

수치모델링과 예보

이우진* · 박래설 · 권인혁 · 김정환

(재) 차세대수치예보모델개발사업단

(접수일: 2022년 10월 23일, 수정일: 2022년 12월 26일, 게재확정일: 2022년 12월 26일)

Numerical Weather Prediction and Forecast Application

Woo-Jin Lee*, Rae-Seol Park, In-Hyuk Kwon, and Junghan Kim

Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, Korea

(Manuscript received 23 October 2022; revised 26 December 2022; accepted 26 December 2022)

Abstract Over the past 60 years, Korean numerical weather prediction (NWP) has advanced rapidly with the collaborative effort between the science community and the operational modeling center. With an improved scientific understanding and the growth of information technology infrastructure, Korea is able to provide reliable and seamless weather forecast service, which can predict beyond a 10 days period. The application of NWP has expanded to support decision making in weather-sensitive sectors of society, exploiting both storm-scale high-impact weather forecasts in a very short range, and sub-seasonal climate predictions in an extended range. This article gives an approximate chronological account of the NWP over three periods separated by breakpoints in 1990 and 2005, in terms of dynamical core, physics, data assimilation, operational system, and forecast application. Challenges for future development of NWP are briefly discussed.

Key words: Dynamical core, physics, data assimilation, operational system, forecast

1. 서론

일기예보는 컴퓨터를 이용한 수치모델링 연구와 함께 발전해왔다. 80년대만 하더라도 예보 현장에서는 무선 팩스로 일본 기상청에서 생산한 수치 예상도를 받아보고 나서야 다음 날의 일기예보를 확정할 수 있었다. 반면 오늘날에는 우리 기술로 생산된 수치 예상도를 초단기에서 주간 예보에 이르기까지 예보의 사결정에 참고한다. 태풍의 이동 경로와 강도는 물론이고, 발생 가능성을 예보하는 데에도 참고한다. 국내 수요자는 휴대용 전화기에서 동네 단위로 상세하고 정량적인 시각별 날씨 예보를 받아 본다.

수치 예측 자료의 품질도 그동안 향상되어, 지금은

세계 5~8위권을 넘나든다. 전지구적 수치예보 서비스가 본격화된 1990년부터 Fig. 1의 모델 예측 오차 추이를 보면, 연도와 계절에 따른 변동성에도 불구하고 꾸준히 줄어들었다. 2005년을 전후하여, 청천 지역 위성 복사량을 직접 동화하기 시작하였고 예측 오차도 완만하지만 감소세를 보였다. 2010년 이후에는 모델과 자료동화 기술이 빠르게 발전하면서 예측 오차 감소폭이 두드러졌다.

국내 수치예보 발전 과정은 관점에 따라 다양하게 나누어 볼 수 있으나, 본고에서는 모델 예측 오차의 추이를 참고하여 편의상 3단계로 구분하였다. 먼저 수치예보의 이론적 토대를 닦은 1989년까지의 연구 활동을 기초 연구 단계로 보았다. 둘째, 기상 전용 슈퍼컴퓨터 1호기가 설치되고, 전지구 모델이 일기예보에 전방위적으로 응용되었던 2005년까지를 기반 구축 단계로 보았다. 셋째, 수치예보 서비스 품질이 본 궤도에 올라서고 한국형 전지구 모델이 수치예보 서비스 중심에 자리잡으면서 기술 진보가 거듭되는 현재까

*Corresponding Author: Woo-Jin Lee, Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, 35, Boramae-ro 5-gil, Dongjak-gu, Seoul 07071, Korea.
Phone: +82-2-6480-6301, Fax: +82-2-6480-6497
E-mail: woojin.lee@kiaps.org

