

## 대기물리 분야 연구논문 발전 현황

염성수<sup>1)\*</sup> · 이규태<sup>2)</sup> · 백종진<sup>3)</sup> · 이규원<sup>4)</sup> · 김상우<sup>3)</sup> · 엄준식<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과, <sup>3)</sup>서울대학교 지구환경과학부,  
<sup>4)</sup>경북대학교 대기과학과, <sup>5)</sup>부산대학교 대기환경과학과

(접수일: 2022년 10월 11일, 수정일: 2022년 11월 19일, 게재확정일: 2022년 12월 11일)

## Historical Development of Research and Publications in Atmospheric Physics Field

Seong Soo Yum<sup>1)\*</sup>, Kyu-Tae Lee<sup>2)</sup>, Jong-Jin Baik<sup>3)</sup>, Gyuwon Lee<sup>4)</sup>, Sang-Woo Kim<sup>3)</sup>, and Junshik Um<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University,  
Gangneung, Korea

<sup>3)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>4)</sup>Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>5)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea

(Manuscript received 11 October 2022; revised 19 November 2022; accepted 11 December 2022)

**Abstract** Research papers published in the Korean Meteorological Society (KMS) journals by the members of KMS since the establishment of KMS in 1963 in the field of atmospheric physics are summarized. A significant number of research papers published in other international journals are also cited in this paper to highlight the achievement of the KMS members in international academic community. The aim is to illustrate the historical development of research activities of the KMS members in the field of atmospheric physics, and indeed it is found that the KMS members have made enormous progress in research publications quantitatively and qualitatively in the field of atmospheric physics. In detail, however, observational studies of aerosol physical properties and cloud and precipitation physics were very active, and studies on cloud physics parameterization for cloud modeling were highly recognized in the world, but observational and theoretical studies of atmospheric radiation were relatively lacking and solicit more contribution from the KMS members.

**Key words:** Atmospheric physics, publications, KMS journals, international journals

### 1. 서론

1963년 한국기상학회가 발족된 이후 지난 60년간 학회 회원들의 대기물리 분야 학술 연구는 대단한 발전을 이루어왔다. 대기물리 분야는 매우 포괄적이지

만 주로 대기복사와 구름물리 분야로 구분할 수 있을 것이다. 본 문헌 검토 논문에서는 세부 분야 별로 학회 회원들이 발표한 논문의 양을 고려하여 편의상 대기복사, 대기 에어로졸, 구름물리 관측 및 실험, 구름 모델링, 강수물리로 나누고, 각 분야에서 한국기상학회 학술지에 발표한 논문을 위주로 어떠한 학술적인 발전을 이루어 왔는지 역사적으로 요약하였으며, 한국기상학회 회원들이 다른 국제학술지에 발표한 논문들 중 학술적 가치가 뛰어난 것들도 언급함으로써 학회 회원들의 국제적인 위상을 기술하는 노력도 기술

\*Corresponding Author: Seong Soo Yum, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea  
Phone: [REDACTED], Fax: +82-2-365-5163  
E-mail: ssyum@yonsei.ac.kr

였다. 대기물리 분야의 큰 축을 이루는 위성, 레이더, 라이다 원격탐사 관련 논문은 “원격탐사 특별호”에서 다루기로 하였음을 알려 둔다.

## 2. 대기복사

대기복사는 지구대기 중에서 현열 및 잠열과 함께 에너지 균형을 이루고 있고 기후변화 분석의 중요한 요소로 작용하고 있으며 복사요소들은 지표면과 인공 위성 관측자료 및 복사모델 계산 값으로 분석되고 있다. 특히 스위스에 위치한 세계복사센터(WRC, World Radiation Center)에서는 1988년 10월 세계복사관측망(BSRN, Baseline Surface Radiation Network)을 설립하여 양질의 복사관측자료를 생산해오고 있고 이들 지표면 관측자료는 우리나라를 비롯하여 미국과 유럽 등의 인공위성 관측자료 및 이론적인 복사모델 결과와 직접 비교 분석되고 있다. 우리나라의 경우 기상청이 1969년 수원과 전주 2개 관측소에서 최초로 복사관측을 수행한 이후 현재는 40여개의 관측소로 늘어났고 2010년부터는 정지궤도위성인 천리안 위성에 의하여 복사 자료가 생산되고 있으며 이들 자료는 기상청 국가기후데이터센터와 국가기상위성센터에 요청하여 받을 수 있다. 이들 지표면과 인공위성으로부터 생산된 복사관측 자료는 이론과 조합되어 기상/기후뿐만 아니라 다양한 분야에서 활용되고 있으며 이에 대한 국내의 연구 결과들은 다음과 같이 정리된다.

### 2.1 복사관측

복사관측의 핵심 장비는 직달일사계(pyrheliometer), 전천일사계(pyranometer), 자외복사기(UV-meter) 등이고 이들 장비의 관측법은 WRC와 BSRN에서 엄격하게 규정하고 있다. 즉 복사관측 장비의 센서는 주변 환경에 매우 민감하여 정확하게 측정하는 것이 쉽지 않기 때문에 복사계의 기준 값은 WRC에서 5년마다 전 세계 각국에서 제작된 우수한 17종의 절대복사계(Absolute Cavity Radiometer) 평균값으로 결정된다.

동아시아에서는 일본이 오래 전부터 국제적 수준의 BSRN 관측소 여섯 곳을 운영하고 있으며 대만은 2~3년 전부터 두 곳을 운영하고 있으나 우리나라는 한 곳도 없는 실정이다. 즉 우리나라는 기상청의 40여개 관측소를 포함하여 농촌진흥청과 태양광 관측소 등 약 200곳 이상의 관측소에서 복사관측을 수행하고 있으나, 국제적으로 인정받지 못하고 있기 때문에, 우리나라 관측소에서 생산되는 복사관측 자료들의 신뢰성 문제가 발생할 수밖에 없어 이들 자료를 이용한 연구 결과도 많지 않은 편이다. 그럼에도 불구하고 조희구 박사는 다수의 복사관측 관련 논문들을 국내외에 발표하여 이 분야 발전에 귀감이 되고 있다(Cho, 1968;

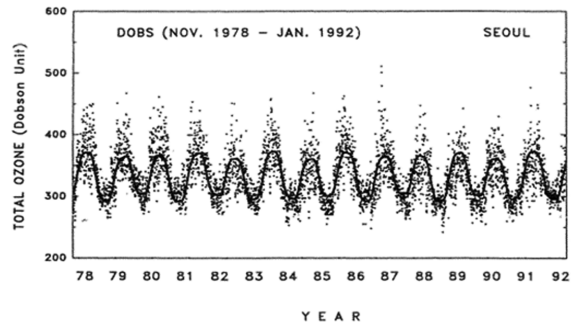


Fig. 1. Annual Variation of Total Ozone in the Stratosphere. From Cho et al. (1989).

Oh and Cho, 1975; Cho et al., 1989; Cho et al., 1998; Cho et al., 2001).

우리나라의 경우 기상청(1948~1981: 중앙관상대, 1981~1990: 중앙기상대)의 전천일사 관측 자료(강릉, 인천, 수원, 목포)를 이용하여 한국의 복사평형을 설명한 논문(Cho, 1968)이 복사관측 관련 국내 최초의 논문이라 할 수 있다. 우리나라 복사관측 분야 연구가 걸음마를 하고 있을 당시 Oh and Cho (1975)가 태양광 측정기(Sun photometer) 관측 자료를 이용하여 서울 지역의 대기 혼탁도를 분석한 논문을 게재하였고, 이후 대기 혼탁도 관련 내용이 한국기상학회지에 빈번하게 실렸다(Yoo and Cho, 1979; Lee and Cho, 1980; Cho, 1981). Cho et al. (1989)은 복사관측의 응용분야라 할 수 있는 돕슨분광광도계(Dobson Ozone Spectrometer) 관측자료를 분석하여 성층권 오존 전량 변화를 발표하였으며(Fig. 1), 국내와 남극 세종기지의 자외선 관측자료 분석 연구도 Cho et al. (1998)과 Cho et al. (2001)에 의하여 시작되었다.

2000년 이후 강릉원주대학교 복사위성연구소는 복사요소별 관측장비들을 BSRN 수준급으로 유지 관리하면서 복사관측 정확성 향상에 기여하였다. 예를 들어, Zo et al. (2016a)은 절대복사계를 이용하여 관측 장비를 국제적 수준으로 유지하는 방법을 소개하였고, Zo et al. (2017)은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 미국 항공우주연구소(NASA, National Aeronautics and Space Administration)와 마찬가지로 특수센서를 설치한 전천일사계를 이용하여 전천일사계 관측자료의 온도 보정 방법을 확립하였으며 Jee et al. (2019)은 BSRN 수준의 정확한 전천일사계 비교관측 방법을 정리하였다.

국내 연구자들에 의한 복사관측 분석 논문으로서 Choi et al. (2006)은 남극 세종기지의 복사관측 자료를 분석하였고 Hong and Choi (2006)는 기상청의 흥반 자외선 관측자료, Kim and Choi (2017)는 제주도 고산지역의 자외선 복사관측자료, Lee et al. (2018)은

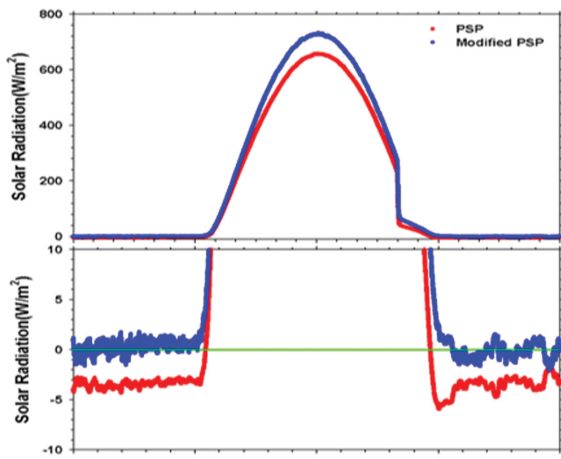


Fig. 2. Solar irradiance before (red) and after (blue) correction of Eppley Pyranometer. From Zo et al. (2017).

Weather Information Service Engine (WISE) 자료를 분석하였다. 이 이외에도 일부 복사관측 자료를 분석한 연구결과들이 발표되었으나, 사용된 복사관측 자료의 검토정에 대한 언급이 없기 때문에 국제적 신뢰성에 대한 의문이 제기될 수 있어, 관련 연구자 및 관계자 모두 조속한 대응이 요구된다.

2.2 복사이론

복사이론 분야는 기후규모 모델, 중규모 모델 개발 및 활용 연구들이 주류이지만 최근에는 태양광 발전 예측이 전 세계 중요한 이슈가 되면서 복사 모수화와

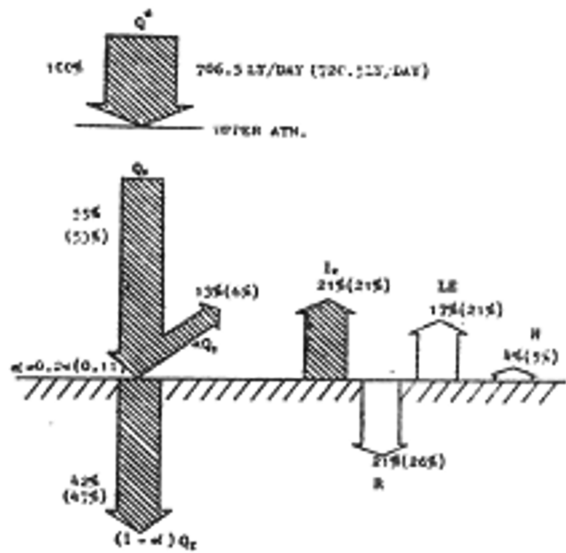


Fig. 3. Heat budget of the Korean Peninsula (number in parentheses is the global average). From Cho (1975).

