer based on Terra/MODIS data. *J. Atmos. Sci.*, **17**, 281-289 (in Korean with English abstract).
- _____, D.-I. Lee, P.-K. Kim, and R. Rinehart, 2006: An experiment of chaff diffusion in clear sky using a WSR-88D radar. *J. Korean Met. Soc.*, **42**, 225-236.
- Kim, E.-H., K.-D. Ahn, H.-C. Lee, J.-C. Ha, and E.-H. Lim, 2015: A study on the effect of ground-based GPS data assimilation into very-short-range prediction model. *Atmosphere*, **25**, 623-637 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.-K., D.-I. Lee, K. Iwanami, M. Maki, and S.-N. Oh, 2005: Evaluation of rainfall estimation feasibility using Ka-band and W-band cloud radars. *Asia-Pac. J. Atmos. Soc.*, **41**, 795-808.
- _____, D.-I. Lee, K. Iwanami, M. Maki, K.-E. Kim, and S.-N. Oh, 2004: Retrieval of ice crystal size and ice water content in Cirrus using dual wavelength cloud radar. *J. Korean Met. Soc.*, **40**, 697-711.
- Kim, H.-L., H.-S. Park, H.-S. Park, and J.-S. Park, 2014: Study on the application of 2D video disdrometer to develop the polarimetric radar data simulator. *Atmosphere*, **24**, 173-188, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.2.

- 173.
- Kim, H.-S., Y.-S. Chung, and J.-T. Kim, 2014: Spatio-temporal variations of optical properties of aerosols in East Asia measured by MODIS and relation to the ground-based mass concentrations observed in central Korea during 2001~2010. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 191-200, doi: 10.1007/s13143-014-0007-8.
- Kim, H.-Y., K.-A. Park, H.-A. Kim, S.-R. Chung, and S.-H. Cheong, 2020: Retrievals of sea surface current vectors from geostationary satellite data (Himawari-8/AHI). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 249-263, doi: 10.1007/s13143-019-00s163-4.
- _____, E.-H. Lee, S.-W. Lee, and Y.-H. Lee, 2018: A study on the assimilation of high-resolution microwave humidity sounder data for convective scale model at KMA. *Atmosphere*, **28**, 163-174, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.2.163 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.-Y., B.-J. Son, and J.-H. Oh, 1997: Water balance of typhoon Robyn (9307) determined from SSM/I Data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **33**, 807-818 (in Korean with English abstract).
- Kim, J., 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**, 3661-76, doi: 10.5194/amt-10-3661-2017.
- Kim, J.-Y., and K.-I. Jang, 2018: Benefits of the next generation geostationary meteorological satellite observation and policy plans for expanding satellite data application: lessons from GOES-16. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 201-209, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.2.201 (in Korean with English abstract).
- 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**, 163-78, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.2.163 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.-E., K.-D. Min, S.-G. Park, D.-I. Lee, K.-M. Lee, I.-H. Yoon, and Y.-S. Moon, 1996: Analysis of fall velocities of precipitation particles and wind fields by a single Doppler radar. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 51-70 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-G. Park, K.-D. Min, K.-M. Lee, and D.-I. Lee, 2000: Dealiasing of Doppler Radial Velocities. *J. Korean Met. Soc.*, **36**, 189-202 (in Korean with English abstract).
- _____, D.-I. Lee, J.-G. Park, and S.-G. Park, 1995: Formation and precipitation development of tropical cumuli observed by single Doppler radar. *J. Korean Met. Soc.*, **31**, 363-372 (in Korean with English abstract).
- Kim, K., H.-W. Lee, S.-H. Jung, G. Lyu, and G. Lee, 2018: Characteristics of summer season precipitation motion over Jeju Island region using variational echo tracking. *Atmosphere*, **28**, 443-455, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.4.443 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-H., and Coauthors, 2015: Estimation of particle mass concentration from lidar measurement. *Atmosphere*, **25**, 169-77, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.1.169 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-W. Kim, S.-C. Yoon, N. Sugimoto, and B.-J. Shon, 2011: Characteristics of the lidar ratio determined from lidar and sky radiometer measurements in Seoul. *Atmosphere*, **21**, 57-67, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.1.057 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-J., and J.-H. Kim, 2017: Feasibility study for detecting the tropopause folding turbulence using COMS geostationary satellite. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 119-131, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.2.119 (in Korean with English abstract).
- _____, M.-L. Ou, and Y.-J. Kim, 2011: Characteristics of sea surface temperature retrieved from MTSAT-1R and in-situ data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 421-427, doi: 10.1007/s13143-011-0027-6.
- _____, Y.-J. Kim, and E.-H. Sohn, 2008: The study on the quantitative dust index using geostationary satellite. *J. Atmos. Sci.*, **18**, 267-277 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-H., M.-S. Suh, and J.-H. Han, 2019: Development of fog detection algorithm during nighttime using Himawari-8/AHI satellite and ground observation data. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 337-350, doi: 10.1007/s13143-018-0093-0.
- Kim, S.-M., and H.-M. Kim, 2017: Adjoint-based observation impact of Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) on the short-range forecast in East Asia. *Atmosphere*, **27**, 93-104, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.1.093 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, A. Jefferson, J.-G. Won, E. G. Dutton, and T. L. Anderson, 2004: Observation of enhanced water vapor in Asian dust layer and its effect on atmospheric radiative heating rates. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, 2-5, doi: 10.1029/2004GL020024.
- _____, _____, A. Jefferson, J. A. Orgen, E. G. Dutton, J.-G. Won, Y.-S. Ghim, B.-I. Lee, and J.-S. Han, 2005: Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution

- episodes in 2001. *Atmos. Res.*, **39**, 39-50, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.09.056.