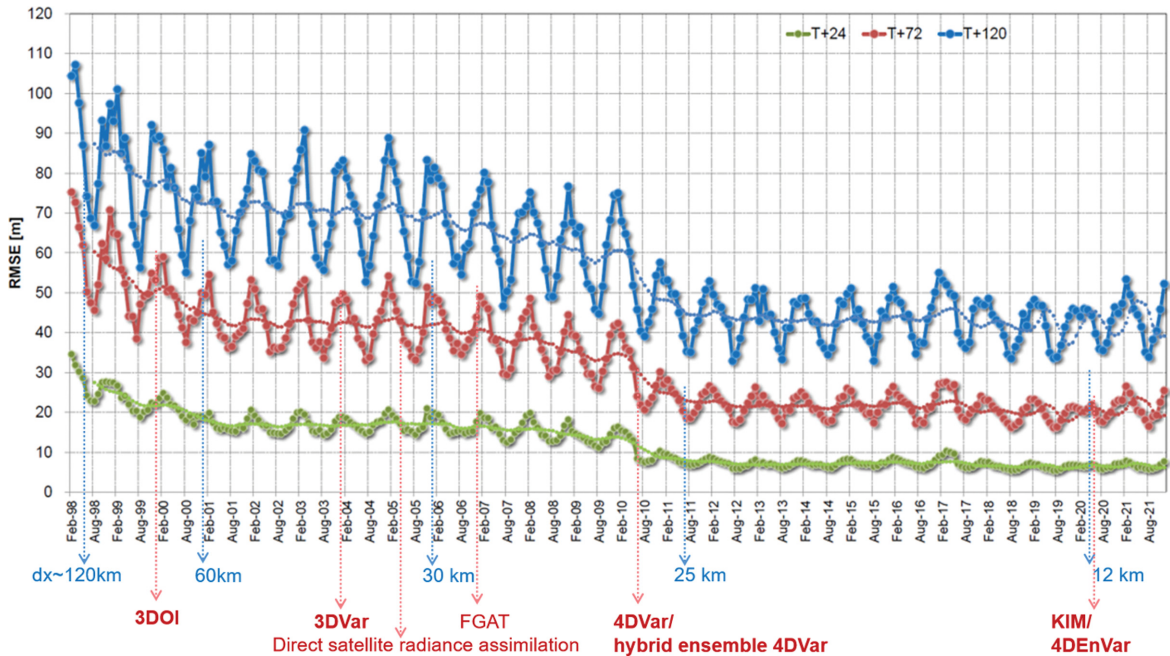


Fig. 1. Performance of operational numerical weather prediction system at Korea Meteorological Administration (KMA) during 1998~2021, in terms of root mean square error of geopotential height in the Northern Hemisphere, for the projection of 24, 72, and 120 hours (source: Numerical Modeling Center, KMA). Seasonal variability is smoothed out in dotted curves. Three break points are evident where model error starts to decrease rapidly: around 1999, 2005, and 2010. Global spectral model (JMA GSM) with horizontal resolution $dx \sim 120$ km, using univariate optimal interpolation (OI) scheme, had been in operation since 1998. Direct assimilation of satellite radiance with JMA 3DVar started since mid-2005. 4DVar started since 2010 along with the UM, and replaced by 4DVar with KIM in 2020.

지를 기술 도약 단계로 보았다.

좁은 의미의 수치예보 분야는 크게 모델링과 이를 응용한 예보 기술로 나누어진다. 모델링은 수치모델, 자료동화, 운영체제로 세분할 수 있다. 수치모델은 다시 격자규모의 보존원리를 다루는 역학코어와, 보존량의 변화를 유발하는 물리과정으로 나누어진다. 모델의 초기장을 제공하는 자료동화는 역사적으로 수치모델보다는 더디게 발전해왔다. 요즘 대부분의 모델링 센터에서 사용하는 변분 자료동화 기법은 방대한 계산량을 요구하는데, 고성능 컴퓨팅 기술이 등장하고 위성 복사량의 직접 동화가 가능해지면서 빠르게 확산되었다. 국내에서 기상위성이나 기상레이더 등 원격탐측자료의 전처리 연구 분야는 수치모델링보다 역사가 깊다. 이 중에서도 원격 탐측 복사량 자료로부터 대기 상태변수를 역추정(retrieval)하는 과정은 자료동화에서 쓰는 복사전달모델의 전처리 연산(forward operation) 과정과 원론적으로 다르지 않다. 원격탐측 자료의 전처리 과정에 대한 사항은 특별호의 원격탐측 리뷰 논문(Ahn et al., 2023)을 참고하기 바라며, 본고에서는 자료동화 기법과 모델 초기화 방법을 중

점적으로 살펴보고자 한다. 운영체제는 현장 수치예보를 지원하는 제반 기술 분야다. 관측자료 입력과정, 자료동화와 모델 계산 과정, 후처리 과정을 한데 묶어 예측 시스템을 구성하고, 이를 자동 제어하는 컴퓨팅 기술과 소프트웨어 공학 기반을 포함한다. 이 중에서 현장이나 연구 목적으로 구축된 예측 시스템의 현황과, 슈퍼컴퓨터에서 모델의 계산 효율을 높이는 병렬화 기술에 국한하여 살펴보기로 한다.

수치예보모델은 예측하려는 기간, 영역, 용도에 따라 여러 갈래로 발전해왔다. 예측 기간에 따라 초단기모델부터 기후예측모델까지 종류가 다양하고, 예측 영역에 따라서는 크게 지역모델과 전지구모델로 나누어진다. 용도별로 파고모델, 폭풍해일모델, 황사모델 등으로 특정할 수도 있다. 본고에서는 단·중기 일기예보에서 참고하는 수치모델에 주로 초점을 맞추었다. 국내 수치모델 연구 초기에는 호우·대설 등 위험 기상 위주의 일기예보 문제에서 출발했지만, 점차 기후 변화와 계절 변동을 다룬 기후 모델로 주제가 확대되었다. 동시에 대기질과 화학과정을 다루는 대기환경 모델, 도시 기상과 각종 소규모 운동계를 다루는 미

기상 모델 분야로 점차 분화하였다. 이것들은 각기 응용 분야가 다르고 모의하고자 하는 현상도 다르다고는 하지만, 자연이라는 것이 모든 것을 포괄하는 하나의 종합적인 현상이라는 점을 생각해보면, 여러 모델 분야 간에 중복적인 부분도 피할 수 없을 것이다. 비록 본고가 일기예보를 위한 수치모델을 중점적으로 살펴본다 하더라도 부득이 다른 모델 분야로 일시 넘나들기도 할 것이다.