기계학습에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 실정이다. 우리나라의 경우 Cho (1975)가 가장 먼저 복사관측 및 이론에 근거한 에너지 수지 연구 결과를 발표하였다(Fig. 3). 또한 Cho et al. (1988)는 지표면에서의 직달일사량 추정을 위한 이론적 모델에 관한 연구를 소개하였고, Cho et al. (1998)은 가시광선과 적외선 파장영역에서 적운 속의 물방울을 가정하여 Mie 산란에 따른 단일산란알베도와 비대칭인자 및 광

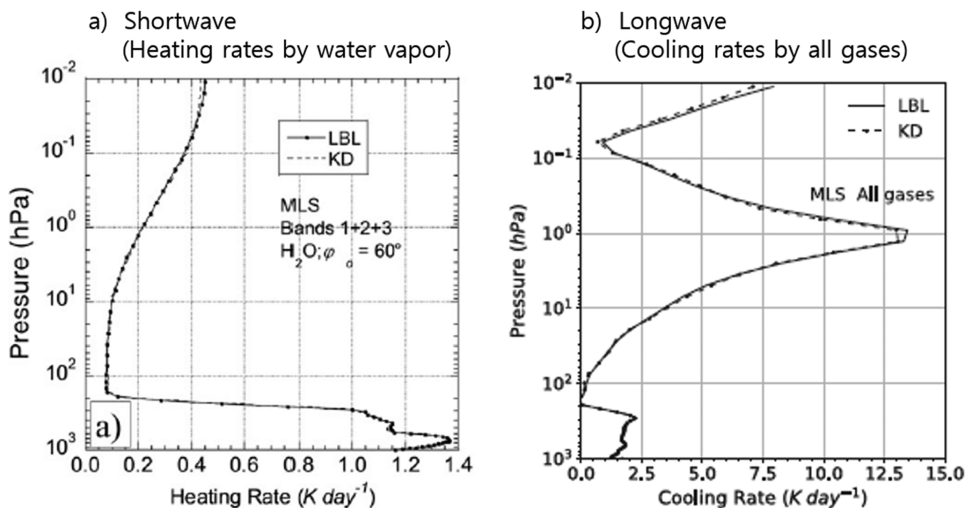


Fig. 4. Heating rates (a) and cooling rates (b) using parameterization model by new k-distribution method (dotted line, KD) and line-by-line model (solid line, LBL). From Chou et al. (2020, 2021).

학깊이 등을 수치모의한 연구를 발표하였다.

복사이론에 대한 것으로서 Jee et al. (2011)은 선모델(line-by-line model)을 이용하여 태양복사 모델을 교정하는 방법을 논하였고 Zo et al. (2014) 및 Zo et al. (2016b)은 단층 태양복사 모델을 개발하고 이를 지표면 복사관측 자료와 비교 분석한 논문을 발표하였다. 국제적으로는 미국 NASA와 국내 연구자들의 공동연구를 바탕으로 Chou et al. (1996), Chou et al. (1998) 및 Chou et al. (2002)이 태양복사 모수화 논문을 발표하였고, Chou et al. (1999)이 적외복사 모수화를 발표하였다. 비교적 최근에는 대만 국립중앙대와 강릉원주대 복사위성연구소의 공동 연구로서 Chou et al. (2020)과 Chou et al. (2021)이 적외복사와 태양복사 모수화 연구를 발표하였는데(Fig. 4), 이는 계산 속도가 빠르고 정확한 획기적인 방법으로서 기존의 k-분포(k-distribution) 방법을 새롭게 개선한 세계 최초의 연구 결과이다.

복사이론에 관련된 다른 국내 연구 논문들로는 국내의 복사 관련 연구자들이 사용하는 모델 결과 비교 논문인 Yoo et al. (2007)과 Yoo et al. (2008)이 있다. 그 이외에 국내 연구자들이 국내 학술지에 발표한 복사이론 논문은 많지 않다. 복사와 온도 및 고도 관계를 다룬 Nam et al. (2002)과 자외선(UV-B) 복사의 특성 분석을 수행한 Kwak and Kim (2011), 그리고 기계학습에 의한 일사량 산정방법을 다룬 Lee et al. (2017) 정도이다. 복사이론 연구를 위해서는 숙련된 경험과 지식의 동반이 요구되기 때문에 국내 연구 결과들이 많지 않은 것이 현실이나 위에서 언급한 바와 같이 기상기후 예측 및 분석의 중요한 핵심이기 때문에 복사관측 분야와 마찬가지로 국내 연구자들의 분발이 촉구된다.

### 3. 대기 에어로졸

1990년 IPCC 1차 보고서가 발간된 이후 여러 차례의 IPCC 보고서를 통해, 인간활동에 의한 에어로졸 환경 변화와 이에 따른 구름미세물리와 구름의 복사적 성질의 변화에 대한 이해의 부족이 기후변화 예측 불확도에 가장 크게 기여하는 원인의 하나로 지목되었다(IPCC, 2021). 이에 따라 이 주제에 대한 연구가 전세계적으로 매우 활발히 진행되고 있다. 인위적 에어로졸이 직접적으로 지구복사수지에 영향을 미치는 것을 에어로졸 직접효과라 하고, 인위적 에어로졸이 구름입자 생성에 관여하여 궁극적으로 구름의 복사적 성질에 영향을 미치는 것을 에어로졸 간접효과라 한다. 이와 같이 기후변화 인자로서의 에어로졸의 중요성이 부각되면서 전 세계적으로 관측을 통해 에어로졸 특성에 대한 이해를 높이려는 노력이 이루어지고

있다. 특히 구름입자는 개개의 에어로졸 입자에 수증기가 달라붙어 응결하여 생성되므로, 이런 역할을 하는 구름응결핵(cloud condensation nuclei, CCN) 수농도 관측의 중요성이 부각되었다.

우리나라에서도 지난 20여년간 한반도 배경대기 지역을 중심으로 국내 개별 연구진뿐만 아니라 기상청 지구대기감시관측소(안면도, 고산)를 비롯한 몇몇 국가 기관이 설립한 지상관측소에서 에어로졸 특성에 대한 관측을 수행하고 있다. 2011년에는 이 시점까지 국내 연구진들이 에어로졸과 구름 분야에서 어떤 학술적 활동을 해왔는지 요약하는 보고서가 발간된 바 있다(Yum et al., 2011). 본 논문에서는 대기물리의 관점에서 에어로졸의 광학적, 물리적 특성과 흡습성 및 CCN 연구를 정리하였다. 기후변화 인자로서는 에어로졸 질량농도보다는 수농도가 중요하기 때문에 수농도 관측에 초점이 맞춰져 있음을 알려 둔다.

#### 3.1 에어로졸 물리적, 광학적 특성

에어로졸 관측의 중요성이 부각되면서 2001년에 ACE-Asia (Aerosol Characterization Experiment-Asia)라는 국제 관측 캠페인이 거행되었고 제주도 고산에 거점관측소(supersite)가 설치되어 종합적인 에어로졸 특성에 대한 관측이 수행되었으나 아쉽게도 국내 연구진이 주도적으로 연구를 수행한 결과를 국내외 학술지에 발표한 것은 없는 것으로 사료된다. 2005년에 수행된 국제 관측캠페인 ABC-EAREX (Atmospheric Brown Cloud-East Asia Regional Experiment)에서도 고산이 거점관측소 역할을 하였으며, 이 때 비로소 국내 연구진의 적극적인 참여와 주도적인 연구 결과도 발표되었다. Yum et al. (2007)은 고산에서 관측한 대기 에어로졸 수농도 및 크기분포 관측 결과를 보고하였는데 우리나라에서는 가장 깨끗한 대기질을 갖고 있는 곳으로 간주되는 제주도에서조차 세계 다른 배경 대기 해양 지역에 비해 10배 이상 높은 에어로졸 수농도( $> 5000 \text{ cm}^{-3}$ )를 보이고 있음을 확인하였다. 비슷한 시기에 안면도 지구대기감시관측소에서 측정된 에어로졸 수농도는 이보다도 높은  $\sim 8000 \text{ cm}^{-3}$ 였다(Yum et al., 2005). 이 후에도 서해와 동중국해 상에서의 선박관측(Kim et al., 2009), 백령도, 고산, 대관령, 영종도 지상관측소에서 관측한 에어로졸 수농도와 크기분포 결과가 보고되었으며(Kim et al., 2011; Kim et al., 2012), 항공기를 이용한 한반도와 주변 바다 위 에어로졸 관측 결과도 보고되었다(Kim et al., 2014). 2015년에는 국내 연구자들이 모여 종합적인 에어로졸 관측 캠페인(MAPS-Seoul; Megacity Air Pollution Studies-Seoul)을 수행하였고, 2016년 봄철 기간에는 한-미 대기질 관측 캠페인 KORUS-AQ (Korea-United States Air Quality)를 수행하면서, 지상관측은 물론 항공기

를 이용해 상공에서의 에어로졸 관측이 수행되었다 (e.g., Kim et al., 2017, 2018; Park et al., 2020; Park et al., 2021). Park et al. (2021)은 항공 관측자료로부터 1 km 이하의 대기경계층에 직경 3~10 nm 사이의 에어로졸 수농도가 약  $7600 \text{ cm}^{-3}$ 이며, 특히 캠페인 기간인 5~6월에는 대기경계층 위의 자유대기(free atmosphere)에서 이산화황( $\text{SO}_2$ )으로부터 황산염이 생성되는 과정이 활발하게 일어남을 밝혔는데 이와 같은 연직적인 에어로졸 수농도 분포 구조는 Kim et al. (2014)에서도 관측되었다. 2014년부터는 국립기상과학원이 주관하여 매년 서해상에서 에어로졸 선박관측을 수행하였고(Park et al., 2016), 2018년부터는 보다 체계적으로 YES-AQ (YellOw Sea Air-Quality) 캠페인을 수행하면서 선박관측을 통해 서해상의 에어로졸 분포를 관측하고 있으며, 관측 결과가 여러 편의 논문으로 보고되었다(e.g., Lim et al., 2019; Park et al., 2021).

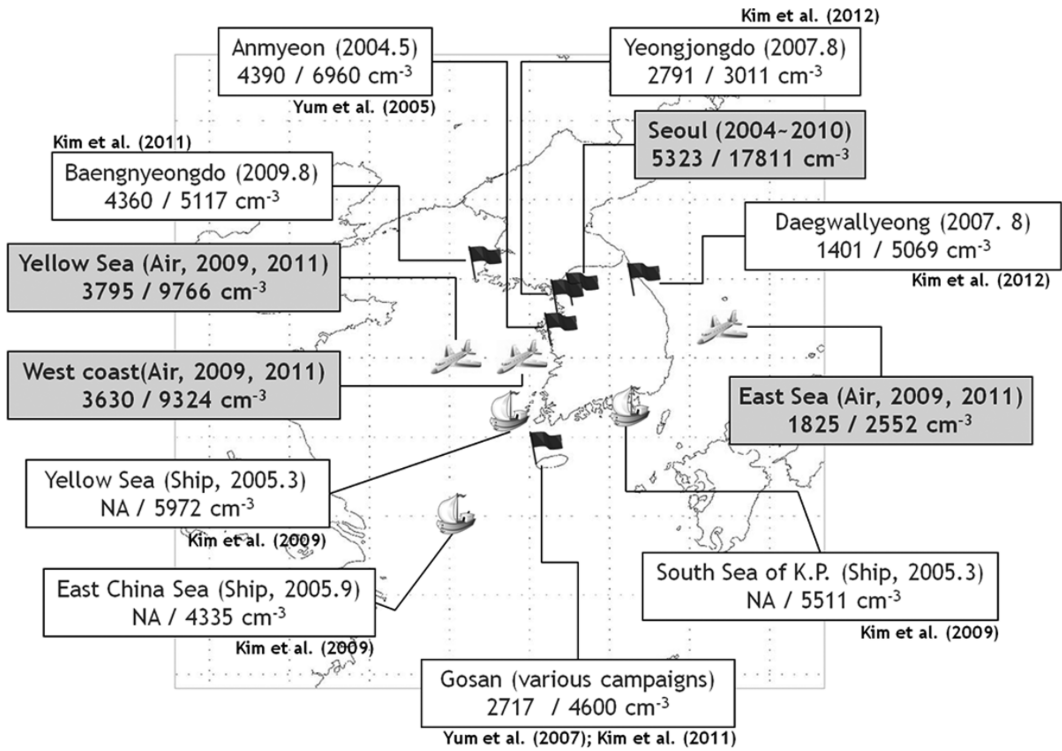
Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)라는 에어로졸 크기분포 관측기기로부터 얻는 자료의 시간적 변화를 분석하면 입자 생성 및 성장(new particle formation and growth, NPF) 현상을 추정할 수 있다. Yum et al. (2007)은 ABC-EAREX 기간 동안 고산에서 관측한 NPF 현상을 보고하였고, Song et al. (2010)이 이에 대한 심층 분석을 시도하였다. Kim et al. (2013)은 장기적인 관측결과를 바탕으로, 안면도에서는 겨울철에, 고산에서는 봄철에 NPF가 가장 빈번하게 발생함을 보고하였다. 고산에서 관측된 NPF 현상의 약 13%는 구름이 전혀 없는 청천 하늘(운량: 0/10)에서, 67%는 구름이 낀 대기 조건(운량: 1/10~8/10)에서, 그리고 약 20%는 구름이 존재하여 자외선이 줄어든 상황에서 관측되었으며(Kim et al., 2014b), NPF 발생빈도는 총관측 일수 중 약 27%에 해당되며, 이중 1/3은 중국에서 공기기가 유입된 사례였다(Kim et al., 2021). Kim et al. (2014)은 동시적인 지상/항공 관측을 종합적으로 분석하여 서해상에서 NPF 현상이 일어나는 공간적 규모가 최소  $100 \text{ km} \times 450 \text{ km}$ 에 이를 수 있음을 추정하였고, Kim et al. (2019)도 비슷한 광범위한 NPF 발생 영역에 대한 관측 결과를 보고하였다. 특히하게도 한반도 최서북단에 위치한 백령도에서 매우 빈번한(관측 일수 중 42.2%) NPF 현상이 관측되었는데, 이는 빈번한 중국의 오염 공기 유입에 따른 것으로 추정되었다(Park et al., 2021). 한편 Park et al. (2015)은 서울 도심에서 총 관측일 수 중 약 12.5% 일 수에 NPF 현상을 관측하였으며, NPF 현상이 초미세입자의 수농도에 약 32% 기여함을 추정하였다.