- _____, _____, 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**, 1634-1651, doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.10.044.
- _____, S. Berthier, J.-C. Raut, P. Chazette, F. Dulac, and S.-C. Yoon, 2008: 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, doi: 10.5194/acp-8-3705-2008.
- _____, I.-J. Choi, and S.-C. Yoon, 2010a: A multi-year analysis of clear-sky aerosol optical properties and direct radiative forcing at Gosan, Korea (2001-2008). *Atmos. Res.*, **95**, 279-87, doi: 10.1016/j.atmosres.2009.10.008.
- _____, S.-C. Yoon, J. Kim, J.-Y. Kang, and N. Sugimoto, 2010b: Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29-31 May 2008: analysis of transport and vertical distribution of dust particles from lidar and surface measurements. *Sci. Total. Environ.*, **408**, 1707-1718, doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.12.018.
- _____, I.-J. Choi, S.-C. Yoon, and Y. Kim, 2013: Sensitivity of aerosol optical parameters on the atmospheric radiative heating rate. *Atmosphere*, **23**, 85-92, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.1.085 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-Y., H.-J. Song, and H.-S. Lee, 2019: Mesoscale features and forecasting guidance of heavy rain types over the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **29**, 463-480, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.463 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.-M., S.-J. Lee, M.-H. Ahn, and S.-R. Chung, 2020: Evaluation of atmospheric profile retrieval algorithm for GK-2A satellite with dropsonde observations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 225-233, doi: 10.1007/s13143-019-00154-5.
- Kim, Y., S.-W. Kim, M.-H. Kim, and S.-C. Yoon, 2014a: Geometric and optical properties of cirrus clouds inferred from three-year ground-based lidar and CALIOP measurements over Seoul, Korea. *Atmos. Res.*, **139**, 27-35, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.12.016.
- _____, _____, _____, _____, and K.-H. Park, 2014b: Aerosol properties and associated regional meteorology during winter pollution event at Gosan climate observatory, Korea. *Atmos. Environ.*, **85**, 9-17, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.11.041.
- Kim, Y.-M., M.-L. Ou, S.-B. Ryoo, Y.-S. Chun, E.-H. Lee, and S.-W. Hong, 2013: Soil moisture retrieved from microwave satellite data and its relationship with the Asian dust (Hwangsa) frequency in East Asia during the period from 2003 to 2010. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 527-534.
- Kim, Y.-S., and G.-M. Hong, 2002: Estimation of marine meteorological elements using the satellite and buoy data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **38**, 253-259.
- _____, J.-D. Jang, and S.-C. Kang, 1999: Evaluation of latent and sensible heat fluxes over the oceans around the Korean Peninsula using satellite data. *Korean J. Atmos. Sci.*, **2**, 29-34.
- _____, O.-R. Park, and C.-H. Cho, 2005: The adjustment of surface temperature through the application of variational technique to satellite brightness temperature. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 115-121 (in Korean with English abstract).
- _____, K.-Y. Nam, O.-R. Park, and C.-H. Cho, 2004: Retrieval of horizontal wind field from Doppler radar radial velocity using a successive correction method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 229-239 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., and S. Hong, 2022: Very short-term prediction of weather radar-based rainfall distribution and intensity over the Korean Peninsula using convolutional long short-term memory network. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 489-506, doi: 10.1007/s13143-022-00269-2.
- Koo, M.-S., S.-Y. Hong, and J. Kim, 2009: An evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) data over South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 265-282.
- Ku, B.-Y., 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.
- Kwon, M.-H., 2012: Estimation and statistical characteristics of the radius of maximum wind of tropical cyclones using COMS IR imagery. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 473-481, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.4.473 (in Korean with English abstract).
- Kwon, S., S.-H. Jung, and G. Lee, 2015a: Inter-comparison of radar rainfall rate using Constant Altitude Plan Position Indicator and hybrid surface rainfall maps. *J. Hydrol.*, **531**, 234-247, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.063.

- _____, S., G. Lee, and G. Kim, 2015b: Rainfall estimation from an operational S-Band Dual-Polarization radar: effect of radar calibration. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **93**, 65-79, doi: 10.2151/JMSJ.2015-005.
- Kwon, Y.-J., S.-M. Ryu, J.-I. Cho, Y.-W. Lee, N.-W. Park, C.-Y. Chung, and S.-W. Hong, 2020: Infrared Soil Moisture Retrieval Algorithm using Temperature-Vegetation Dryness Index and Moderate Resolution Imaging. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 275-289, doi: 10.1007/s13143-020-00174-6.
- _____, H.-Y. Shin, H.-J. Ban, Y.-W. Lee, K.-A. Park, J.-I. Cho, N.-W. Park, and S.-W. Hong, 2017: A scattering-based over-land rainfall retrieval algorithm for South Korea using GCOM-W1/AMSR-2 data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 385-392, doi: 10.1007/s13143-017-0041-4.
- Lee, B.-I., Y.-J. Kim, and C.-Y. Chung, 2007: Development of cloud amount calculation algorithm using MTSAT-IR satellite data. *Atmosphere*, **17**, 125-133 (in Korean with English abstract).
- Lee, C.-K., and K.-E. Kim, 1999: Analysis of atmospheric turbulence characteristics for snowfall event using Doppler radar data. *J. Korean Met. Soc.*, **35**, 156-168 (in Korean with English abstract).
- _____, E.-H. Sohn, and M.-L. Ou, 2009: Infrared spectral signatures of dust by ground-based FT-IR and spaceborne AIRS. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 319-329 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.-H., K.-H. Lee, and J.-E. Kim, 2006: Characteristics of atmospheric aerosol optical thickness over the Northeast Asia using TERRA/MODIS data during the year 2000~2005. *J. Atmos. Sci.*, **16**, 85-96 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.-I., J.-H. Kim, Y.-H. Han, K.-E. Kim, and I.-H. Yoon, 1998: Structure and characteristics of the development and dissipation of tropical cloud clusters using dual-Doppler radars (part II). *J. Korean Met. Soc.*, **34**, 355-364.