최근 모델 개발 추세는 그간 분화해온 여러 분야의 모델을 지구시스템의 열개 안에서 하나로 통합하려는 방향으로 나아가고 있다. 대표적으로 영국기상청의 통합모델 UM은 하나의 수치 방법론으로 모든 영역의 응용 문제를 해결하고자 한다. 이러한 통합적 접근 방향은 미국 기상청, 유럽중기예보센터(ECMWF)를 비롯해서 여러 선진 모델링 센터에서도 확인할 수 있다 (예를 들면 Link et al., 2017). 지구 시스템 모델은 기후변화 연구에 활발하게 쓰이고 있지만(Randall et al., 2019), 수치예보의 초기 발전 단계에서 역학코어나 물리과정과 관련된 기후모델 연구는 본고에서 부분적으로 다룰 것이다. 또한 기후변화 시나리오를 역학적으로 규모축소화(downscaling) 하는 과정에서 지역 모델의 민감도를 살펴보는 연구도 일부 인용할 것이다.

대기환경 모델도 특별호의 대기환경 리뷰 논문(Kim et al., 2023)에서 다루고 있어서, 본고에서는 현장에서 황사 예보에 응용하는 부분만 일부 언급할 것이다. 미기상 모델 분야는 환경에 대한 사회적 관심이 커짐에 따라 연구가 확대되는 추세라는 점을 감안하면 향후 별도의 리뷰 논문이 나오기를 기대한다. 대신 본고에서는 대규모 에디 수치실험(LES)을 통해서 물리과정의 모수화 문제를 풀어나가는 연구 활동에 대해서만 부분적으로 다루고자 한다.

수치모델을 응용한 예보기술의 발전과정은 별도의 주제로 다루어야 할 만큼 내용이 방대하다. 모델을 이용한 사례 분석 연구는 70년대 후반부터 꾸준히 확대되어 왔으며, 특히 위험 기상의 대표적인 집중호우, 태풍, 대설, 국지 강풍의 분야에서 많은 연구가 있었다. 범용 중규모모델이 세계적으로 보급되면서, 이 방면의 사례 연구도 크게 늘어나는 추세다. 종관 분석과 예보의 관점에서 수치 실험과 사례 분석 연구는 별도로 다루어야 할 만큼 내용이 방대하며, 본고의 주제 범위를 넘어선다. 기후 분석의 관점에서 각종 위험기상에 대한 연구 활동은 특별호의 위험기상 리뷰 논문을 참고하기 바란다(Ho et al., 2023). 본고에서는 수치예보 응용 분야 중에서 모델 예측자료의 정량적 후처리 과정에 국한하여 살펴볼 것이다.

한편 후처리 과정은 격자점 자료의 묘화 기법(contour analysis), 예보관의 판단을 지원하는 다양한 인터페이스 도구 개발, 레이다 자료를 비롯한 국지 관측 자료

를 활용한 초단기 예측 기법, 모델 예측 자료의 편차를 보정하여 날씨 요소를 정량적으로 해석하는 기법으로 나누어 볼 수 있다. 이 중에서 묘화 기법이나 인터페이스 기술은 예보기술의 중요 항목이지만 다분히 공학적인 측면이 강해서 여기서는 다루지 않기로 한다. 초단기 예측 기법은 자료동화나 인공지능 기술을 접목하여 다양한 방식으로 진화하고 있지만, 본고에서는 이 중에서 중규모 모델을 응용하는 연구에 대해서만 부분적으로 다루기로 한다. 날씨 요소의 해석 기법은 동네예보 서비스와 관련된 통계 모델의 발전과정을 중심으로 살펴보고자 한다.

수치예보는 기상 서비스에 직접 연동되어 있는 만큼, 기상청의 현장 응용 기술과 학계의 원천 연구가 복잡하게 얽혀 있다. 따라서 양 집단의 연구 활동을 고루 반영하고자 하였다. 하지만 수치예보 발전 초기 단계에서는 현장 중심의 실용적 연구가 주류를 이루었던 만큼, 응용 기술의 관점에 다소 치우쳐 논의할 수밖에 없었다. 현장의 수치예보는 수치모델이나 자료동화 외에도 방대한 전후처리과정과 시스템 자동화 기술 기반이 필수적이다. 국내의 관측 자료를 통신망을 거쳐 수집하여 해독하고 품질을 관리하여 데이터 베이스로 정돈하는 전처리 과정과, 일기도에 날씨 기호를 기입하거나 묘화하는 후처리 과정을 자동화하는데 수많은 선행 노력과 투자가 있었기에 오늘날의 수치예보 서비스가 가능했지만, 그 상세한 발전 과정은 본고의 범위를 넘어서므로 다루지 않기로 한다.