에어로졸 광학 특성에 대한 관측도 활발히 이루어졌다. Shim et al. (2008)은 2007년 2월부터 2008년 2월까지 13개월간 관측한 서울 에어로졸의 산란계수

(scattering coefficient) 특성을 보고하였는데 일평균 값의 평균이  $194.1 \pm 144.2 \text{ Mm}^{-1}$ 에 이르렀다. Kim et al. (2014a)은 고산의 에어로졸 산란계수 평균값이 인위적 오염 에어로졸과 황사의 영향이 빈번한 봄철에 가장 높았으나, 흡수계수(absorption coefficient)는 화석연료 배출량이 증가하는 겨울철에 높게 나타남을 밝혔다. 특히, 겨울철 고농도 오염 사례 기간에는 산란계수( $240 \text{ Mm}^{-1}$ )와 흡수계수( $18 \text{ Mm}^{-1}$ ) 모두 겨울철 평균에 비해 약 5배 가량 높음을 관측하였다. 에어로졸 소산계수(흡수계수 + 산란계수)와 산란계수의 비로 표현되는 단일산란 알베도는 블랙 카본(원소 탄소)과 유기탄소 등의 광흡수 에어로졸 농도가 증가하는 오염 기간에 다소 낮게 관측되었다(약 0.85~0.95; Kim, 2014a). Cho et al. (2019)은 제주도 고산에서 겨울철 오염 사례 기간의 블랙 카본과 브라운 카본의 광흡수 효율(파장 565 nm)을 각각  $6.4 \pm 1.5 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 와  $0.62 \pm 0.06 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 로 산출하였으며, 블랙 카본과 브라운 카본의 광흡수 기여도를 각각  $84.9 \pm 2.8\%$ 와  $15.1 \pm 2.8\%$ 로 추정하였다. Park et al. (2010)은 광흡수 에어로졸인 블랙 카본뿐만 아니라 브라운 카본의 복사 효과가 대기 상단의 에어로졸 복사강제력의 약 15%에 달함을 대기화학수송 모델 모의를 통해 추정함으로써 기후모형에서 브라운 카본의 광학 효과를 고려할 필요가 있음을 강조하였다. 한편, Bae et al. (2019)은 0.1~1.8  $\mu\text{m}$  입경 구간에서 황산염 에어로졸이 약 49%를, 유기탄소와 원소 탄소가 각각 13.5%와 0.4% 차지함을 관측하였으며, Lim et al. (2014, 2018)은 유기탄소 에어로졸의 농도가 높을 때 자외선 영역에서의 광흡수가 증가하고, 황산염이 많은 조건에서는 블랙 카본 코팅에 의해 가시영역에서 광흡수가 뚜렷이 증가함을 밝혔다.

### 3.2 에어로졸 흡습성과 구름응결핵(CCN)

에어로졸 흡습성(hygroscopicity)은 에어로졸 입자가 대기 중의 수증기를 빨아들이는 성질을 의미하므로, 에어로졸이 구름응결핵으로 작용할 수 있는 가능성을 나타내는 인자라 할 수 있다. 대기 에어로졸의 흡습성은 Humidified Tandem Differential Mobility Analyzer (HTDMA)를 이용하여 에어로졸 입자의 흡습 성장율을 측정하고 이를 흡습도(hygroscopicity parameter: k)로 환산하여 나타낼 수 있다. Lee et al. (2007)는 HTDMA를 이용한 대기 에어로졸 흡습성 측정 가능성을 보여주었고, Kim et al. (2011)은 우리나라 최초로 고산과 백령도 대기 에어로졸의 흡습도를 측정하였다. Kim et al. (2017)은 서울에서 직경 30~150 nm 입자의 k를 0.17~0.27로 산정하였으며, 이는 Aerosol Mass Spectrometer (AMS) 관측자료로부터 산정한 0.32~0.34보다 낮았다. 서울 에어로졸의 크기에 따른 흡습도 차이를 관측하고 이를 화학성분에 따른 에어



**Fig. 5.** Composite map of the average  $N_{0.6\%}$  (before the slash) and  $N_{CN}$  (after the slash) measured on the ground (flag), over the sea (ship) surface or below 1100 m altitude (airplane) in and around the Korean Peninsula. From J. Kim et al. (2014).

로졸 흡습성의 차이와 연관 지어 설명하는 시도도 있었다(Kim et al., 2018, 2020). 흡습도 증가에 따른 광산란 증가(Lee et al., 2012), 대기 중에서의 노화과정에 따른 소수성 블랙 카본 입자의 흡습도 증가와 이에 따른 광흡수 및 산란 효과의 증가도 보고된 바 있다(Cho et al., 2021).

우리나라 최초의 CCN 관측은 안면도 지구대기감시관측소에서 이루어졌다(Yum et al., 2005). 우리나라에서는 배경대기로 간주되는 안면도의 CCN 수농도가  $4000\sim 8000\text{ cm}^{-3}$ 에 이르렀는데, 이는 깨끗한 해양 대기 관측값의 5~10배에 달하는 것이었다. 이후에도 지상관측(Yum et al., 2007; Kim et al., 2011; Kim et al., 2017, 2018, 2020), 선박관측(Park et al., 2016, 2021), 항공관측(Kim et al., 2014; Park et al., 2020)을 통해 한반도와 그 주변의 CCN 분포에 대한 연구가 이루어졌다. Figure 5는 여러 관측 캠페인 결과를 바탕으로 한반도와 그 주변의 CCN/에어로졸 수농도 분포를 나타내 주는 지도이다. 전 지구적인 CCN 분포 특성을 비교하는 연구도 수행되어 연세대학교 서울 캠퍼스에서 장기간 관측된 자료가 동북아시아 도시 대기를 대표하는 값으로 제시되었는데, CCN 수농도가 세계 다른 지역의 관측값과 비교하여 3~10배 높

고 특정 과포화도(0.2%)에서의 입자 임계직경이 가장 큰 특성을 보였다(Schmale et al., 2018).

#### 4. 구름물리 관측 및 실험

구름물리에 관한 논문이 최초로 발표된 것은 놀랍게도 한국기상학회지 1호에 실린 양인기 박사의 인공강우에 관한 기초적 조사 및 예비적 야외실험에 관한 논문이었다(Yang, 1965). 그 이후로도 낙하하는 빗방울의 온도변화율 계산(Min, 1966), 빗방울 크기 입자의 결빙실험(Joung, 1966), 빙정핵(ice nuclei, IN) 농도 관측(Kim, 1966) 등 매우 근본적인 구름물리 연구가 학회 창립 초창기에 이루어졌다.

구름 관측의 중요성이 부각되고 구름입자를 관측할 수 있는 기기의 개발이 본격적으로 이루어지기 시작한 1970년대 말 이후 미국을 중심으로 항공기를 이용한 구름 관측 캠페인을 통해 많은 구름미세물리 관측 자료가 생산되었다. Kim (1991)은 우리나라에서 처음으로 여러 항공관측캠페인에서 관측한 구름미세물리 자료를 분석한 논문을 발표하였다. 우리나라 수자원 확보 대책의 하나로 2000년대 초반부터 국립기상과학원을 중심으로 인공강우(설) 실험을 꾸준히 수행하

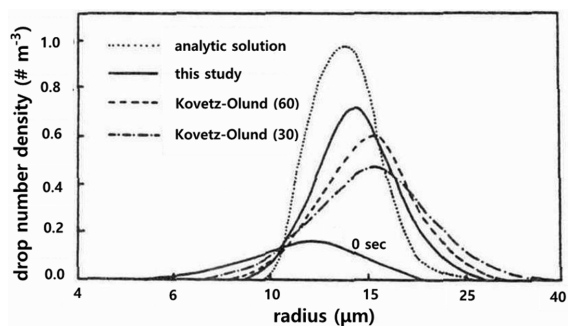
고 있는데, 그 노력의 일환으로 대관령에 구름물리선도센터를 구축하였으며(Chang et al., 2007), Forward Scattering Spectrometer Probe (FSSP)라는 구름입자 직접(in-situ) 측정 장비를 도입하여 대관령과 안면도에서 구름(안개)입자를 관측하였다(Yum et al., 2004). 이 연구는 제한적으로 구름 하부 혹은 안개를 간헐적으로 관측하였다는 한계가 있으나, 우리나라 최초의 구름미세물리 직접 관측이라는 점과 이후 구름미세물리 직접 관측을 위한 항공기 도입에 초석이 되었다는 점에서 큰 의미를 갖는다. Kim et al. (2005)는 한반도에서의 겨울철 지형성 인공증우(설) 실험의 성공 가능성에 대한 연구를 수행하였고, Lee et al. (2011)은 인공증우(설) 실험 수행, 여름철 악기상 관측, 봄과 가을철 한반도 오염물질 감시, 위성 및 지상 기반 원격 탐사 장비들의 검증을 위한 기상항공기 도입의 필요성을 강조하였으며, 2017년 말에 비로소 국립기상과학원이 기상관측 전용 항공기를 도입하여 우리나라에서도 항공기가 직접 구름 속을 통과하면서 구름미세물리 직접 관측을 수행할 수 있게 되었다. Cha et al. (2019)은 국립기상과학원이 2008년부터 인공증우(설) 실험을 위해서 수행한 총 54회 항공기 실험의 설계와 결과를 분석하였는데, 기상항공기 도입 이전에 수행하였던 소형 입대 항공기를 사용한 실험의 결과는 지상 레이더와 강우량 관측을 통해 검증하였고, 2018년 이후부터는 기상항공기를 이용한 구름미세물리 직접 관측 자료 분석을 통해 인공증우(설) 효과를 계산하였다. Kim et al. (2018)은 스마트폰 카메라로 찍은 눈 결정 사진이 충분히 과학적인 의미를 가질 수 있다는 것을 증명하였으며, Um (2020)은 전방산란 관측 기기를 이용한 얼음상 입자 관측의 문제점을 해결하려는 연구를 수행하였고 Um et al. (2021)은 비구형 병정의 단일산란 특성 모수화를 위한 항공기 구름미세물리 직접 관측 자료의 활용 방법과 개선 방향을 제시하였다.

그러나 구름미세물리 직접 관측 자료 분석 연구는 대부분 국제적인 구름 관측 캠페인에서 얻은 구름미세물리 자료를 분석하는 것들로 이루어졌다. 이들은 주로 얼음입자가 포함되지 않은 온난운에서 구름미세물리 인자들 간의 상관관계를 분석함으로써, 구름 외부 공기의 유입과 혼합이 어떤 방식으로 일어나고, 구름입자 성장에 어떻게 영향을 주는지 유추해 보는 연구(Yum, 2004; Wang et al., 2009; Yum et al., 2015; Yeom et al., 2017, 2019, 2021; La et al., 2022)였다. 또한 에어로졸 간접효과를 추정하는 노력의 일환으로 항공기로 관측한 CCN 분포와 구름미세물리 인자들 간의 연관성을 살펴보는 연구도 다수 수행되었다(Yum and Hudson, 2002; Hudson and Yum, 2002; Yum and Hudson, 2004; Song and Yum, 2004; Liu et al.,

2008). 한랭운의 경우에는 깊은 대류운 관측 캠페인에서 얻은 동결입자(frozen droplet aggregates)의 미세물리적 특성을 분석하는 연구가 수행된 바 있다(Um et al., 2018).

### 5. 구름모델링

수치 모형을 이용한 구름 연구는 관측 연구와 함께 구름물리학의 발전에 많은 기여를 해왔다. 우리나라 최초의 구름모델링 연구는 Lee (1984)가 충돌·병합과정에 의한 구름입자 성장을 수치적으로 계산한 것이다. Lee (1986)은 우리나라 최초로 1차원 구름모형인 Takahashi model을 이용하여 구름 발달과정을 수치 모의하면서 온난운 발달에 미치는 보상운동의 억제효과를 분석하였고, 그 이후로도 1차원 구름모형을 이용한 연구가 다수 발표되었다(Lee and Lee, 1986; Yum and Lee, 1988; Kim et al., 1990; Kim and Lee, 1991; Lee, 1992). Figure 6은 Lee and Lee (1986)가 상자 모델을 이용하여 계산한 응결·증발과정에 의한 구름입자 수 밀도 분포의 시간변화를 보여준다. 컴퓨터 계산능력 개선과 더불어 새로운 구름모형인 CSU-RAMS model (2차원 version)이 도입되었고, 이를 이용하여 Lee et al. (2000)은 심층 대류운에서 얼음입자가 강수 발달에 미치는 효과를 연구하였고, Lee et al. (2001)은 얼음입자 핵화율이 구름과 강수 발달에 미치는 영향을 계산하였다. Yang and Yum (2004)는 Takahashi model의 2차원 version을 이용하여 인공증우 수치실험을 수행하였으며, Lee and Yum (2012)은 이 모형에서의 얼음입자 충돌효율 계산과정의 개선을 제시하였다. Takahashi model을 이용한 연구가 국제학술지에



**Fig. 6.** Distributions of drop number density at  $t=600$  s calculated using a box model that includes condensation and evaporation processes. The initial drop size distribution is also drawn, and the values in parentheses are the bin numbers. The improved scheme (this study) is compared with the Kovetz-Olund scheme and analytic solution. From Lee and Lee (1986).