- Lee, D.-K., 1986: On the applicability of satellite temperature and moisture profiles for weather analysis in the East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **22**, 8-22 (in Korean with English abstract).
- _____, and S.-W. Ju, 2002, Effective use of satellite data in the numerical weather prediction model using 1-d VAR. *Atmosphere*, **11**, 352-355 (in Korean).
- Lee, D. K., 1998: Sea Surface Winds around Korea Observed by Three Satellite Sensors (SSM/I, ERS and NSCAT). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **34**, 593-601.
- Lee, G., 2007: Sources of errors in precipitation measurements by polarimetric radar: sensitivity of polarimetric parameters to drop deformation. *J. Korean Met. Soc.*, **43**, 41-57.
- _____, and I. Zawadzki, 2006: Radar calibration by gage, disdrometer, and polarimetry: Theoretical limit caused by the variability of drop size distribution and application to fast scanning operational radar data. *J. Hydrol.*, **328**, 83-97.
- Lee, G.-W., K.-E. Kim, K.-D. Min, I.-H. Yoon, and K.-M. Lee, 1998: Development and kinematic properties of tropical stratiform clouds retrieved by single Doppler radar. *J. Korean Met. Soc.*, **34**, 570-585.
- _____, 2006: Sources of errors in rainfall measurements by polarimetric radar: variability of drop size distributions, observational noise, and variation of relationships between R and polarimetric parameters. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **23**, 1005-1028.
- Lee, H.-C., Y.-H. Lee, J.-C. Ha, D.-E. Chang, A. Bellon, I. Zawadzki, and G. Lee, 2010: McGill Algorithm for Precipitation nowcasting by Lagrangian Extrapolation (MAPLE) applied to the South Korean radar network. part II: real-time verification for the summer season. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 383-391, doi: 10.1007/s13143-010-1009-9.
- Lee, H.-H., 1983: A study on the Kármán vortex street among the wake of Jeju Island. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **9**, 7-11.
- _____, Y.-J. Choi, and M.-J. Lee, 1993: A case study on the rain by merged cloud system of GMS. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **29**, 15-25.
- _____, J.-Y. Jeong, and M.-H. Ahn, 2003: Analysis of the Aqua, Terra/MODIS cloud detection. *Atmosphere*, **13**, 348-349.
- Lee, H.-J., J.-E. Kim, and Y. Chun, 2013: Aerosol vertical distribution measured by LIDARs in Baengnyeongdo, Munsan, and Gunsan during 10~11 May 2010. *Atmosphere*, **23**, 519-526, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.4.519.
- _____, and Y.-S. Son, 2016: Spatial variability of AERONET aerosol optical properties and satellite data in South Korea during NASA DRAGON-Asia campaign. *Environ. Sci. Technol.*, **50**, 3954-3964, doi: 10.1021/acs.est.5b04831s.
- Lee, H.-K., and M.-S. Suh, 2019: Objective classification of fog type and analysis of fog characteristics using visibility meter and satellite observation data over South Korea. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 639-658, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.5.639.
- Lee, J.-E., and B.-J. Sohn, 1999: Rainfall estimation over

- the Korean Peninsula from GMS-5 measurements of infrared radiation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **35**, 20-29 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-H. Jung, H.-L. Kim, and S.-K. Lee, 2017: Improved rainfall estimation based on corrected radar reflectivity in partial beam blockage area of S-band dual-polarization radar. *Atmosphere*, **27**, 467-481, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.4.467.
- _____, S.-H. Jung, J.-S. Kim, and K.-I. Jang, 2019: Sensitivity analysis of polarimetric observations by two different pulse lengths of dual-polarization weather radar. *Atmosphere*, **29**, 197-211, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.2.197 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-G., K.-H. Min, H.-C. Park, Y.-K. Kim, C.-Y. Chung, and E.-C. Chang, 2020: Improvement of the Rapid-Development Thunderstorm (RDT) algorithm for use with the GK2A satellite. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 307-319, doi: 10.1007/s13143-020-00182-6.
- Lee, J.-K., J.-H. Kim, H.-S. Park, and M.-K. Suk, 2014: Development of radar-based multi-sensor quantitative precipitation estimation technique. *Atmosphere*, **24**, 433-444, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.3.433 (in Korean with English abstract).
- _____, J.-H. Kim, H.-S. Park, and M.-K. Suk, 2014: Merging radar rainfalls of single and dual-polarization radar to improve the accuracy of quantitative precipitation estimation. *Atmosphere*, **24**, 365-378, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.3.365 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., J. Kim, H. C. Lee, and T. Takemura, 2007, Classification of aerosol type from MODIS and OMI over East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 343-357.
- Lee, J.-R., C.-Y. Chung, and M.-L. Ou, 2011: Fog detection using geostationary satellite data: temporally continuous algorithm. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 113-122, doi: 10.1007/s13143-011-0002-2.
- Lee, J.-S., W.-J. Choi, D.-R. Kim, S.-Y. Kim, C.-K. Song, J.-S. Hong, Y.-D. Hong, and S.-J. Lee, 2013: The effect of ozone and aerosols on the surface erythral UV radiation estimated from OMI measurements. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 271-278, doi: 10.1007/s13143-013-0026-x.