방대한 수치예보 연구 활동을 제한된 분량으로 정리하는 과정에서 부득이하게 일부 논문만 언급할 수밖에 없었으며, 이는 저자의 제한된 지식과 부족한 식견에 따른 소치임을 미리 밝혀 두고자 한다. 또한 전문 학술지가 아니더라도 기상청의 각종 기술 노트와 학계나 연구기관의 연구 보고서에 수록된 많은 수치예보 연구 저작물에서도 중요한 실용적 연구 성과를 제시하고 있지만, 본고에서 충분히 다루지 못했다는 점도 밝혀 둔다. 본고 2장부터 4장까지는 연대기별로 각각 수치예보 발전상을 역학코어, 물리과정, 자료동화, 운영체계, 예보 응용 분야로 세분하여 기술하였다. 마지막으로 5장에서는 국제 연구 동향과 비교하면서, 수치예보에서 균형적 발전이 필요한 분야를 제시해 보았다. 국내 수치예보 연구는 빠르게 발전하여, 최근 일부 분야에서는 선진국 수준에 근접하고 있다고 볼 수 있지만 상대적으로 낙후된 분야도 없지 않아, 선진국과 기술 격차가 큰 분야에 대해서는 보다 많은 관심과 지원이 필요하기 때문이다.

2. 기초 연구(1970~1989)

수치모델을 이용하여 대기 현상을 이해하고자 했던

연구는 1980년대에 들어서며 점차 늘어나기 시작했다. 초기에는 준지균 역학을 기반으로 한 방정식을 수치적으로 풀어내는 연구가 주류를 이루었다. 순압 모델이나 다층 경압 모델을 구성하여 단기 기류 흐름을 예측하고자 시도하였다(Kim, 1983; Lee et al., 1984; Ha and Kim, 1987). 또한 오메가 방정식을 수치적으로 풀어 대기의 연직 운동계를 살펴보거나, 순압 또는 경압 대기의 역학적 불안정 구조를 진단적으로 밝히는 연구가 진행되었다(Cho and Kim, 1983; Chung and Kim, 1983).

당시 컴퓨터 자원은 매우 열악해서 정부 전자계산소의 UNIVAC 컴퓨터를 원격으로 이용하는 것이 고작이었다. 그 후 한국과학기술연구원에 슈퍼컴퓨터 Cray-2S가 도입되자, 원시 방정식계를 직접 수치적으로 풀어내는 모델링 연구가 시작되었다. 초기에는 아일랜드 기상청, 스웨덴 기상청, 미국 대기과학연구소(NCAR)에서 개발한 원시방정식 수치모델을 도입하여 사례 분석에 응용하였다. 동아시아 온대 저기압이나 태풍의 발달과 관련된 수치실험을 통해서 호우나 대설 현상의 주요 원인을 밝혀내거나, 해륙풍 등 국지 기상현상을 이해하는데 활용하였다(Hong and Lee, 1987; Lee et al., 1987; Chang and Lee, 1989; Lee and Hong, 1989; Hyun and Lee, 1990).

당시에는 국내의 수치예보 기술 기반이 취약했던 만큼 원시방정식 수치모델과 함께, 기술 축적이 용이한 준지균 모델을 개발하는 연구도 진행되었다. 하지만 준지균 모델은 주로 학문적 연구에 그쳤고 예보 현장에까지 직접 응용하지는 못했다. 하지만 이 과정을 통해서 국내 수치모델링 기술 역량을 축적하는 계기가 되었다. 비슷한 시기에 기후모델을 응용하여 현실 기후를 재현하는 실험이 진행된 것도 수치예보 연구를 촉진하는 계기가 되었다(Kim and Wang, 1981). 기후모델의 경계층과 대류 과정에 관한 연구를 시작으로, 점차 다른 모수화 과정으로 관심이 확대되었다(Lee et al., 1991b).

그 후 과학기술부(현 과학기술정보통신부)의 특정연구사업을 통해서 NCAR의 중규모 지역 수치예보모델 MM4가 도입되었다. 학계의 연구 지원에 힘입어, 기상청의 중형 컴퓨터 Cyber 932가 전후처리를 담당하고 MM4는 한국과학기술연구원의 슈퍼컴퓨터 Cray-2S에서 원격으로 구동하며 매일 정기적으로 수치예상도를 생산하기에 이르렀다. 모델 초기장은 스웨덴 기상청에서 도입한 객관분석 프로그램을 이용하여 마련하였다. 이 프로그램은 2차원 최적 내삽법을 기반으로 개발된 것이다. 수치예상도는 아일랜드 기상청에서 도입한 해밀턴 그래픽 프로그램을 구동하여 그려냈고, 2003년 이후부터는 NCAR 그래픽 프로그램으로 점차 대체되었다.