발표되기도 하였으나(Yang and Yum, 2007; Lee et al., 2014), 그 이후로는 나타나지 않았으며, 근래에는 다수의 연구자가 참여하여 개발한 보다 정교한 구름모델인 WRF (Weather Research and Forecasting)-LES (Large Eddy Simulation) model을 이용하여 CCN 분포와 열역학적 조건에 따른 해양 증적운의 구름 복사 강제력 차이를 연구하거나(Song and Yum, 2012), 재생(regenerated) CCN이 해양 증적운 발달에 미치는 영향을 연구하기도 하였다(Choi et al., 2020). WRF model에 cloud seeding 모수화 과정을 삽입하여, 영동 지역에서의 겨울철 인공강설 수치실험 연구도 수행되었다(Kim et al., 2016; Chae et al., 2018). 한편, 인천 국제공항을 비롯한 연안/해상 안개 예보의 어려움을 극복하고자 이런 안개의 종관적인 특성을 분석하고(Kim and Yum, 2010), WRF 종관모형과 1차원 난류 모형인 PAFOG (PARameterized FOG)를 결합한 시스템으로 안개 수치모의 및 안개 생성/소멸 메커니즘에 대한 분석도 시도하였고, 이를 통해 서해상과 서해연안 안개의 생성 메커니즘에 대한 이해도의 향상(Kim and Yum, 2012a, 2012b, 2013)은 물론 안개 예보 정확도의 향상도 이를 수 있었다(Kim and Yum, 2015; Kim et al., 2020a, 2020b).

수치 모형을 통해 구름 내부의 미세물리 과정 및 구름과 주변 환경 간의 상호작용을 깊이 이해하기 위해서는 물리적 기반의 정교한 구름 모수화 개발이 무엇보다 필요하다. 2000년대에 이르러서는 학회 회원들의 구름 과정에 대한 모수화 연구가 활발히 이루어지기 시작하였다. 수치 모형에서 구름을 명시적으로 표현하는 방법에는 빈(bin) 구름미세물리 모수화 방법과 벌크(bulk) 구름미세물리 모수화 방법이 있다. 빈 방법에서는 각 수상체(hydrumeteor)를 크기별로 나누고, 각 수상체의 수농도를 크기별로 예단한다. 벌크 방법에서는 수상체의 크기 분포를 지정하고, 각 수상체의 혼합비를 예단하거나(단일 모멘트 방법) 각 수상체의 혼합비와 수농도 모두를 예단한다(이중 모멘트 방법). 빈 방법을 이용하는 수치 모형은 상당한 계산 시간이 요구되므로 아직 연구 목적으로만 사용된다. 반면에 벌크 방법은 연구 모형뿐만 아니라 현업 날씨 예보 모형에서도 널리 사용되고 있다. Lim (2019)은 벌크 방법을 해설하였다. 우리나라 연구자가 구름 모델링 분야에서 크게 공헌한 부분이 구름미세물리 모수화 개발이다. 여기서는 이 부분을 중점적으로 살펴보고자 한다.

Hong and Lim (2006)은 수증기와 다섯 가지 수상체(구름 물, 빗물, 구름 얼음, 눈, 싸락눈)를 포함하는 단일 모멘트 벌크 구름미세물리 방안(WRF Single-Moment 6-class microphysics scheme: WDM6)을 개발했고, 고해상도에서 수상체 종류가 늘수록 강수량이

증가함을 보였다. Lim and Hong (2010)은 WSM6 방안을 확장하여 구름입자와 빗방울의 수농도를 예단하는 이중 모멘트 벌크 구름미세물리 방안(WRF Double-Moment 6-class microphysics scheme: WDM6)을 개발했고, 이차원 뇌우 모의를 통해서 WDM6 방안이 WSM6 방안에 비해 약한 강수를 감소시키고 중간 정도의 강수를 증가시킴을 보였다. Song and Sohn (2018)은 다른 벌크 구름미세물리 모수화 방안들과 비교했을 때 WDM6 방안이 온난 유형의 강한 비 연직 구조를 위성 관측에 가장 근접하게 모의함을 보였다. WRF 모형에 장착된 WSM6 방안과 WDM6 방안은 구름과 강수 연구에 널리 사용되고 있다. Bae et al. (2019)는 WSM6를 확장하여 우박을 포함한 단일 모멘트 벌크 구름미세물리 방안(WRF Single-Moment 7-class microphysics scheme: WSM7)을 개발하고, 삼차원 스콜라인 모의를 통해서 WSM7 방안이 WSM6 방안에 비해 약한 강수를 억제하고 강한 강수를 강화시킴을 보였다. 기상청의 현업 모형인 KIM (Korean Integrated Model)의 구름미세물리 방안은 구름 물, 빗물, 구름 얼음과 눈을 고려하는 단일 모멘트 방안(WRF Single-Moment 5-class microphysics scheme: WSM5)이다(Hong et al., 2018). 현재 12 km의 수평 해상도를 갖는 KIM의 수평 해상도가 증가하면 강수 예보 성능 향상을 위해 싸락눈의 혼합비와 액체상 및 얼음상 수상체의 수농도 예단이 필요해 보인다. 수상체의 수농도 예단을 통해 수상체의 크기 분포 모수를 더 정확하게 계산할 수 있을 것이다.

지금까지 개발된 대부분의 벌크 구름미세물리 방안에서는 한 수상체 입자가 다른 수상체 입자와 충돌·병합하는 과정을 연속된 과정으로 가정한다. 하지만 실제로 포착에 의한 수상체 입자의 성장 과정은 확률적으로 일어난다. 이를 기술하는 것이 확률 포착 방정식이다. 확률 포착 방정식에 포함된 포착 효율은 충돌 효율과 병합 효율의 곱으로 표시된다. 충돌 효율은 충돌하는 두 개별 수상체 입자의 크기의 함수이다. DNS (Direct Numerical Simulation) 또는 입자 궤적 모형을 이용하여 이 함수를 결정한다. 이를 통해 확률 포착 방정식의 장점을 유지하면서 계산 효율성을 높이는 이중 모멘트 벌크 구름미세물리 모수화를 개발할 수 있다.

Lee and Baik (2017)은 입자 궤적 모형을 이용해 구한 충돌 효율과 확률 포착 방정식을 사용하여 구름입자가 서로 충돌·병합하여 빗방울로 성장하는 자동변환 과정에 대한 모수화를 개발했고, 빈 모형 결과와 비교함으로써 이 모수화가 다른 자동변환 모수화보다 우수함을 보였다. Jin et al. (2019)와 Jin and Baik (2020)은 각각 싸락눈이 구름입자를 포착하여 성장하는 결착 모수화와 눈이 구름입자를 포착하여 성장하



는 결착 모수화를 개발했다. 새로운 싹타는 결착 모수화는 전체 강수량 중 강한 강수의 비율을 증가시켰고, 새로운 눈 결착 모수화는 강한 강수가 나타나는 빈도를 낮추었다. Ahmed et al. (2020)은 빗방울이 구름입자를 포착하여 성장하는 결착 모수화를 개발했고, 이 결착 모수화가 누적 강수량의 공간적인 분포를 상대적으로 잘 모의함을 보였다. Jin et al. (2022)는 Ahmed et al. (2020)의 결착 모수화, 빗방울의 자기 포착 및 충돌 분열 모수화 등을 포함하는 이중 모멘트 벌크 온난구름 미세물리 방안을 개발했다. 이러한 확률 포착 기반의 모수화가 연속 포착 기반의 모수화에 비해 현업 수치 날씨 예보 모형에서 어떠한 향상을 가져올지에 대한 연구가 필요하다. 구름 내부에는 강한 난류가 존재해 수상체 입자 간의 충돌을 강화시킨다. 이러한 충돌 강화 효과를 고려하는 물리적 기반의 자동변환 모수화 및 결착 모수화 개발이 요구된다.

구름 모수화에는 다양한 불확실성이 존재한다. 그 중 하나가 수상체 입자의 종단낙하속도이다. 특히 얼음입자는 그 모양이 다양해서 종단낙하속도를 정확히 표현하기 어렵다. Lee and Baik (2016)은 빙 미세물리 과정이 포함된 이차원 구름 모형을 이용하여 구름 모의에 미치는 싹타는 종단낙하속도의 불확실성을 조사했고, 싹타는 종단낙하속도가 큰 경우가 작은 경우보다 누적 지표 강수량이 약 두 배 많음을 보였다. Kim et al. (2020)은 보다 현실적인 빗방울 종단낙하속도 표현식을 이용해 이것이 강수 모의에 미치는 영향을 조사했는데, WSM5 방안과 WSM6 방안에서 이 영향이 항상 같은 방향으로 나타나지는 않았다. 구름 미세물리 모수화에 내재된 다양한 불확실성을 줄이기 위해서는 지속적인 이론, 관측 및 실험 연구가 필요하다. 더불어 구름미세물리 모수화 방안에 포함된 여러 파라미터(parameter)의 최적값을 찾는 연구도 진행되어야 한다. 빙 미세물리 방안을 갖는 구름 모형에서 확률 포착 방정식과 응결 및 증발 과정 방정식을 풀 때 부정확한 수치 해로 인한 수상체 입자 분포의 인위적 broadening 문제도 빙 구름모델링에서 중요한 부분이다(Lee et al., 2019).

라그랑지안 구름 모형은 수상체 입자의 궤적을 따라가면서 수상체 입자의 성장과 소멸 과정을 파악할 수 있는 모형이다. Noh et al. (2018)은 라그랑지안 구름 모형을 LES (Large-Eddy Simulation) 모형에 접목해 액체상의 얇은 적운을 모의하고, 그 모의 자료를 이용하여 얇은 적운에 대한 자동변환 모수화와 결착 모수화를 개발했다. 라그랑지안 구름 모형은 빗방울 성장의 메커니즘을 이해하는데 매우 적절한 모형이다. 이 모형을 이용하면 구름입자가 어떤 조건에서 어떻게 빗방울로 성장하는지를 상세히 알 수 있다. 앞으로 라그랑지안 구름 모형의 지속적인 개발과 이를 이

용한 연구는 구름모델링 분야를 크게 진전시킬 것으로 보인다.

지금까지 살펴본 내용은 수치 모형에서 격자 규모의 구름 모수화에 관한 내용이다. 수치 모형에서 수평 격자 간격이 구름의 수평 규모보다 크면 아격자 규모의 구름 모수화(적운 모수화)가 필요하다. UNICON (unified convection scheme; Park, 2014)은 조직화된 중규모 흐름과 이것이 아격자 규모 대류에 미치는 영향을 명시적으로 모의할 수 있게 설계된 몇 안 되는 적운 모수화 중 하나이다. 이는 준평형 가정에 의존하지 않으며 일관되고 통합된 방식으로 얇거나 깊은 대류를 모수화한다. Shin and Park (2020)은 UNICON을 확장하여 얇은 대류에 대한 확률적(stochastic) UNICON을 개발했다. UNICON은 지금까지 제안되었던 적운 모수화 중 가장 정교하다. 깊은 대류를 포함한 확률적 UNICON의 개발이 이루어지면 기후모델과 전 지구 날씨 예보 모델 성능을 개선할 것으로 기대된다. Han et al. (2016)과 Kwon and Hong (2017)은 각각 대류 응결물의 강수 전환율 수정과 규모 인식 효과 고려를 통해 Simplified Arakawa-Schubert (SAS) 적운 모수화(e.g., Han and Pan, 2011)를 개선하였다. 이 외에도 적운 모수화의 대류 발생 조건, 흡기율, 대류 종결, 대류 운동량 수송 등의 개선으로 KIM의 중기 예보 성능, 특히 열대 모의 및 강수 예측 성능이 향상되는 것이 확인되었다(Han et al., 2020).

## 6. 강수물리

본 절에서는 앞서 다룬 항공기를 이용하여 구름 속을 통과하면서 측정된 구름입자들에 대한 물리과정과 구분하여, 광학 또는 레이더 원리를 이용하여 지상에서 관측된 강수입자들의 특성과 물리과정을 다루고자 한다.