- Lee, J.-W., and E.-H. Lee, 2018: Evaluation of daily precipitation estimate from Integrated MultisatellitE Retrievals for GPM (IMERG) data over South Korea and East Asia. *Atmosphere*, **28**, 273-289, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.3.273 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-W. Lee, S.-O. Han, S.-J. Lee, and D.-E. Jang, 2011: The impact of satellite observations on the UM-4DVar analysis and prediction system at KMA. *Atmosphere*, **21**, 85-93, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.1.085 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.-S., C.-S. Lee, M.-J. Seo, S.-W. Choi, N.-H. Seong, D.-H. Jin, J.-M. Yeom, and K.-S. Han, 2020: Improvements of 6S look-up-table based surface reflectance employing minimum curvature surface method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 235-248, doi: 10.1007/s13143-019-00164-3.
- Lee, M.-S., K.-L. Kim, and A.-S. Suh, 1994: Estimation of precipitation using radar and satellite data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 583-595 (in Korean with English abstract).
- _____, Y.-S. Kim, and B.-H. Kwon, 2003: Evaluation of temperature and moisture profile data from Terra/MODIS. *J. Atmos. Sci.*, **13**, 332-333.
- _____, S.-H. Sohn, and D.-H. Kim, 1996: Forecasting of Typhoon Motion Using Water Vapor Images. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **32**, 485-494 (in Korean with English abstract).
- Lee, S., and Coauthors, 2018: Characteristics of classified aerosol types in South Korea during the MAPS-Seoul campaign. *Aerosol. Air Qual. Res.*, **18**, 2195-2206, doi: 10.4209/aaqr.2017.11.0474.
- _____, M. Kim, S. Y. Kim, D. W. Lee, H. Lee, J. Kim, S. Le, and Y. Liu, 2021: Assessment of long-range transboundary aerosols in Seoul, South Korea from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and ground-based observations. *Environ. Pollut.*, **269**, 115924, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115924.
- Lee, S., S. Park, M. I. Lee, G. Kim, J. Im, and C. K. Song, 2022: Air quality forecasts improved by combining data assimilation and machine learning with satellite AOD. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, 1-10, doi: 10.14191/atmos.2018.28.2.201.
- Lee, S.-H., and Y.-H. Kim, 2020: Characteristics and error analysis of solar resources derived from COMS satellite. *Atmosphere*, **30**, 59-73, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.1.059 (in Korean with English abstract).
- _____, H.-W. Chun, and H.-J. Song, 2018: Impact of SAPHIR data assimilation in the KIAPS global numerical weather prediction system. *Atmosphere*, **28**, 141-151, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.2.141 (in Korean with English abstract).
- _____, J.-H. Kim, J.-H. Kang, and H.-W. Chun, 2013: Development of pre-processing and bias correction modules for AMSU-A satellite data in the KIAPS observation processing system. *Atmosphere*, **23**, 453-

- 470, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.4.453 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-G. Kim, H.-W. Chun, J.-H. Kim, and J.-H. Kang, 2014: Pre-processing and bBias correction for AMSU-A radiance data based on statistical methods. *Atmosphere*, **24**, 491-502, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.4.491 (in Korean with English abstract).
- _____, I.-H. Kwon, and J.-H. Kang, 2022: Data assimilation of Aeolus/ALADIN horizontal line-of-sight wind in the Korean integrated model forecast system. *Atmosphere*, **32**, 27-37, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.1.027 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-H., K.-T. Lee, B.-Y. Kim, I.-S. Zo, H.-S. Jung, and S.-H. Rim, 2018: Retrieval algorithm for broadband albedo at the top of the atmosphere. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 165-178, doi: 10.1007/s13143-018-0001-7.
- Lee, S.-Y., H.-Y. Chun, and Y.-J. Choi, 2012: Establishment of a multiple-Doppler radar wind retrieval system and its application to the analysis of mesoscale convective systems. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 369-390, doi: 10.1007/s13143-012-0035-1.
- Lee, S., Y.-J. Choi, and D.-E. Chang, 2007: Dual doppler wind retrieval using a three-dimensional variational method. *Atmosphere*, **17**, 69-86 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.-H., and M.-H. Ahn, 2001: The impact of high resolution SST on the performance of temperature prediction in a short-range prediction. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **37**, 607-619.
- Lee, Y.-K., and M.-H. Kwon, 2015: An estimation of the of tropical cyclone size using COMS infrared imagery. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 569-573, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.3.569 (in Korean with English abstract).
- _____, J. Li, Z. Li, and T. Schmit, 2015: Atmospheric temporal variations in the pre-landfall environment of Typhoon Nangka. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 431-444, doi: 10.1007/s13143-017-0046-z.
- Lim, E.-H., W.-T. Kwon, and Y.-S. Jung, 2000: Retrieval of three-dimensional wind field from single Doppler radar data and comparison with dual Doppler analysis. *J. Korean Met. Soc.*, **36**, 429-440 (in Korean with English abstract).
- Lim, G.-H., and J.-H. Lee, 1996: The movement of precipitation area defined in the combined field of radar echoes and station precipitation rates. *J. Korean Met. Soc.*, **32**, 495-510.
- Lim, Y.-J., K.-Y. Byun, and J. Kim, 2012: A land data assimilation system using the MODIS-derived land data and its application to numerical weather prediction in East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 83-95.
- Mahmud, M. R., M. Hashim, and M. N. M. Reba, 2017: How effective is the new generation of GPM satellite precipitation in characterizing the rainfall variability over Malaysia? *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 375-384.
- Masood, M., A. S. Shakir, A. H. Azhar, G. Nabi, and H. Rehman, 2020: Assessment of Real Time, Multi-Satellite Precipitation Products under Diverse Climatic and Topographic Conditions. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 577-591, doi: 10.1007/s13143-019-00166-1.