기상청에 수치예보과가 1990년 신설되면서 수치모델을 담당할 전담 인력이 마련되었고, 그때부터 현장의 수치예보 운영체제는 본 모습을 갖추었다. 이는 1980대 초반부터 기상 업무 현대화를 향한 수많은 노력의 결실이었다. 우선 통신 전용 컴퓨터를 도입하고 국내의 관측 자료를 코드 형식으로 자동 입수하여 해독하고, 품질 검사를 거쳐 쓰기 쉬운 파일 형식으로 정돈하는 전처리 과정이 자동화되었다. 뒤를 이어 날씨 기호를 기입하고 등치선을 묘화하는 플로터가 들어오고, 그래픽 프로그램을 개발하면서 후처리 과정도 자동화되었다. 여기에 전담 조직을 신설하기 위해 정부 유관기관을 설득하는 노력이 십 년 만에 결실을 맺은 것이다(Oh, 2003; KIAPS, 2011).

당시 예보 현장에서는 수치예보 서비스가 시작되기 전이라서, 순전히 통계 기법을 응용하여 정량적인 예보 규칙을 개발하는 연구가 먼저 시작되었다. 다중 판별법을 응용한 단기 강수확률 예보 기법이 개발되었다(NSF, 1988). 그런가 하면 통계모델 GEM을 미국기상청에서 도입하여, 기온, 운량, 시정 등 10여 개 날씨 요소의 변화를 마르코프 과정(Markov process)으로 풀어냈다(Miller, 1984). 이 모델을 응용하여 88 올림픽 때는 경기장의 시각별 날씨 흐름을 1시간 간격으로 12시간 동안 예측하여 선수들에게 제공하였다. 당시에는 수치예보 모델을 운영하기 전이라서 모델 예측자료가 축적되지 않았기에, 모델출력통계(MOS)를 개발하기 어려웠다. 대신 모델이 완전하다는 가정하에 분석자료를 이용하는 완전예측방식(PPM)으로 접근하여, 모델 예측 자료를 통계적으로 해석하는 연구가 활발하게 이어졌다.

3. 기반 구축(1990~2005)

3.1 역학 코어

외국에서 여러 모델이 도입되면서 다양한 역학 코어가 국내에서 사용되었다. 당시 도입된 전지구모델 JMA GSM, MRI GCM, NCAR CCM, NCEP G-RSM 등은 정역학계 모델로서, 구면 조화함수를 기저함수로 삼아 미분 연산자를 공간 차분하였고, 시간 적분은 준 암시법(semi-implicit)을 주로 사용하였다. 구면 위의 역학방정식에 적도 대칭인 구면조화 함수와 변환 방안(transform method)를 적용하여 다층 분광모델을 개발한 다음, 이 모델을 이용하여 중위도 경압 파동과 저기압 경로 특성을 분석하기도 하였다(Lee and Mak, 1995, 1996). 반면 미국에서 도입한 중규모 모델 MM5, RAMS, ARPS 등은 비정역학계로써, 대체로 유한 차분법으로 미분 연산자를 처방하고, 시간적으로는 명시적 방법으로 적분하였다. 기상청이 1993년 도입한 일본기상청 태풍 모델 TYM은 이중 푸리

에 급수를 이용한 분광모델의 일종으로, 앞서 도입한 중규모 모델과는 다른 형태의 역학코어를 가졌다. 모델의 연직 좌표계로는 지형을 따라가는 시그마 좌표계와 자유대기의 기압 좌표계를 혼용하는 하이브리드 방식이 주로 쓰였다.

한편 다양한 수치 계산 기법을 독자적으로 응용하여 모델을 개발하는 연구가 잇따랐다. 먼저 전지구 순압 모델에서는, 구면에서 남북 방향의 미분 연산자에 대해서 르장드르 함수 대신 이중 푸리에 급수로 전개하여 차분하는 방안(Cheong, 1999b; Cheong, 2001)이나 유한 차분 방안(Cheong, 2005)을 혼용하여 모델 개발에 응용하였다. 비슷한 시기에 격자를 수축 이완하여 특정 지역만 정밀하게 가변 격자체계를 구성하고, 유한 차분 방법으로 수치 계산하는 모델도 개발되어 태풍 진로 예측에 사용되었다(Kwon et al., 2001). 이 태풍모델(BATS)은 이동하는 태풍의 중심을 따라 주변 격자가 수축하며 태풍 주변의 기류 흐름을 보다 정밀하게 계산하는 것이 특징이다.

3.2 물리과정

학계에서는 MM4를 이용하여 태풍이나 집중호우 사례를 분석하는 연구가 계속 이어졌다(Lee et al., 1991a, 1992a, 1993, 1994a). 그러면서 아격자 물리과정으로 연구가 확대되었다. 특히 2000년대 초반부터 대학이 몇 년간 수치모델링에 관한 국가지정연구실을 유치하면서, 미국의 전지구-지역모델 G-RSM과 중규모모델 MM5을 기반으로 한 개량 연구가 진행되었다. 특히 모델 물리과정에 관한 연구가 활성화되었다. 이 과정에서 개발한 물리과정은 MM5와 WRF에도 옵션으로 채택되어 전세계적으로 이용되는 계기가 되었다(Lee and Hong, 2005).