### 6.1 강수입자 크기분포 관측

강수입자 크기분포는 우적계(disdrometer)로 관측하거나 원격탐사 관측자료를 이용하여 추정할 수 있다. 우리나라에서는 90년대 후반부터 POSS (Precipitation Occurrence Sensor System, Sheppard, 1990; Lee and Zawadzki, 2005)를 부산에 설치하여 강수입자 크기분포를 관측하였다(Jang et al., 2004; You et al., 2004; You et al., 2005). POSS는 연직방향으로 도플러 파워 스펙트럼을 관측하고 입자크기와 종단낙하속도 관계식, 빗모양 등을 이용하여 입자 크기분포를 추정한다. 이후 국립기상과학원 주도로 MRR (Micro rain radar) 및 Parsivel (Particle size and velocity; Löffler-Mang and Joss, 2000)이 해남, 대관령 등에 설치되어 강수입자 크기를 지속적으로 관측하고 있다(Cha et al., 2007;

Cha et al., 2010; Moon et al., 2013; Kim et al., 2021).

Parsivel은 레이저 빔의 시간에 따른 강도를 측정하여 입자크기와 낙하속도를 산출하며 인공강우 실험의 일환으로 영동지방에 설치되어 지형에 따른 강수입자 크기분포 특성 분석에 활용되고 있다(Cha et al., 2010; Kim et al., 2021). 2대의 직교하는 선형 CCD (Charged Coupled Device) 카메라를 이용하여 개별 입자를 측정하는 2DVD (two Dimensional Video Disdrometer: Kruger and Krajewski, 2002) 관측은 2010년에 대구에서 시작된 이후 보성, 대관령, 인천, 진천 등 다양한 지역에서도 이루어져 10년치 이상의 자료가 획득되었으며, 한국에서 발생하는 강수현상에 대한 이해를 위한 유용한 자료로 활용되고 있다(Bang et al., 2020).

VHF (Very High Frequency) 수직측풍기는 청천대기 및 강수입자에 의한 산란 신호를 동시에 관측하여 연직공기속도를 산출하고 이를 이용하여 도플러 파워스펙트럼을 수정한 후 입자 크기분포를 추정할 수 있다(Kim et al., 2000). 따라서 MRR과는 달리 연직공기속도로 추정하는 입자 크기분포의 불확실성을 최소화할 수 있다. Kim et al. (2000)은 VHF 수직측풍기에서 반복 디콘볼루션기법으로 고도에 따른 입자 크기분포를 도출하여 빗방울 크기분포의 고도에 따른 진화를 연구하는데 활용하였다. Kim et al. (2011, 2013)은 UHF 수직측풍기에 SAM (Sans Air Motion, Williams, 2002) 모델을 적용하여 입자 크기분포를 도출하였다. 이러한 도플러 파워스펙트럼을 이용한 입자 크기분포 추정에서는 입자크기와 낙하속도 관계식의 정확도가 추정 입자 크기분포의 정확도를 결정하며 정확도가 높은 입자크기와 낙하속도 관계식을 사용하여야 한다(Heo and Kim, 2001). 반면 이중편파레이더에서 획득한 차등반사도, 비차등위상차 등은 레이더 반사도와 함께 평균 입자크기 및 수농도 등의 정보를 제공한다. 그러므로 이중편파레이더 자료를 이용하여 3차원 공간상에서 질량가중 입자크기( $D_m$ ) 및 정규화 수농도 절편( $N_w$ )를 추정할 수 있다(Oue et al., 2011; Wang et al., 2021). 따라서 이중편파레이더를 이용한 입자 크기분포 추정은 강수계와 연관된 강수물리 과정에 대한 이해를 가능하게 한다. 하지만 여전히 약한 강수 또는 가랑비(Drizzle)에서 이중편파 변수의 관측 오차 증가로 인한 입자 크기분포 추정 오차가 존재하며 이를 줄이기 위한 다양한 연구방법이 필요하다.

## 6.2 강수입자 크기분포 분석

관측된 강수입자 크기분포의 분석은 원격탐사 자료를 이용한 강수강도 추정을 위한 관계식 도출과 입자 크기분포를 특정한 함수로 표현하고 함수의 변수들을 분석하는 형태로 진행되었다. 예를 들어 부산에서 POSS로 관측한 입자 크기분포를 이용해 반사도 및

강우강도를 계산하여 R-Z 관계식( $Z = 415R^{1.51}$ )을 도출하고(Jang et al., 2004; You et al., 2004), 이 관계식을 이용하여 레이더 강우 추정 정확도를 향상하였다(Jang et al., 2004). You et al. (2005)은 2년(2001, 2002년) 동안 부산에서 관측한 입자 크기분포를 이용하여 일별 R-Z 관계식을 산출하였으나, 일별 관계식은 강우추정 오차를 줄이는데 한계가 존재한다(Lee and Zawadzki, 2005). 또한 You et al. (2005)는 Tokay and Short (1996)의  $N_0 = 4 \times 10^9 R^{-4.3}$ 과  $\lambda = 17R^{-0.37}$  관계식, 그리고 강우강도 임계치  $5.5 \text{ mm h}^{-1}$ 를 기준으로 층운과 적운형 강수로 구분하고 각각에 대한 R-Z 관계식( $Z = AR^b$ )을 도출하였는데, 적운형 강수의 경우  $A = 78\sim 91$ ,  $b = 1.5\sim 1.7$ , 층운형 강수는  $A = 386\sim 481$ ,  $b = 1.5$ 의 변동성을 보였다. 2000년대 말 2DVD가 도입됨에 따라 보다 정확한 강수입자 크기분포가 관측되었으며 이를 이용한 이중편파변수 강우 추정식의 활용이 가능해졌다(Kim et al., 2014; Kwon et al., 2015a, b; Kim et al., 2016; Bang et al., 2020).

한반도에서 관측한 빗방울 크기분포의 특성 분석을 위하여 Marshall and Palmer (1948)의 지수함수(M-P 분포)와 비교하거나 감마함수로 표현하고자 하였다(Jang et al., 2004; You et al., 2004). Jang et al. (2004)은 부산에서 관측한 빗방울 크기분포가 M-P 분포와 비교하였을 때,  $D < 2 \text{ mm}$ 에서 수농도가 작고,  $D > 2 \text{ mm}$ 에서 수농도가 높음을 보였다. You et al. (2004)은 한국에서 관측한 빗방울 크기분포를 지수함수로 표현하였을 때,  $N_0 = 701\sim 8044 \text{ m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ ,  $\lambda = 1.9\sim 2.7 \text{ mm}^{-1}$ , 감마함수로 표현하였을 경우  $N_0(\text{절편}) = 59\sim 5.4 \times 10^4 \text{ m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ ,  $\lambda(\text{기울기}) = 0.01\sim 2.2 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu(\text{모양}) = -3.9\sim 0.4$ 임을 보였다. 보성에서 MRR과 Parsivel로 관측한 입자 크기분포로 산출한 강수강도는 반사도와 평균입자 직경에 비례하고,  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $N_0$  값에 반비례하였다(Moon et al., 2013). 또한 강우강도가 증가함에 따라 평균 입자크기가 증가하면서 입자 크기분포의 기울기가 완만하게 나타났다.

강설입자 크기분포에 대한 관측 및 분석은 최근에 활발히 진행되고 있다. Cho et al. (2000)은 일본 삿포로 연안과 내륙에서 관측한 강설입자 크기분포 분석을 통하여, 강설입자의 크기는 해안지역 및 내륙지역 모두 강수 구름의 소멸기보다 성장기에 더 크게 나타나며, 내륙에서는 크기가 비슷한 빙정입자, 해안지역에서는 적운형 구름일 때 큰 입자인 부착입자(aggregate) 또는 싸락눈(graupel)이 주로 나타남을 보였다. Cha and Yum (2021)은 대관령지역에서 온도  $-5\sim 0^\circ\text{C}$  범위에서는  $1 \text{ mm}$  이하의 작은 강설입자가 많이 존재하는 반면,  $-15\sim -10^\circ\text{C}$ 에서는  $2 \text{ mm}$  보다 큰 입자의 수농도가 증가함을 보였다. 또한 대관령 지역에서 강설입자는 판상(plate)과 기둥상(column)의 혼합상이 가장 빈

번히 나타나고, 판상의 부착입자가 낮은 온도에서 빈번하게 존재함을 보였다.

**6.3 관측을 통한 강수물리과정 이해**

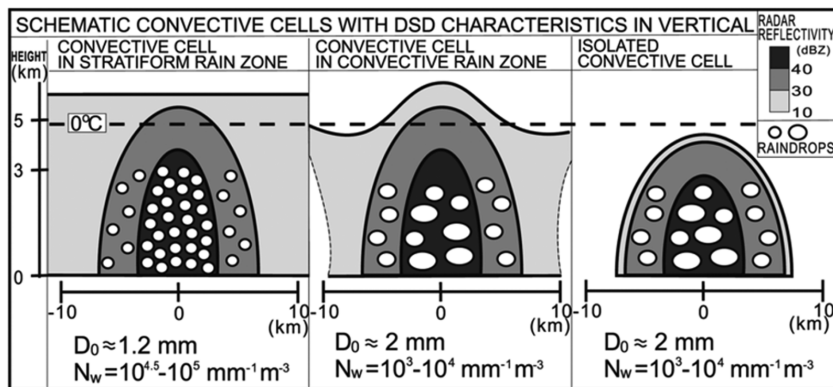
국내 강수물리 과정에 대한 연구는 상당히 부족한 실정이다. Kim (1991)은 대기 조건이 다른 지역에서 강수 발달은 구름이 성장하는 성장 조건의 변화와 지리적 환경으로 설명할 수 있으며, 온난우 발달은 구름의 기저에서 0°C 고도까지 구름층의 두께, 상승기류, 응결핵의 물리적 특성에 의해 좌우됨을 분석하였다. 또한 열대 적운 발달시 용해층 고도 위와 아래 모두에서 강수입자가 발생할 수 있으며, 두 층 간의 상호작용에 대한 고려가 열대 적운의 전반적인 강수발달 과정을 이해하기 위해 필요함을 기술하였다(Kim et al., 1995).

이후 국내에서 빗방울 크기분포가 관측이 가능해짐에 따라 이를 이용하여 강수물리 과정을 이해하려는 노력들이 있었다. 강수계를 대류/층운형 강수로 나누거나 장마전선/저기압 같은 종관형태(Cha et al., 2010; Jwa et al., 2021)로 구분하여 입자 크기분포를 조사하였다. 서울에서 Parsivel로 관측한 입자 크기분포에서, 층운형 강수는 작은 평균 입자크기와 급한 기울기, 대류성 강수는 큰 평균 입자크기와 완만한 기울기를 가지며 혼합 강수는 가장 큰 수농도를 가진다. 또한 종관적으로는 장마전선에서 얼음 강수물리 과정이 더 활발하게 발생하기 때문에, 저기압보다 큰 질량가중 평균 입자크기, 큰 반사도 값과 완만한 기울기의 입자 크기분포를 보였다(Jwa et al., 2021).

또한 연직지향레이더로 관측한 강수의 연직구조를 이용하여 강수물리 과정을 파악하고 이를 지상에서 관측한 입자 크기분포와 연결하고자 하였다(Lee et al.,

2007). 상고대화와 부착이 동시에 나타났을 때 좁은 빗방울 크기분포가 관측되며 반사도의 증가에 따라 작은 입자는 감소하고 큰 입자는 증가함을 보였다. 이후 상고대화가 증가함에 따라 입자 크기분포가 넓어지면서 수농도 또한 증가하였다. 또한 Lee et al. (2007)은 입자 크기분포의 적률을 이용하여 특성 수농도,  $N_0'$ , 특성 입자크기,  $D_m'$ 를 정의하고 스케일링 입자 크기분포(Lee et al., 2004)를 도입하였다. 상고대화와 부착이 동시에 존재할 경우,  $N_0'$ 와  $D_m'$ 이 모두 작고, 상승기류가 강해지면서  $N_0'$ 가 급격히 증가함을 보였으며 스케일링된 입자 크기분포가 유사함을 밝혔다. Kim et al. (2011)은 약한 밝은띠(약한 상승기류) 기간 동안은 강화된 충돌·병합에 의하여  $D_m'$ 이 증가하고, 강한 밝은띠가 존재할 경우에는 강한 하강기류가 존재하며 하층에서 빗방울의 깨짐(breakup)과 증발에 의해 고도가 하강함에 따라  $Z$ 와  $D_m'$ 이 감소함을 보였다. 밝은띠가 존재하지 않는(상승기류 존재) 경우  $R-D_m'$  사이에는 양의 관계가 존재함을 보였다. 태풍 콤파스 사례에 대한 분석에서도 내/외부 강수밴드에서는 부착 과정이 활발하여  $D_m'$ 이 가장 크게 관측되었고 태풍의 눈에서는 상승기류( $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$ )에 의해 생산된 과냉각 수적에 의한 눈입자의 상고대화가 주요 미세물리로 분석되었다(Kim et al., 2013).