- Moon, S.-Y., K.-J. Ha, M.-C. Moon, J.-G. Jhun, and J.-Y. Moon, 2016: Designing of conceptual models on typhoon and Changma utilizing GK-2A satellite data. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 273-284, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.2.215 (in Korean with English abstract).
- Moon, Y.-S., S.-N. Oh, and H.-S. Chung, 2002: Retrieval and validation of ozone and nitro dioxide using optimal estimation method from OSIRIS instrument of Odin satellite. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 229-241.
- Murayama, T., and Coauthors, 2001: Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia. *J. Geophys. Res.*, **106**, 18345-18359.
- Nakajima, T., and Coauthors, 2020: An overview of and issues with sky radiometer technology and SKY-NET. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 4195-4218, doi: 10.5194/amt-13-4195-2020.
- Nam, J., S.-W. Kim, R. J. Park, J.-S. Park, and S. S. Park, 2018: Changes in Column Aerosol Optical Depth and Ground-Level Particulate Matter Concentration over East Asia. *Air Qual. Atmos. Health.*, **11**, 49-60, doi: 10.1007/s11869-017-0517-5.
- Nam, K.-Y., B.-H. Song, E.-K. Seo, J.-H. Choi, J.-S. Lee, and J.-C. Nam, 2003: A study on Z-R relationship of the summertime convective system occurred around Cheongju. *Asia-Pac. J. Atmos. Soc.*, **39**, 431-440 (in Korean with English abstract).
- _____, Y.-H. Kim, K.-E. Kim, and J.-C. Nam, 2005: Study on the multi-cell storm structure using dual Doppler radars observations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 967-981 (in Korean with English abstract).
- Noh, Y.-C., B.-J. Sohn, and Y.-J. Kim, 2020: The impact of a new set of IASI channels on the unified model global precipitation forecast. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 45-56, doi: 10.1007/s13143-019-00129-6.
- Oh, H.-R., Y.-S. Choi, and C.-H. Ho, 2006: Development of sky cover retrieval algorithm for the Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS) imagery. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **42**, 389-396.

- Oh, M.-R., and J.-G. Jhun, 1991: Estimation of horizontal wind and divergence using single-Doppler radar data. *J. Korean Met. Soc.*, **27**, 55-66 (in Korean with English abstract).
- Oh, S.-N., 1992: Estimation of the earth outgoing long-wave radiation using a infrared radiation transfer model and satellite radiance observation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **28**, 465-478 (in Korean with English abstract).
- Oh, Y.-A., H.-L. Kim, and M.-K. Suk, 2020: Clutter Elimination Algorithm for Non-Precipitation Echo of Radar Data Considering Meteorological and Observational Properties in Polarimetric Measurements. *Remote Sens-Basel.*, **12**, 3790, doi: 10.3390/rs12223790.
- Park, C.-G., and T.-Y. Lee, 2008: Structure of mesoscale heavy precipitation systems originated from the Changma front. *Atmosphere*, **18**, 317-338 (in Korean with English abstract).
- Park, C.-R., S.-J. Jeong, H.-Y. Park, J.-M. Yun, and J. Liu, 2021: Evaluation of the potential use of satellite-derived XCO₂ in detecting CO₂ enhancement in megacities with limited ground observations: a case study in Seoul using orbiting carbon observatory-2. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 289-299, doi: 10.1007/s13143-020-00202-5.
- Park, D.-H., S.-W. Kim, M.-H. Kim, H. Yeo, S. S. Park, T. Nishizawa, A. Shimizu, and C.-H. Kim, 2021: 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.-I., S.-R. Chung, and K.-H. Park, 2021: Development of GK2A convective initiation algorithm for localized torrential rainfall monitoring. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 489-510, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.489 (in Korean with English abstract).
- Park, H.-M., and J.-H. Kim, 2012: Detection of sea fog by combining MTSAT infrared and AMSR microwave measurements around the Korean peninsula. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 163-174, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.163 (in Korean with English abstract).
- Park, H.-S., H.-S. Chung, and H.-H. Lee, 1998: On the policy of Korea meteorological satellite possession. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **34**, 336-345 (in Korean with English abstract).
- _____, K.-L. Kim, and G.-Y. Jeong, 2003a: The operational procedure on estimating typhoon intensity in KMA. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 291-299 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, and B.-S. Kim, 2003b: Determination of typhoon intensity number and its application using the satellite imagery. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 279-289 (in Korean with English abstract).
- Park, J.-H., J.-Y. Ha, and S.-M. Park, 2007: Validation of upper tropospheric humidity inferred from the water vapor channel of geostationary satellites for the summer season in the East Asian Region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 223-237.
- Park, J.-S., 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. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 137-147, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.137 (in Korean with English abstract).
- _____, H.-L. Lee, J. Kim, J. Herman, W.-G. Kim, H.-K. Hong, W. Choi, J.-W. Yang, and D.-W. Kim, 2018: Retrieval accuracy of HCHO vertical column density from ground-based direct-sun measurement and first HCHO column measurement using Pandora. *Remote Sens-Basel.*, **10**, 1-17, doi: 10.3390/rs10020173.
- Park, J.-U., and Coauthors, 2022: 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, K.-A., H.-J. Woo, S.-R. Chung, and S.-H. Cheong, 2020: Development of Sea Surface Temperature Retrieval Algorithms for Geostationary Satellite Data (Himawari-8/AHI). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 187-206, doi: 10.1007/s13143-019-00148-3.
- Park, M.-G., Y.-S. Choi, and S.-W. Son, 2016: The impact of satellite observations on large-scale atmospheric circulation in the reanalysis data: a comparison between JRA-55 and JRA-55C. *Atmosphere*, **26**, 523-540, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.4.523 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- Park, O.-R., Y.-S. Kim, and C.-H. Cho, 2005: The observing system experiments with the Windprofiler and Autosonde at Haenam. *Asia-Pac. J. Atmos. Soc.*, **41**, 57-71 (in Korean with English abstract).