한편 기후 연구가 확대되면서, 일본 MRI, 미국 GFDL과 NCAR의 범용 기후모델이 각각 국내에 도입되어 기후 모의와 연구에 쓰이게 되었다. 그 과정에서 물리과정의 민감도 실험과 경계조건의 민감도에 관한 연구도 점차 증가하였다. 국책연구사업 G7 (1991~2000년)이 진행되면서 기후 모델링 연구가 촉진되었고, PNU CGCM, SNU GCM과 RCM, YONU GCM이 각각 개발되었다. 해양-대기 접합 기후모델 연구가 활발하게 진행되었고, 대기모델 국제 비교실험(AMIPS)에도 참여하게 되었다(Gates et al., 1999). 또한 지역모델과 연계한 국지규모 축소화 연구도 활발하게 이루어졌다.

적운 대류과정에서는 KF 적운 대류 방안의 수분 공급률, 주변 공기 흡기율, 수직의 하중 효과가 강수에 미치는 영향을 분석하거나(Wee and Lee, 1994), 방아쇠 조건에 경계층 난류 에너지를 반영하여 지형성 호우 예측 성능을 개선하고자 하였다(Lee and Lee, 2006).

그런가 하면 질량 속 적은 대류 방안에서 지면 복잡성, 경계층 난류 강도, 대규모 상승 기류를 방아쇠 조건에 반영하여 호우 예측 성능을 개선하고자 하였다(Hong and Pan, 1998). 격자 크기에 따른 아격자 적은 대류 방안의 예측 민감도 실험도 이어졌다(Park and Lee, 2003). 나아가 질량 속 방안 SAS와 Kuo 방안의 예측 민감도를 비교하여, 기상청 전지구모델의 적은 대류 물리과정을 Kuo 방안에서 SAS 방안으로 대체하는 실용적 연구도 나왔다(Park and Hong, 2007). 한편 질량 속 개념을 적용하여 경계층 건조대류와 얇은 적운의 통합적 대류 과정이 개발되었는데, 이 연구는 후일 깊은 적은 대류로 확장된다(Park, 2014a).

경계층 물리과정에서는 해양 대기경계층 과정을 2차 난류 종결 방식으로 처방하여 기후모델에 응용하는 연구가 진행되었다(Lee et al., 1992b). 그런가 하면 K-프로파일에 비 국지 효과를 반영한 아격자 모수화 방안이 개발되어 전지구모델에 쓰였다(Hong and Pan, 1996). 이후 안정한 해상 경계층으로 응용 범위가 확장되면서 개량을 거듭하여, 이 방안은 범용 중규모 모델의 선택 사양에 YSU PBL이라는 이름으로 등재되어 많은 연구자들이 이용하고 있다(Hong and Noh, 2006; Hong, 2010).

산악 중력과 항력에 대해서는 상층 뿐 아니라 하층 파동의 파쇄과정과 기류 흐름 저지과정이 추가로 연구되었고, 지형 특성도 비대칭 성분까지 고려하게 되었다(Kim and Arakawa, 1995; Kim, 1996; Kim et al., 2003; Kim and Doyle, 2005). 한편 Chun and Baik (1998)은 선형 이론에 기초하여 적은 대류에 따른 구름 상부의 중력과 운동량 스펙트럼을 정형화하고, 비산악 중력과 항력 모수화 방안을 제안하였다(Song and Chun, 2005).

강수물리과정에서는 벌크(bulk) 유형의 미세물리방안을 개선하는 연구가 주로 진행되었다. 얼음 입자 수 농도를 기온과 얼음량의 함수로 나타내고 얼음입자의 종단속도를 보완하자, 상층 운량 모의와 구름-복사 효과가 개선되며 기온과 강수량의 예측성이 향상됨을 보였다(Hong et al., 2004).

복사 과정에서는 먼저 기후모델에 접합하기 위한 용도로 모수화 연구가 진행되었다. 단파 복사모델(Oh et al., 1994)과 청천 영역에 대한 장파 복사 모델(Oh, 1996)이 개발되는가 하면, 고해상도(line by line) 복사 전달모델과 정확도를 비교하며 일부 채널의 복사전달 과정을 개선하는 연구가 진행되었다(Lee et al., 1994b; Lee and Lee, 2003). 적외 복사전달모델의 수증기 흡수 투과함수 계산 부분을 보완하고, 단파 복사에 대해서는 가시영역과 자외선, 근적외선을 각각 분리하여 계산하는 방안이 제시되었다(Ho and Kang, 1996; Lee, 1998). 복사 과정의 계산 시간을 단축하기 위해,

적의 복사전달 과정에 K-분포 방안을 응용하기도 하였다(Lee and Jee, 2002).