이중편파레이더를 이용한 입자 크기분포 추정이 가능해지면서 강수 셀에 대한 강수물리과정 해석이 가능하게 되었다(Oue et al., 2011; Wang et al., 2022). 온난 강수물리 과정이 주로 발생한 대류 셀 중에서, 층운 내 대류 셀은  $D_m'$ 이 작고  $N_w$ 가 크게 나타났다. 이는 구름입자에서 작은 빗방울로의 성장에 따라 반사도가 증가함을 나타낸다. 반면 고립 대류 셀과 적운 영역 내 대류 셀은  $D_m'$ 이 크고  $N_w$ 가 작게 나타났다



**Fig. 7.** Schematic diagram of rain drop properties of each of convection cells: convective cell in stratiform rain zone (left), convective cell in convective rain zone (center), and isolated convective cell (right) formed by warm rain process. From Oue et al. (2011).

다(Fig. 7). 이는 빗방울의 충돌·병합과정이 낮은 고도에서 우세하였음을 나타낸다(Oue et al., 2011). 또한 강한 호우 사례 시에 빗방울에 의한 구름입자의 수집이 강한 강수 유발에 중요한 원인임을 보였다(Wang et al., 2022).

강설 시 강수물리과정에 대한 연구는 주로 대관령 및 강릉 지역을 중심으로 이루어졌다(Seo et al., 2015; Kim et al., 2021a, b). 2017~2018년에 수행되었던 평창 동계올림픽 국제공동관측 자료를 이용하여 강수계의 종관패턴(한랭저기압, 온난저기압, 기단변질형)에 따라 산악-해안지역(용평-대관령-강릉)에서 강수대의 연직 두께와 강수물리과정의 뚜렷한 차이가 존재하며(Kim et al., 2021), 특히 강릉에서는 70%의 눈 결정이 나뭇가지상(dendrite)이며 구름이 두꺼워짐에 따라 상고대 입자가 증가하였다.

## 7. 요약

본 문헌 검토 논문에서는 대기물리 분야를 편의상 대기복사, 대기 에어로졸, 구름물리 관측 및 실험, 구름모델링, 강수물리로 나누어 각 분야에서 1963년 한국기상학회가 발족된 이후 지난 60년간 역사적으로 어떠한 학술적인 발전을 이루어왔는지를 검토하였다. 대기복사 분야에서는 주로 복사관측과 복사이론 연구에 꾸준한 발전을 이루어왔으나 상대적으로 학회 회원들의 활동이 저조했다고 할 수 있다. 대기 에어로졸과 구름물리 분야는 기후변화 인자로서의 에어로졸의 역할과 그 중요성이 부각되면서 많은 연구가 이루어졌다. 다양한 첨단 에어로졸 관측장비를 이용한 관측, 기상관측 전용항공기의 도입과 이를 이용한 에어로졸 연직분포 관측, 구름 속의 구름입자 직접 관측 등이 가능해졌고, 여러 국제 공동 에어로졸/구름 관측 캠페인에 주도적으로 참여하여 의미 있는 연구결과를 발표하고 있으며, 구름모델링 분야에서는 구름과정 모수화 연구에 학회 회원들의 기여가 두드러졌다. 또한 지상 원격탐사 장비를 이용한 강수입자 특성과 강수물리 과정에 대한 연구도 매우 활발히 이루어졌다. 2022년 초에는 국립기상과학원이 구름챔버 제작을 완성하여 현재 세계적으로도 드물게 이루어지고 있는 구름챔버를 이용한 구름물리, 인공강수 연구를 시작할 수 있게 되었다. 이러한 선도적 활동을 발판으로 향후에는 한국기상학회 회원들이 대기물리 분야에서 세계 기상학계를 이끌어 가는 커다란 발전을 이룰 것으로 전망해 본다.

## 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한

국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2021R1A2B5B02002458, No. NRF-2020R1A2C1013278, No. NRF-2017R1D1A1B06032548, No. NRF-2021R1A4A1032646)임.

## REFERENCES

- Ahmed, T., H.-G. Jin, and J.-J. Baik, 2020: A physically based raindrop-cloud droplet accretion parametrization for use in bulk microphysics schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 3368-3383, doi: 10.1002/qj.3850.
- Bae, M.-S., and Coauthors, 2019: Chemical characteristics of size-resolved aerosols in coastal areas during KORUS-AQ campaign; comparison of ion neutralization model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 387-399, doi: 10.1007/s13143-018-00099-1.
- Bae, S. Y., S.-Y. Hong, and W.-K. Tao, 2019: Development of a single-moment cloud microphysics scheme with prognostic hail for the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 233-245, doi: 10.1007/s13143-018-0066-3.
- Bang, W.-B., G. Lee, A. Ryzhkov, T. Schuur, and K.-S. S. Lim, 2020: Comparison of microphysical characteristics between the Southern Korean Peninsula and Oklahoma using two-dimensional video disdrometer data. *J. Hydrometeor.*, **21**, 2675-2690, doi: 10.1175/JHM-D-20-0087.1.
- 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 Meteor. Soc.*, **43**, 77-85.
- \_\_\_\_\_, K.-H. Chang, S. S. Yum, Y.-J. Choi, J.-Y. Jeong, J.-W. Jung, H.-Y. Yang, J.-Y. Bae, and S.-Y. Kang, 2010: Analysis of observational cases measured by MRR and PARSIVEL disdrometer for understanding the physical characteristics of precipitation. *Atmosphere*, **20**, 37-47.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2019: Analysis of results and techniques about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea. *Atmosphere*, **29**, 531-540, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.481.
- \_\_\_\_\_, and S. S. Yum, 2021: Characteristics of precipitation particles measured by PARSIVEL disdrometer at a mountain and a coastal site in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 261-276, doi: 10.1007/s13143-020-00190-6.
- Chae, S., K.-H. Chang, S.-K. Seo, J.-Y. Jeong, B.-J. Kim,

- C.-K. Kim, S. S. Yum, and J. Kim, 2018: Numerical simulations of airborne glaciogenic cloud seeding using the WRF model with the modified Morrison scheme over the Pyeongchang region in the winter of 2016. *Adv. Meteor.*, 2018, Article ID8453460, doi: 10.1155/2018/8453460.
- Chang, K.-H., and Coauthors, 2007: Cloud physics observation system (CPOS) and validation of its products. *Atmosphere*, **17**, 101-108.
- Cho, C., and Coauthors, 2019: Observation-based estimates of the mass absorption cross-section of black and brown carbon and their contribution to aerosol light absorption in East Asia. *Atmos. Environ.*, **212**, 65-74, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.05.024.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2021: Light-absorption enhancement of black carbon in the Asian outflow inferred from airborne SP2 and in-situ measurements during KORUS-AQ. *Sci. Total Environ.*, **773**, 145531, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145531.
- Cho, H. K., 1968: Radiation balance over Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **4**, 8-12 (in Korean only).
- \_\_\_\_\_, 1975: A Study on the solar radiation in Korea by the rate of sunshine. *J. Yonsei Soc.*, **12** (in Korean only).
- \_\_\_\_\_, 1981: The variation of atmospheric turbidity in Seoul. *J. Korean Meteor. Soc.*, **17**, 1-21.
- \_\_\_\_\_, T. Y. Lee, K. T. Lee, and B. Y. Lee, 1988: A model for the direct solar spectral irradiance at the earth's surface on clear days. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 58-71 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, S. M. Lee, and C. Y. Choi, 1989: The Seasonal variations of total amounts of ozone at Seoul. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 272-280 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, T. Y. Lee, K. T. Lee, S. R. Chung, and M. J. Jeong, 1998: Optical properties of water cloud in the visible and infrared radiation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 282-292 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, B. Y. Lee, J. S. Lee, and S. W. Park, 2001: A seasonal climatology of erythemal ultraviolet irradiance over Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 525-539 (in Korean with English abstract).
- Cho, K.-H., D.-I. Lee, and I.-H. Yoon, 2000: Comparisons of physical characteristics of snow particles at inland and coastal areas. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 477-486.
- Choi, K. O., S. S. Yum, D. Y. Chang, J. M. Yeom, and S. S. Lee, 2020: A study of the effect of regenerated CCN on marine stratocumulus cloud development using the WRF-LES model with spectral bin micro-physics scheme. *Atmos. Res.*, **246**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105100.
- Choi, T. J., B. Y. Lee, S. J. Kim, Y. M. Park, and Y. J. Yoon, 2006: The characteristics of Radiation, Temperature and Wind Direction around King Sejong Station, Antarctica. *Korean Geophys. Soc.*, **9**, 397-408 (in Korean with English abstract).
- Chou, M.-D., and K. T. Lee, 1996: Parameterization for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1203-1208, doi: 10.1175/1520-0469(1996)053<1203:PFTAOS>2.0.CO;2.
- \_\_\_\_\_, M. J. Suarez, C.-H. Ho, M. M.-H. Yan, and K. T. Lee, 1998: Parameterizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models. *J. Climate*, **11**, 201-214.
- \_\_\_\_\_, K. T. Lee, S. C. Tsay, and Q. Fu, 1999: Parameterization for cloud longwave scattering for use in atmospheric models. *J. Climate*, **12**, 159-169, doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<0159:PFCLSF>2.0.CO;2.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and P. Yang, 2002: Parameterization of shortwave cloud optical properties for a mixture of ice particle habits for use in atmospheric models. *J. Geophys. Res.*, **107**, 1-9.
- \_\_\_\_\_, C. C. Yu, W. L. Lee, C. J. Shiu, K. T. Lee, I. S. Zo., J. B. Jee, and B. Y. Kim, 2020: A new k-distribution scheme for clear-sky radiative transfer calculations in the Earth atmosphere: 1. Thermal infrared (longwave) radiation. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 2237-2256, doi: 10.1175/JAS-D-19-0088.1.
- \_\_\_\_\_, K. T. Lee, I. S. Zo., W. L. Lee, C. J. Shiu, and J. B. Jee, 2021: A New k-Distribution Scheme for Clear-Sky Radiative Transfer Calculations in Earth's Atmosphere. Part II: Solar (Shortwave) Heating due to H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 2657-2675, doi: 10.1175/JAS-D-20-0278.1.
- Han, J., and H.-L. Pan, 2011: Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Wea. Forecasting*, **26**, 520-533, doi: 10.1175/WAF-D-10-05038.1.
- Han, J.-Y., S.-Y. Hong, K.-S. S. Lim, and J. Han, 2016: Sensitivity of a cumulus parameterization scheme to precipitation production representation and its impact on a heavy rain event over Korea. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2125-2135, doi: 10.1175/MWR-D-15-0255.1.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and Y. C. Kwon, 2020: The performance of a revised simplified Arakawa-Schubert (SAS) convection scheme in the medium-range forecasts of the