- Park, R. S., C. H. Song, K. M. Han, M. E. Park, S.-S. Lee, S.-B. Kim, and A. Shimizu, 2011: A study on the

- aerosol optical properties over East Asia using a combination of CMAQ-simulated aerosol optical properties and remote-sensing data via a data assimilation technique, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 12275-12296, doi: 10.5194/acp-11-12275-2011.
- Park, S.-G., and G. Lee, 2010: Calibration of radar reflectivity measurements from the KMA operational radar network. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 243-259, doi: 10.1007/s13143-010-1010-3.
- _____, K.-E. Kim, K.-D. Min, Y.-S. Moon, and D.-I. Lee, 1998: Wind field retrieval by Doppler radar on cold frontal system. *J. Korean Met. Soc.*, **34**, 306-318 (in Korean with English abstract).
- Park, S.-H., and Coauthors, 2019: Estimation of ground-level particulate matter concentrations through the synergistic use of satellite observations and process-based models over South Korea. *Atmos. Phys. Chem.*, **19**, 1097-1113, doi: 10.5194/acp-19-1097-2019.
- _____, and Coauthors, 2020: Estimation of spatially continuous daytime particulate matter concentrations under all sky conditions through the synergistic use of satellite-based AOD and numerical models. *Sci. Total Environ.*, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136516.
- Park, S.-J., and Coauthors, 2022: Determination of mixing layer height from co-located lidar, ceilometer and wind doppler lidar measurements: intercomparison and implications for PM_{2.5} simulations. *Atmos. Pollut. Res.*, **13**, 101310, doi: 10.1016/j.apr.2021.101310.
- _____, S.-W. Kim, N.-H. Lin, S. K. Pani, P. J. Sheridan, and E. Andrews, 2019: Variability of aerosol optical properties observed at a polluted marine (Gosan, Korea) and a high-altitude mountain (Lulin, Taiwan) site in the Asian continental outflow. *Aerosol. Air Qual. Res.*, **19**, 1272-1283, doi: 10.4209/aaqr.2018.11.0416.
- Park, S.-K., and J.-G. Lee, 2020: A case study of heavy rainfall by a developed convective system over Gangneung on 6 August 2018. *Atmosphere*, **30**, 125-139, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.2.125.
- Park, S.-R., H.-A. Kim, J.-W. Cha, J.-S. Park, and H.-Y. Han, 2014: Analysis of quality control technique characteristics on single polarization radar data. *Atmosphere*, **24**, 77-87, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.1.077.
- 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.-Basel.*, **12**, 2256, doi: 10.3390/rs12142256.
- _____, T. Takemura, and S.-W. Kim, 2018: Comparison of aerosol optical depth between observation and simulation from MIROC-SPRINTARS: effects of temporal inhomogeneous Sampling. *Atmos. Environ.*, **186**, 56-73, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.05.021.
- Piyush, D. N., J. Satapathy, and J. Srinivasan, 2019: Remote sensing of cloud ice water path from SAPHIR microwave sounder onboard Megha-Tropiques. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 135-144, doi: 10.1007/s13143-018-0084-1.
- 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, S., G. Lyu, Y. Do, and G. Lee, 2020: Improved rainfall nowcasting using Burgers' equation. *J. Hydrol.*, **581**, 124140, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124140.
- Ryu, S., J. J. Song, Y. Kim, S.-H. Jung, Y. Do, and G. Lee, 2021: Spatial interpolation of gauge measured rainfall using compressed sensing. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 331-345, doi: 10.1007/s13143-020-00200-7.
- Seo, E.-K., 2009: The uncertainty of background brightness temperatures in microwave land rainfall algorithm. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 463-472.
- Seo, K.-W., D. E. Waliser, and M. Ishii, 2012: Evidence of the recent decade change in global fresh water discharge and evapotranspiration revealed by reanalysis and satellite observations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 153-158, doi: 10.1007/s13143-012-0015-5.
- Seo, N.-S., K.-E. Kim, J.-H. Bak, D.-Y. Shin, and B.-H. Heo, 2004: Precipitation analysis of summertime convective system using vertically integrated liquid-water content. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 87-99 (in Korean with English abstract).
- Seong, N.-H., D.-S. Jung, J.-S. Kim, and K.-S. Han, 2020: Evaluation of NDVI estimation considering atmospheric and BRDF correction through Himawari-8/AHI. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 265-274, doi: 10.1007/s13143-019-00167-0.
- Shim, K., M.-H. Kim, H.-J. Lee, T. Nishizawa, A. Shimizu, H. Kobayashi, C.-H. Kim, and S.-W. Kim, 2022: Exacerbation of PM_{2.5} concentration due to unpredictable weak Asian dust storm: a case study of an extraordinarily long-lasting spring haze episode in Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, **287**, 119261, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119261.
- Shin, D.-B., Z. Haddad, and R. Ferraro, 2020: Advances in precipitation measurements and sciences. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 613-613, doi: 10.1007/s13143-020-

- 00206-1.
- Shin, D.-G., and J.-H. Kim, 2018: A new application of unsupervised learning to nighttime sea fog detection. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 527-544, doi: 10.1007/s13143-018-0050-y.
- _____, H.-M. Park, and J.-H. Kim, 2013: Analysis of the fog detection algorithm of DCD method with SST and CALIPSO data. *Atmosphere*, **23**, 471-483, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.4.471 (in Korean with English abstract).
- Shin, S.-K., D. Müller, Y.-J. Kim, B. Tatarov, D.-H. Shin, P. Seifert, and Y.-M. Noh, 2013: The retrieval of the Asian dust depolarization ratio in Korea with the correction of the polarization-dependent transmission. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 19-25.