한편 모델의 고해상도 격자체계에서 명시적으로 물리과정을 설명하거나 모수화 방안을 설계하는 연구도 본격화되었다. RAMS 모델의 2차원 버전을 이용하여 적운이 대규모 환경에 미치는 영향을 분석하는가 하면(Shin et al., 1998), 고해상도 난류 모델을 이용하여 경계층의 큰 에디를 모사하거나(Shin and Lee, 1997; Kim and Noh, 1999) 이를 아격자 규모의 비 국지 연직 혼합과정을 모수화하는데 응용하기도 하였다(Noh et al., 2003).

적운 대류(Lee and Park, 2002; Byun and Hong, 2007; Park et al., 2010)와 경계층(Shim and Hong, 2006), 강수-구름 미세물리 과정이 강수 수치예측에 미치는 민감도 연구는 단중기 예측 분야에서 장기 예측과 기후변화 분야로 점차 확대되었다. 지면 온도나 토양의 수분은 경계층 난류를 통해서 대기 상태와 구름-강수 과정에 많은 영향을 미치므로 중요한 경계 물리과정으로 간주되지만, 당시에는 주로 기후모델의 모사 성능을 향상시키기 위한 용도로 연구되었다. YONU GCM에 BATS 지면 모델을 결합하려는 일련의 연구가 이시기에 진행되었다(Chun and Kim, 1997; Ha et al., 1998; Kim et al., 2005). 그런가 하면 지역기후모델에서 대기모델(MAS)과 지면-식생-적설 모델(SPS) 부분만을 따로 떼어내 결합하여, 토양 수분과 지면 열플럭스가 동아시아 지역기후 모의에 미치는 영향을 분석하기도 하였다(Kim et al., 1998).

3.3 자료동화

지역모델을 현장이나 사례 연구에 응용하는 과정에 자연스럽게 모델 초기장 분석에 관심이 모였다. 초기장의 중력파를 충분히 제어하지 않으면 계산 잡음이 예측장을 오염시키므로, 모델 초기장의 지균 균형을 확보하려는 초기화 연구가 활발하게 진행되었다. 당시 전지구 분광 모델을 이용하는 대부분의 모델링 센터에서는 비선형 정규모드 초기화 방법(NNMI)이 각광을 받았다. 이 초기화 방안에서는 구면조화함수 공간에서 모델 상태 변수를 선형계에 대한 정규모드(normal mode)로 분해한 다음, 중력 모드 중에서 모델의 비선형 역학-물리과정과 균형을 이루지 못한 성분을 제거하게 된다. 기상청의 GSM도 같은 방식으로 모델 분석장을 초기화하였다. Lee and Jhun (1996)은 단층 전지구 천수 모델(shallow water equation)에 NNMI 방안을 적용한 바 있다. 한편 제한지역 모델은 전지구모델과 달리 구면조화함수가 기저함수로 적합하지 않다. 대신 제한 지역의 선형 역학에 적합한 정규모드를 재구성하고, 모드의 함수 공간에서 비 지균 성분을 역학적으로 제어하는 방식을 응용하였다(Lee

and Hong, 1991). 그 후 모델의 성능이 나아지고 역학적으로 지균 균형이 충족된 배경장을 자료동화에 쓰게 되면서, 독립적인 초기화 과정의 연구는 점차 줄어들었다.

한편 적은 대류 물리과정의 한계로 격자 규모의 저기압이 비정상적으로 발달하여 예보장을 크게 오염시키는 현상이 자주 나타났다. 지역 모델에서 모의한 태풍 구조나 중심 위치가 종종 실제와 달라지면서, 모델의 배경장을 객관분석에 사용하면 배경장의 오류가 분석장에 전이되어 태풍 주변 기압 패턴이 심하게 오염되는 문제가 지적되었다. Kwon and Won (2002)은 범용 중규모 모델에 GFDL의 태풍 보거싱(bogusing) 기법을 접목하여, 태풍 분석장의 잡음을 완화하고자 하였다. 이 기법은 모델의 태풍 구조를 주변 배경장에서 분리하여 제거한 후, 관측에 부합한 모조 태풍을 새로 배경장에 덧붙이는 방식으로(Kurihara et al., 1995), 가변격자 순압 모델 BATS와 이중 푸리에 순압 모델 DBAR에 각각 적용되어 태풍의 경로를 예측하는데 사용되었다. 나아가 Kwon et al. (2007)은 범용 중규모모델 MM5에 GFDL 보거싱 기법을 접목하고, 태풍의 중심을 따라 이동해가는 동지격자형 제한 지역 태풍 모델을 구축하였다.