- Korean Integrated Model (KIM). *Wea. Forecasting*, **35**, 1113-1128, doi: 10.1175/WAF-D-19-0219.1.
- Heo, B.-H., and K.-E. Kim, 2001: A comparison of terminal velocity-drop size relationships to estimate drop size distribution from Doppler radar spectra. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 143-168.
- Hong, G. M., and B. C. Choi, 2006, Characteristics of Erythral Ultraviolet Irradiance operating at Korea Meteorological Administration, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **22**, 223-233 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF-single moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2018: The Korean Integrated Model (KIM) system for global weather forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 267-292, doi: 10.1007/s13143-018-0028-9.
- Hudson, J. G., and S. S. Yum, 2002: Cloud condensation nuclei spectra and polluted and clean clouds over the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, **107**, 8022, doi: 10.1029/2001JD000829.
- Jang, M., D.-I. Lee, and C.-H. You, 2004: Z-R relationship and DSD analysis using a POSS disdrometer Part 1: Precipitation cases in Busan, 2001. *Korean J. Atmos. Sci.*, **40**, 557-570.
- Jeon, J. B., W. H. Lee, I. S. Zo, and K. T. Lee, 2011, Correction of one-layer solar radiation model by multi-layer line-by-line solar radiation model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **21**, 151-162, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.2.151 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, B. Y. Kim, K. T. Lee, M. S. Yoo, Y. J. Lee, and J. P. Jang, 2019, Calibration of pyranometer with solar radiation intercomparison observation at Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **40**, 135-148, doi:10.5467/JKES.2018.40.2.135.
- Jin, H.-G., H. Lee, and J.-J. Baik, 2019: A new parameterization of the accretion of cloud water by graupel and its evaluation through cloud and precipitation simulations. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 381-400, doi: 10.1175/JAS-D-18-0245.1.
- \_\_\_\_\_, and J.-J. Baik, 2020: A new parameterization of the accretion of cloud water by snow and its evaluation through simulations of mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 2885-2903, doi: 10.1175/JAS-D-19-0326.1.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, H. Lee, and T. Ahmed, 2022: A new warm-cloud collection and breakup parameterization scheme for weather and climate models. *Atmos. Res.*, **272**, 106145, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106145.
- Joung, C. H., 1968: Some experiments on freezing of rain-drop size water-drops. *J. Korean. Meteor. Soc.*, **4**, 19-22.
- Jwa, M., H.-G. Jin, J. Lee, S. Moon, and J.-J. Baik, 2021: Characteristics of raindrop size distribution in Seoul, South Korea according to rain and weather types. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 605-617, doi: 10.1007/s13143-020-00190-6.
- Kim, B.-G. Kim, M.-G., T.-Y. Kwon, G.-M. Park, Y.-D. Han, S.-B. Kim, and K.-H. Chang, 2015: Observation and understanding of snowfall characteristics in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **31**, 461-472, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.461.
- Kim, C.-K., S. S. Yum, S.-N. Oh, J.-C. Nam, and K.-H. Chang, 2005: A feasibility study of winter orographic cloud seeding experiments in the Korean Peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 997-1014.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2010: Local meteorological and synoptic characteristics of the fogs formed over Incheon International Airport in the west coast of Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 761-776, doi: 10.1007/s00376-009-9090-7.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2012a: Marine boundary layer structure for the sea fog formation off the west coast of the Korean Peninsula. *Pure Appl. Geophys.*, **169**, 1121-1135, doi: 10.1007/s00024-011-0325-z.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2012b: A numerical study of sea fog formation over cold sea surface using a one-dimensional turbulence model coupled with the Weather Research and Forecasting Model. *Bound.-Layer Meteor.*, **143**, 481-505, doi: 10.1007/s10546-012-9706-9.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2013: A study on the transition mechanism of stratus cloud in fog over warm sea surface using a single column model coupled with WRF. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 245-257, doi: 10.1007/s13143-013-0024-z.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and Y.-S. Park, 2016: A numerical study of winter orographic seeding experiments in Korea using the Weather Research and Forecasting model. *Meteor. Atmos. Phys.*, **128**, 23-38, doi: 10.1007/s00703-015-0402-4.
- Kim, D.-K., Y.-H. Kim, and D.-E. Chang, 2011: A study of microphysical properties within a precipitation system using wind profiler spectra. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 413-420, doi: 10.1007/s13143-011-0026-7.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and K.-Y. Chung, 2013: Vertical structure and microphysical characteristics of typhoon Kompasu (2010) at landfall. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*,

- 49, 161-169, doi: 10.1007/s13143-013-0017-y.
- Kim, D.-S., K.-S. S. Lim, K. Kim, and G. Lee, 2020: Effects of the realistic description for the terminal fall velocity-diameter relationship of raindrops on the simulated summer precipitation over South Korea. *Atmosphere*, **30**, 421-437, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.4.421 (in Korean with English abstract).
- 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.
- \_\_\_\_\_, M.-K. Suk, H.-S. Park, G.-W. Lee, and J.-S. Ko, 2016: Dual-polarization radar rainfall estimation in Korea according to raindrop shapes obtained by using a 2-D video disdrometer. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 3863-3878, doi: 10.5194/amt-9-3863-2016, 2016.
- Kim, J. H., S. S. Yum, Y.-G. Lee, and B.-C. Choi, 2009: Ship measurements of submicron aerosol size distributions over the Yellow Sea and the East China Sea. *Atmos. Res.*, **93**, 700-714.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, S. Shim, S.-C. Yoon, J. G. Hudson, J. Park, and S.-J. Lee, 2011: On aerosol hygroscopicity, cloud condensation nuclei (CCN) spectra and critical supersaturation measured at two remote islands of Korea between 2006 and 2009. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 12627-12645, doi: 10.5194/acp-11-12627-2011.
- \_\_\_\_\_, M. Park, S. Shim, and S. S. Yum, 2012: On the contrast of aerosol size distribution and cloud condensation nuclei concentrations between the east and the west of the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **22**, 87-96, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.1.087.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, S. Shim, W. J. Kim, M. Park, J. Kim, M. Kim, and S. C. Yoon, 2014: On the submicron aerosol distributions and CCN number concentrations in and around the Korean Peninsula. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 8763-8779, doi: 10.5194/acp-14-8763-2014.
- Kim, K., W. Bang, E.-C. Chang, F. J. Tapiador, C.-L. Tsai, E. Jung, and G. Lee, 2021: Impact of wind pattern and complex topography on snow microphysics during International Collaborative Experiment for PyeongChang 2018 Olympic and Paralympic winter games (ICE-POP 2018). *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 11955-11978, doi: 10.5194/acp-21-11955-2021.
- Kim, K.-E., 1991: Physical factors affecting warm rain development. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 325-332.
- \_\_\_\_\_, D.-I. Lee, J.-G. Park, and S.-G. Park, 1995: Formation and precipitation development of tropical cumuli observed by single Doppler radar. *Atmosphere*, **31**, 363-372.
- \_\_\_\_\_, B.-H. Heo, and Y. Shibagaki, 2000: The retrieval of raindrop size distributions from VHF radar Doppler spectra using an iterative deconvolution technique. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 87-104.
- Kim, N., and Coauthors, 2017: Hygroscopic properties of urban aerosols and their cloud condensation nuclei activities measured in Seoul during the MAPS-Seoul campaign. *Atmos. Environ.*, **153**, 217-232, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.034.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2018: Impact of urban aerosol properties on cloud condensation nuclei (CCN) activity during the KORUS-AQ field campaign. *Atmos. Environ.*, **185**, 221-236, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.05.019.
- \_\_\_\_\_, S. S. Yum, M. Park, J. S. Park, H. J. Shin, and J. Y. Ahn, 2020: Hygroscopicity of urban aerosols and its link to size-resolved chemical composition during spring/summer in Seoul, Korea. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 11245-11262, doi: 10.5194/acp-20-11245-2020.
- Kim, S. S., 1969: Some comments on the results of worldwide measurements of ice nucleus concentrations. *J. Korean Meteor. Soc.*, **5**, 23-34.
- Kim, S.-W., J. Heo, and J.-U. Park, 2021: Relationship between submicron particle formation and air mass history observed in the Asian continental outflow at Gosan, Korea, during 2008-2018. *Air Qual. Atmos. Health*, **14**, 291-300, doi: 10.1007/s11869-020-00934-3.
- Kim, W., and S. S. Yum, 2015: Development and validation of the coupled system of unified model and PArmeterized FOG (PAFOG). *Atmosphere*, **25**, 149-154, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.1.149.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and C. K. Kim, 2020a: Numerical simulation of sea fog over the Yellow Sea: Comparison between UM+PAFOG and WRF+PAFOG coupled systems. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 89-105, doi: 10.1007/s13143-019-00134-9.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, J. Hong, and J. I. Song, 2020b: Improvement of fog predictability by the nudging of a meteorological tower data in the WRF and PAFOG coupled model. *Atmosphere*, **11**, 311, doi: 10.3390/atmos11030311.
- Kim, Y., S.-C. Yoon, S.-W., K.-Y. Kim, H.-C. Lim, and J. Ryu, 2013: Observation of new particle formation and growth events in Asian continental outflow. *Atmos. Environ.*, **64**, 160-168, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.057.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, M.-H. Kim, and K.-H. Park, 2014a: 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.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2014b: Observation of new particle formation and growth under cloudy conditions at Gosan Climate Observatory, Korea. *Meteor. Atmos. Phys.*, **126**, 81-90, doi: 10.1007/s00703-014-0336-2.
- Kim, Y. A., and W. K. Choi, 2017, A Study on the Monthly Characteristics of Solar UV Radiation in Gosan, Jeju. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 291-300, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.3.291 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-C., S.-M. Lee, and G.-B. Jin, 1990: The effects of ambient wind on warm cloud development. *J. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 178-191.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1991: The role of the liquid drop size distribution and ambient wind in precipitation development. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 301-309.
- Kim, Y.-J., B.-G. Kim, J.-K. Shim, and B.-C. Choi, 2018: Observation and numerical simulation of cold clouds and snow particles in the Yeongdong region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 499-510, doi: 10.1007/s13143-018-0055-6.
- Kruger, A., and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer: A description. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 602-617, doi: 10.1175/1520-0426(2002)019<0602:TDVDAD>2.0.CO;2.
- Kwak, M. K., and J. H. Kim, 2011, The Radiative Characteristics of EUV-B over the Korean Peninsula and Exposure Time for Synthesizing Adequate Vitamin D. *J. Korean Meteor. Soc.*, **21**, 123-130, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.1.123 (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.
- \_\_\_\_\_, G. Lee, and G. Kim, 2015b: Rainfall estimation from an operational S-band dual-polarization radar: Effect of radar calibration. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 65-79, doi: 10.2151/jmsj.2015-005.
- Kwon, Y.-C., and S.-Y. Hong, 2017: A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 583-598, doi: 10.1175/MWR-D-16-0034.1.
- La, I., S. S. Yum, J. Yeom, and R. Shaw, 2022: Influence of entrainment on centimeter-scale cloud microphysics in marine stratocumulus clouds observed during CSET, *J. Atmos. Sci.*, **79**, 2935-2948, doi: 10.1175/JAS-D-22-0005.1.
- Lee, C., K.-H. Chang, J.-W. Jung, J.-W. Cha, Y.-J. Choi, and K. Kim, 2011: Strategy for the meteorological and environmental airborne observations over the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 91-96.
- Lee, C.-K., G. W. Lee, and K.-E. Kim, 2007: Variability of the rain drop size distributions within a storm. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 1-16.
- Lee, G., I. Zawadzki, W. Szyrmer, D. Sempere-Torres, and R. Uijlenhoet, 2004: A general approach to double-moment normalization of drop size distributions. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 264-281.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2005: Variability of drop size distributions: Time-scale dependence of the variability and its effects on rain estimation. *J. Appl. Meteorol.*, **44**, 241-255.
- Lee, H., and S. S. Yum, 2012: Implementation of improved ice particle collision efficiency in Takahashi cloud model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 73-85, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.1.073.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and S.-S. Lee, 2014: A modeling study of the aerosol effects on ice microphysics in convective cloud and precipitation development under different thermodynamic conditions. *Atmos. Res.*, **145-146**, 112-129, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.03.022.
- Lee, H., and J.-J. Baik, 2016: Effects of uncertainty in graupel terminal velocity on cloud simulation. *Atmosphere*, **26**, 435-444 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2017: A physically based autoconversion parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 1599-1616, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.3.435.
- \_\_\_\_\_, A. M. Fridlind, and A. S. Ackerman, 2019: An evaluation of size-resolved cloud microphysics scheme numerics for use with radar observations. Part I: Collision-coalescence. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 247-263, doi: 10.1175/JAS-D-20-0213.1.
- Lee, H. K., J. B. Jee, J. S. Min, S. G. Kim, and J. H. Chae, 2018: Analysis of Meteorological and Radiation Characteristics using WISE Observation Data. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **39**, 89-102, doi: 10.5467/JKESS.2018.39.1.89 (in Korean with English abstract).
- Lee, N.-Y., 1986: An experimental study of the brake effect of compensating motions on warm cloud development. *J. Korean Meteor. Soc.*, **22**, 1, 23-41.
- \_\_\_\_\_, and S.-M. Lee, 1986: A computation of the evolution of cloud drop size distribution by condensation-evaporation process. *J. Korean Meteor. Soc.*, **22**, 2, 28-34.
- Lee, S., and Coauthors, 2012: Spectral dependency of light