- _____, M. Tesche, K. Kim, M. Kezoudi, B. Tatarov, D. Müller, and Y. Noh, 2018: On the spectral depolarisation and lidar ratio of mineral dust provided in the AERONET version 3 inversion product. *Atmos. Phys. Chem.*, **18**, 12735-12746, doi: 10.5194/acp-18-12735-2018.
- Shin, Y.-R., E.-H. Sohn, K.-H. Park, G.-H. Ryu, S.-B. 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.
- Sohn, B.-J., H.-W. Chun, H.-J. Song, Y.-C. Noh, S.-M. Lee, S.-S. Lee, and Y.-S. Chun, 2013: Physical explanation of the weakened brightness temperature difference signal over the Yellow Sea during a dust event: case study for March 15~16, 2009. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 41-48, doi: 10.1007/s13143-013-0005-2.
- _____, D.-H. Kim, and H.-S. Chung, 1998: Examining total precipitable water from SSM/I and TOVS over the East Asian summer monsoon region. *Korean J. Atmos. Sci.*, **1**, 79-93.
- _____, and Coauthors, 2005: Proposing research and development activities for utilizing the Global Precipitation Measurement (GPM). *Atmosphere*, **15**, 47-57 (in Korean with English abstract).
- Son, J.-H., and K.-H. Seo, 2010: Rainfall characteristics of the Madden-Julian Oscillation from TRMM precipitation radar: convective and stratiform rain. *Atmosphere*, **20**, 333-341.
- Song, C.-K., C.-H. Ho, and R.-J. Park, 2009: Spatial and seasonal variations of surface PM10 concentration and MODIS aerosol optical depth over China. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 33-43.
- Spencer, R. W., J. R. Christy, and W. D. Braswell, 2017: UAH version 6 global satellite temperature products: methodology and results. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 121-130, doi: 10.1007/s13143-017-0010-y.
- Suh, A.-S., K.-L. Kim, and C.-K. Lee, 1992: The location of the center of typhoon from the satellite cloud images. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **28**, 333-346 (in Korean with English abstract).
- Suh, M.-S., and J.-C. Nam, 2003: Temporal variations of vegetation in PAL data (1982~2000) over East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 139-150 (in Korean with English abstract).
- _____, and A.-S. Suh, 2003: Characteristics of Meteorological Satellite Data (PAL) over East Asia and 3-D method of noise detection and correction. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 125-138 (in Korean with English abstract).
- _____, J.-R. Lee, and C.-H. Kwak, 2004: Evaluation of NOAA/NESDIS auto-estimator for heavy rainfall events over Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 685-696.
- Suk, M.-K., K.-E. Kim, C. Bernard, B.-H. Heo, and J.-H. Bak, 2004: Analysis of the characteristics on onshore and offshore winds and estimation of the height of convective boundary layer by UHF radar observations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 395-408 (in Korean with English abstract).
- _____, K.-Y. Nam, Y.-H. Kim, and S.-N. Oh, 2005: Estimation of quantitative rain intensity from radar reflectivities using a Window Probability Matching Method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 123-138 (in Korean with English abstract).
- Sumi, A., and T. Nakazawa, 2002: Satellite monitoring for the season-to-interannual climate fluctuations. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 13-28.
- Tariq, S., uH. 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.
- Tsai, C.-L., K. Kim, Y.-C. Liou, and G. Lee, 2023: High resolution 3D winds derived from a newly developed WISSDOM synthesis scheme using multiple Doppler lidars and observations. *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 845-869, doi: 10.5194/amt-16-845-2023.
- _____, _____, Y.-C. Liou, G. Lee, and C.-K. Yu, 2018: Impacts of topography on airflow and precipitation in the Pyeongchang area seen from multiple-Doppler radar observations. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3401-3424, doi: 10.1175/MWR-D-17-0394.1.

- _____, _____, _____, J.-H. Kim, Y. Lee, and G. Lee, 2022: Orographic-induced strong wind associated with a low-pressure system under clear-air condition during ICE-POP 2018. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD036418, doi: 10.1029/2021JD036418.
- Urm, Y.-D., and B.-J. Sohn, 2005: Estimation of aerosol optical thickness over East Asia using GMS-5 visible channel measurements. *Atmosphere*, **15**, 203-211 (in Korean with English abstract).
- Won, J.-G., S.-C. Yoon, S.-W. Kim, A. Jefferson, E. G. Dutton, and B. N. Holben, 2004: Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with sun/sky radiometer and lidar measurements at Gosan, Korea. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **82**, 115-130.
- Ye, B.-Y., G.-W. Lee, S. H. Kwon, H.-W. Lee, J.-C. Ha, and Y.-H. Kim, 2015: Preliminary analysis of data quality and cloud statistics from Ka-band cloud radar. *Atmosphere*, **25**, 19-30, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.1.019 (in Korean with English abstract).
- _____, G. Lee, and H.-M. Park, 2015: Identification and removal of non-meteorological echoes in dual-polarization radar data based on a fuzzy logic algorithm. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**, 1217-1230, doi: 10.1007/s00376-015-4092-0.
- Yeh, N.-C., Y.-C. Chuang, H.-S. Peng, and K.-L. Hsu, 2020: Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based observation: Mei-Yu front case studies in Taiwan. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 485-492, doi: 10.1007/s13143-019-00152-7.
- Yeo, H., and Coauthors, 2016: The KALION automated aerosol type classification and mass concentration calculation algorithm. *Korean. J. Remote Sens.*, **32**, 119-131, doi: 10.7780/kjrs.2016.32.2.5 (in Korean with English abstract).
- Yeom, J.-M., and K.-S. Han, 2009: An efficiency analysis for data synthesis of sun- and geo-synchronous satellites in kernel-driven BRDF model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 499-511.
- _____, _____, and J.-J. Kim, 2012: Evaluation on penetration rate of cloud for incoming solar radiation using geostationary satellite data. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 115-123, doi: 10.1007/s13143-012-0011-9.
- Yoon, S.-C., S.-W. Kim, and M.-H. Kim, 2008: Ground-based Mie-scattering lidar measurements of aerosol extinction profiles during ABC-EAREX 2005: comparisons of instruments and inversion algorithms. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **86**, 377-396, doi: 10.2151/jmsj.86.377.
- _____, Y.-J. Lee, S.-W. Kim, M.-H. Kim, and N. Sugimoto, 2011: Measurements of the lidar ratio for Asian dust and pollution aerosols with a combined Raman and back-scatter lidar. *Atmosphere*, **20**, 483-494.
- Yoon, S.-S., B.-J. Lee, and Y.-J. Choi, 2015: Quantitative precipitation estimation using high density rain gauge network in Seoul area. *Atmosphere*, **25**, 283-294, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.2.283.
- Yoo, J.-M., 1992a: Global warming from satellite microwave measurements. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **28**, 29-39.
- _____, 1992b: Rainfall derived from outgoing longwave radiation in the tropical Atlantic, and the effect of rainfall on oceanic mixed layer. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **28**, 257-268.
- _____, 1992c: Remote Sensing of Cirrus Clouds over Tropical Oceans. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **28**, 61-70.
- _____, 1993: Remote sensing of cirrus clouds in the Polar Oceans. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **29**, 85-98.
- _____, 1994: Stratus clouds derived from satellite infrared measurements. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 443-455.
- _____, 1996: Atmospheric motion derived from satellite data in the tropical oceans: vertical velocity associated with hydrometeors. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **32**, 373-387.
- _____, J.-Y. Han, and K.-E. Kim, 2003: Rainfall algorithm derived from satellite MSU observations over the tropical Pacific Ocean. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 13-28 (in Korean with English abstract).
- _____, M.-J. Jeong, and M.-Y. Yun, 2006: Optical properties of fog from satellite observation (MODIS) and numerical simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **42**, 291-305.
- _____, _____, and D.-B. Shin, 2010: Improved fog detection from satellite in the presence of clouds. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 29-40, doi: 10.1007/s13143-010-0004-5.
- _____, J.-H. Kim, J.-H. Lee, H. K. Cho, B.-J. Son, and M.-H. Ahn, 2007: Retrieval of aerosol optical depth over East Asia from a geostationary satellite. MTSAT-1R. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 49-58.
- _____, K.-M. Kim, J.-O. Jung, and Ch.-H. Ho, 1998: Empirical orthogonal analysis of microwave brightness temperature at 53.74GHz over the oceans and sea surface temperature. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **34**, 238-257 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, S.-H. Moon, and K.-E. Kim, 2001: MSU low tropospheric temperature, and its correlation with

- atmospheric upper and lower layer temperatures. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **37**, 417-432 (in Korean with English abstract).
- _____, H.-R. Lee, M.-K. Jung, and K.-E. Kim, 1999: Thermal trends of troposphere and lower stratosphere derived from the observed and model temperatures near the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **35**, 599-612 (in Korean with English abstract).
- _____, J.-Y. Lee, and K.-E. Kim, 1998: The scattering effect of hydrometeors on microwave: comparison of satellite brightness temperature with radar rainfall. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **34**, 509-522 (in Korean with English abstract).
- _____, E.-J. Park, K.-M. Kim, and C.-H. Ho, 1999: Comparisons of satellite data with model reanalyses on the midtropospheric thermal state. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **35**, 549-564 (in Korean with English abstract).
- _____, Y.-I. Won, S.-J. Ban, Y.-J. Cho, M.-J. Jeong, D.-B. Shin, S.-J. Lee, Y.-R. Lee, S.-M. Oh, and S.-J. Ban, 2011: Temperature trends in the skin/surface, mid-troposphere and low stratosphere near Korea from satellite and ground measurements. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 439-455.
- Yoo, C.-S., and J.-S. Yoon, 2012: The error structure of the CAPPI and the correction of the range dependent error due to the earth curvature. *Atmosphere*, **22**, 309-319, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.3.309 (in Korean with English abstract).
- You, C.-H., D.-I. Lee, and B.-G. Lee, 2000: Kinematic characteristics of snow clouds in winter monsoon by radar echo types classification. *J. Korean Met. Soc.*, **36**, 655-666 (in Korean with English abstract).
- _____, D.-I. Lee, S.-M. Jang, M. Jang, H. Uyeda, T. Shinoda, and F. Kobayashi, 2010: Characteristics of rainfall systems accompanied with Changma front at Chujado in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 41-51, doi: 10.1007/s13143-010-0005-1.
- Yu, D.-B., and K.-E. Kim, 2005: Analysis of kinematic characteristics of snow clouds and development of cloud street by Doppler radar observation. *J. Korean Met. Soc.*, **41**, 877-896 (In Korean with English abstract).
- Yum, S. S., K.-T. Lee, J.-J. Baik, G. Lee, S.-W. Kim, and J. Um, 2023: Historical development of research and publications in atmospheric physics field. *J. Korean Met. Soc.*, **33**, 105-124, doi: 10.14191/Atmos.2023.33.2.105.
- Zo, I.-S., J.-B. Jee, K.-T. Lee, and B.-Y. Kim, 2016: Analysis of solar radiation on the surface estimated from GWNU solar radiation model with temporal resolution of satellite cloud fraction, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 405-412, doi: 10.1007/s13143-016-0024-x.