- scattering/absorption and hygroscopicity of pollution and dust aerosols in Northeast Asia. *Atmos. Environ.*, **50**, 246-254, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.12.026.
- Lee, S.-C., J. H. Kim, S. S. Yum, C. Cho, and K. H. Ahn, 2007: Atmospheric aerosol hygroscopicity measurements with H-TDMA. *Particle and Aerosol Res.*, **3**, 95-103.
- Lee, S. J. and H. K. Cho, 1980: Spectral Distribution of Direct Solar Radiation and Integral Atmospheric Turbidity. *J. Korean Meteor. Soc.*, **16**, 10-16 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-M., 1984: Numerical computation of cloud droplet growth by collision and coalescence process. *J. Korean Meteor. Soc.*, **20**, 53-59.
- \_\_\_\_\_, 1992: A second pulsation in cumulus cloud development. *J. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 455-463.
- \_\_\_\_\_, S. Kim, T.-Y. Lee, and H.-Y. Chun, 2000: Effects of ice particles on the development of precipitation in deep convective clouds. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 141-152.
- Lee, S.-S., T.-Y. Lee, S.-M. Lee, and S.-Y. Hong, 2001: The effects of nucleation rate of cloud ice on the development of cloud and precipitation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 239-251.
- Lee, Y. M., J. H. Bae, and J. K. Park, 2017: A Study on Prediction Techniques through Machine Learning of Real-time Solar Radiation in Jeju. *J. Environ. Sci. Int.*, **26**, 521-527, doi: 10.5322/JESI.2017.26.4.521 (in Korean with English abstract).
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612, doi: 10.1175/2009MWR2968.1.
- \_\_\_\_\_, 2019: Bulk-type cloud microphysics parameterization in atmospheric models. *Atmosphere*, **29**, 227-239, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.2.227 (in Korean with English abstract).
- Lim, S., M. Lee, S.-W. Kim, S.-C. Yoon, G. Lee, and Y. Lee, 2014: Absorption and scattering properties of organic carbon versus sulfate dominant aerosols at Gosan climate observatory in Northeast Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 7781-7793, doi: 10.5194/acp-14-7781-2014.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and P. Laj, 2018: Sulfate alters aerosol absorption properties in East Asian outflow. *Sci. Rep.*, **8**, 1-7, doi: 10.1038/s41598-018-23021-1.
- Lim, Y.-K., J. Kim, H. C. Lee, S.-S. Lee, J.-W. Cha, and S. B. Ryoo., 2019: Aerosol physical characteristics over the yellow sea during the KORUS-AQ field campaign: Observations and air quality model simulations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 629-640, doi: 10.1007/s13143-018-00100-x.
- Liu, Y., P. Daum, and S. S. Yum, 2008: Ship tracks revisited: new understanding and cloud parameterization. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 1-9.
- Löffler-Mang, M., and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeor. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **17**, 130-139.
- Marshall, J. S., and W. Mck. Palmer, 1948. The distribution of raindrop size. *J. Atmos. Sci.*, **5**, 165-166.
- Min, K. D., 1966: The rate of temperature variation of falling raindrops through air. *J. Korean Meteor. Soc.*, **2**, 11-16.
- Moon, J.-Y., D.-K. Kim, Y.-H. Kim, J.-C. Ha, and K.-Y. Chung, 2013: Analysis of summer rainfall case over southern coast using MRR and PARSIVEL disdrometer measurements in 2012. *Atmosphere.*, **23**, 265-273, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.3.265.
- Nam, K. Y., S. B. Ryoo, W. T. Kwon, and J. K. Kim, 2002, The influences of the temperature and geopotential height fields according to the expanded radiation grid in GDAPS. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **38**, 421-429 (in Korean with English abstract).
- Noh, Y., D. Oh, F. Hoffmann, and S. Raasch, 2018: A cloud microphysics parameterization for shallow cumulus clouds based on Lagrangian cloud model simulations. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 4031-4047, doi: 10.1175/JAS-D-18-0080.1.
- Oh, S. N., and H. K. Cho, 1975: Secular and seasonal variations of atmospheric turbidity at Seoul. *J. Korean Meteor. Soc.*, **11**, 31-40.
- Oue, M., H. Uyeda, and D.-I. Lee, 2011: Raindrop size distribution parameters estimated from polarimetric radar variables in convective cells around Okinawa Island during the Baiu period. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 33-44, doi: 10.1007/s13143-011-1003-x.
- Park, D.-H., and Coauthors, 2021: Boundary layer versus free tropospheric submicron particle formation: A case study from NASA DC-8 observations in the Asian continental outflow during the KORUS-AQ campaign. *Atmos. Res.*, **264**, 105857, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105857.
- Park, J.-U., H.-J. Kim, J. Choi, J.-S. Park, J. Heo, and S.-W. Kim, 2021: Observation of aerosol size distribution and new particle formation under different air masses arriving at the northwesternmost South Korean island in the Yellow Sea. *Atmos. Res.*, **255**, 105537,

- doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105537.
- Park, M., Yum, S. S., Kim, J. H., 2015: Characteristics of submicron aerosol number size distribution and new particle formation events measured in Seoul, Korea, during 2004–2012. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 1-10, doi: 10.1007/s13143-014-0055-0.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, N. Kim, J. W. Cha, and S. B. Ryoo, 2016: Characteristics of aerosol and cloud condensation nuclei concentrations measured over the Yellow Sea on a meteorological research vessel, Gisang 1. *Atmosphere*, **26**, 243-256, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.2.243.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, B. Shin, and S. B. Ryoo, 2018: Characterization of submicron aerosols and CCN measured over the Yellow sea onboard the Gisang 1 research vessel using the positive matrix factorization analysis method. *Atmos. Res.*, **214**, 430-441, doi: 10.1016/j.atmosres.2018.08.015.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, B. E. Anderson, A. Beyersdorf, and K. L. Thornhill, 2020: On the submicron aerosol distributions and CCN activity in and around the Korean Peninsula measured onboard the NASA DC-8 research aircraft during the KORUS-AQ campaign. *Atmos. Res.*, **243**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105004.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2021: Characterization of submicron aerosols over the Yellow Sea measured onboard the Gisang 1 research vessel in 2018-2019 spring. *Environ. Pollut.*, **284**, 117180, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117180.
- Park, R. J., M. J. Kim, J. I. Jeong, D. Youn, and S. Kim, 2010: A contribution of brown carbon aerosol to the aerosol light absorption and its radiative forcing in East Asia. *Atmos. Environ.*, **44**, 1414-1421, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.01.042.
- Park, S., 2014: A unified convection scheme (UNICON). Part I: Formulation. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3902-3930, doi: 10.1175/JAS-D-13-0233.1.
- Schmale, J., and Coauthors, 2018: Long term cloud condensation nuclei number concentration, particle number size distribution, and chemical composition measurements at regionally representative observatories. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 2853-2881, doi: 10.5194/acp-18-2853-2018.
- Seo, W.-S., and Coauthors, 2015: Study on characteristics of snowfall and snow crystal habits in the ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) campaign in 2014. *Atmosphere*, **25**, 261-270, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.2.261.
- Sheppard, B. E., 1990: Measurement of raindrop size distributions using a small Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 255-268, doi: 10.1175/1520-0426(1990)007<0255:MORSDU>2.0.CO;2.
- Shin, J., and S. Park, 2020: A stochastic unified convection scheme (UNICON). Part I: Formulation and single-column simulation for shallow convection. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 583-610, doi: 10.1175/JAS-D-19-0117.1.
- Song, H.-J., and B.-J. Sohn, 2018: An evaluation of WRF microphysics schemes for simulating the warm-type heavy rain over the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 225-236, doi: 10.1007/s13143-018-0006-2.
- Song, K. Y., and S. S. Yum, 2004: Maritime-continental contrasts of cloud microphysical during ACE-Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 531-540.
- Song, M., M. Lee, J. H. Kim, S. S. Yum, G. Lee, and K.-R. Kim, 2010: New particle formation and growth in relation to vertical mixing and chemical species during ABC-EAREX2005. *Atmos. Res.*, **97**, 359-370, doi: 10.1016/j.atmosres.2010.04.013.
- Tokay, A., and D. Short, 1996: Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. *J. Appl. Meteorol.*, **35**, 355-371.
- Um, J., and Coauthors, 2018: Microphysical characteristics of frozen droplet aggregates from deep convective clouds. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 16915-16930, doi: 10.5194/acp-18-16915-2018.
- \_\_\_\_\_, 2020: Calculations of optical properties of cloud particles to improve the accuracy of forward scattering probes for in-situ aircraft cloud measurements. *Atmosphere*, **30**, 75-89, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.1.075.
- \_\_\_\_\_, S. Jang, J. Kim, S. Park, H. Jung, S. Han, and Y. Lee, 2021: Calculations of the single-scattering properties of non-spherical ice crystals: Toward physically consistent cloud microphysics and radiation. *Atmosphere*, **31**, 113-141, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.1.113.
- Wang, H., J. Yin, N. Wu, and W. Ding, 2021: Microphysical Structures of an Extreme Rainfall Event Over the Coastal Metropolitan City of Guangzhou, China: Observation Analysis with Polarimetric Radar. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 1-14, doi: 10.1007/s13143-022-00289-y.
- Wang, J., P. H. Daum, S. S. Yum, Y. Liu, G. I. Senum, M.-L. Lu, J. H. Seinfeld, and H. Jonsson, 2009: Observations of marine stratocumulus microphysics

- and implications for processes controlling droplet spectra: result from the Marine Stratus/Stratocumulus Experiment (MASE). *J. Geophys. Res.*, **114**, D18210, doi: 10.1029/2008JD011035.
- Williams, C. R., 2002: Simultaneous ambient air motion and raindrop size distributions retrieved from UHF vertical incident profiler observations. *Radio Sci.*, **37**, 1024, doi: 10.1029/2000RS002603.
- Yang, H., and S. S. Yum, 2007: Effects of Prescribed Initial Cloud Droplet Spectra on Convective Cloud and Precipitation Developments under Different Thermodynamic Conditions: a Modeling and Observational Study. *Atmos. Res.*, **86**, 207-224.
- Yang, I. K., 1965: A preliminary survey on the seeding experiment in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **1**, 8-13.
- Yeom, J. M., S. S. Yum, Y. Liu, and C. Lu, 2017: A study on the entrainment and mixing process in the continental stratocumulus clouds measured during the RACORO campaign. *Atmos. Res.*, **194**, 89-99, doi: 10.1016/j.atmosres.2017.04.028.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, F. Mei, B. Schmid, J. Comstock, L. A. Machado, and M. A. Cecchini, 2019: Impact of secondary droplet activation on the contrasting cloud microphysical relationships during the wet and dry seasons in the Amazon. *Atmos. Res.*, **230**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104648.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2021: Vertical variation of cloud microphysical relationships for marine stratocumulus clouds observed during the ACE-ENA campaign, *J. Geophys. Res.*, **126**, 1-19, e2021JD034700, doi: 10.1029/2021JD034700.
- Yoo, J. M, and H. K. Cho, 1979: The Characteristics of the Skylight Scattering Phase Function on the Atmospheric Turbidity. *J. Korean Meteor. Soc.*, **15**, 1-9 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2007, Intercomparison of Shortwave Radiative Transfer Models for a Rayleigh Atmosphere. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **28**, 298-310 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2008: Intercomparison of Shortwave Radiative Transfer Models for Aerosol-laden Atmospheres. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **29**, 128-139.
- You, C.-H., D.-I. Lee, M. Jang, K.-J. Seo, K.-E. Kim, and B.-S. Kim, 2004: The characteristics of rain drop size distributions using a POSS in Busan area. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 713-724.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, H.-K. Kim, J.-H. Kim, and K.-E. Kim, 2005: Variation of rainrate and radar reflectivity in Busan area and its measurement by cloud type. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 191-200.
- Yum, S. S., and S.-M. Lee, 1988: A computation of cloud drop salinity in the collection process. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 36-41.
- \_\_\_\_\_, and J. G. Hudson, 2002: Maritime/continental microphysical contrasts in stratocumulus. *Tellus, Series B*, **54**, 61-73.
- \_\_\_\_\_, S.-N. Oh, J.-Y. Kim, C.-K. Kim, and J.-C. Nam, 2004: Measurements of cloud droplet size spectra using a forward scattering spectrometer probe in the Korean Peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 623-631.
- \_\_\_\_\_, 2004: Scale dependence of cloud microphysical relationships in small cumulus clouds. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 531-540.
- \_\_\_\_\_, and J. G. Hudson, 2004: Wintertime/summertime contrasts of cloud condensation nuclei and cloud microphysics over the Southern Ocean. *J. Geophys. Res.*, **109**, D06204, doi: 10.1029/2003JD003864.
- \_\_\_\_\_, J. G. Hudson, K. Y. Song, and B. Choi, 2005: Springtime cloud condensation nuclei concentrations on the west coast of the Korea. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L09814, doi: 10.1029/2005GL022641.
- \_\_\_\_\_, G. Roberts, J. H. Kim, K. Song, and D. Kim, 2007: Submicron aerosol size distributions and cloud condensation nuclei concentrations measured at Gosan, Korea during the ABC-EAREX 2005. *J. Geophys. Res.*, **112**, D22S32, doi: 10.1029/2006JD008212.
- \_\_\_\_\_, B. G. Kim, S.-W. Kim, L.-S. Chang, and S. Kim, 2011: A review of clouds and aerosols. *J. Climate Change Res.*, **2**, 253-267.
- \_\_\_\_\_, J. Wang, Y. Liu, G. Senum, S. Springston, R. McGraw, and J. M. Yeom, 2015: Cloud microphysical relationships and their implication on entrainment and mixing mechanism for the stratocumulus clouds measured during the VOCALS project. *J. Geophys. Res.*, **120**, 5047-5069, doi: 10.1002/2014JD022802.
- Zo, I. S., J. B. Jee, and K. T. Lee, 2014: Development of GWNU (Gangneung-Wonju National University) One-Layer Transfer Model for Calculation of Solar Radiation Distribution of the Korean Peninsula, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 23-32, doi: 10.1007/s13143-014-0047-0.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and B. Y. Kim, 2016a: 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.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2016b: Radiometer

measurement intercomparison using absolute cavity radiometer in regional radiometer center at Tsukuba, Japan. *New & Renewable Energy*, **12**, 5-13.

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2017: Analysis of

the Thermal Dome Effect from Global Solar Radiation Observed with a Modified Pyranometer. *Current Optics and Photonics*, **1**, 263-270.