한편 현장에서는 외국의 객관분석 기법이나 자료동화 기술을 도입하여 응용하는 연구가 주류를 이루었다. 전지구 모델의 초기 분석장은 일본기상청에서 개발한 기술을 활용하였다. 1999년에는 2차원 최적내삽법(2DOI)이 도입되어 전지구 모델 초기장 분석에 쓰였고, 그 후 3차원 최적내삽법(3DOI)과 3차원 변분 자료동화 기법(3DVar)이 2002년과 2003년에 순차적으로 도입되었다. 위성 복사량은 초기에는 1차원 변분법(1DVar)을 이용하여 분석하였으나, 2007년부터는 3DVar에 위성 복사량을 직접 입력하여 대기의 연직 기온과 습도 분포를 분석하게 되었다. 그런가 하면 관측체계모의실험(OSSE) 접근 방법을 채택하여, 모델 대기에서 모의 관측 섭동을 추출하고 이것이 유발하는 예측 민감도를 중규모모델 ARPS를 이용하여 분석한 연구도 있었다(Choi and Lee, 2000).

지역모델 초기장 분석도 처음에는 MM4에 내장된 객관분석 기법(Barnes)이나 단변수 최적내삽법을 활용하였다. 그러다가 2001년과 2003년에 걸쳐 순차적으로 3DOI와 3DVar로 대체되었다. 기상청이 NCAR와 국제협력 연구를 5년에 걸쳐 진행하는 동안, MM5의 3DVar는 현장 운영이 가능한 정도로 처리 속도와 인터페이스 수준이 향상되었다. 기상청과 학계의 범용 모델과 자료동화 연구가 활발하게 맞물리면서, 국내 과학인이 대거 NCAR로 상호 방문하게 되면서 인력 양성도 자료동화 기술 이전도 촉진되었다.

국지 분석에 관한 연구는 미국 기상청 예보시스템

연구소(FSL)에서 개발한 분석체계 LAPS를 기상청이 1997년 도입하여 구름 분석에 응용하면서 본격화되었다(Kim et al., 2002a). 위성, 레이더, 지상 관측 자료, METAR와 PIREP 등 항공 관측자료를 분석하여 운정 고도를 비롯한 구름의 3차원 구조를 분석하고, 나아가 강수 분포를 참조하여 발산 바람장과 상승기류를 진단하는데 활용하였다. 이렇게 분석한 구름 자료는 잠열 또는 기온 증분으로 치환되어, 역학적 초기화 방식으로 모델에 들어가, 기온장과 수증기장을 보정하거나 초단기 예측성을 높이는데 이용되었다(Kim et al., 2004).

3.4 운영체계

외국에서 도입한 범용모델은 연구 용도로 개발된 것으로, 이를 현장에서 이용하려면 최적화 작업을 통해서 계산 속도를 높여야 했다. 또한 자동화 공정에 필수적인 전후 처리 과정은 현장 사정에 맞게 자체 개발해야 했다. MM4와 같은 연구용 범용모델을 도입할 때마다, 현장에서는 두 가지 현실적인 문제를 해결하는 데 많은 시간과 인적 자원을 투입해야만 했다.

기상용 슈퍼컴퓨터 1호기인 NEC가 1999년에 도입되면서 모델 운영 체계에 일대 변화가 일어났다. KISTI의 슈퍼컴퓨터 Cray-YMP에서 원격 작업하던 전지구 모델 GSM을 NEC에서 직접 구동하게 되었다. 지역 규모에서 전지구 규모로 계산 영역이 확장하면서, 세계 각지에서 모인 대용량 관측 자료를 처리해야 했다. 단기에서 10일까지 예측 기간이 늘어나면서 급증한 모델 출력 자료량을 소화해내며 자료 처리 기술도 한 단계 도약하였다.

Cray-YMP는 벡터 연산을 지원하는 반면, NEC는 벡터연산 프로세서가 여러 개 병렬로 연결된 구조를 갖고 있어, OpenMP 쓰레드(thread) 기반 병렬화 기법으로 GSM 코드를 수정해 계산속도를 높일 수 있었다. 전체 계산 영역을 쓰레드 단위로 나누는 영역 분할(domain decomposition) 방법으로 코드를 병렬화하여, 여러 개의 병렬 프로세서에 계산 로드를 분담할 수 있었다. NEC 슈퍼컴퓨터는 하나의 노드에 16개의 벡터프로세서가 장착된 형태라서, 전지구 분광모델 GSM의 경우 격자공간에서는 남북 방향으로 영역을 분할 계산하고, 파수 공간에서는 연직 방향으로 분할 계산하여 병렬화를 구현하였다(KIAPS, 2011).

지역 모델에서도 병렬화 연구가 이어졌다. Kim (2003)은 지역 모델 MAS를 MPI 환경에서 RSL을 응용하여 수평 방향으로 영역을 분할하여 병렬화 하였다. 또한 MM5 모델을 퍼스널 컴퓨터 환경에서 병렬로 처리하는 기법을 개발하였다(Kim et al., 2002b). 여러 대의 개인용 컴퓨터(노드)를 묶은 클러스터에서 MM5 모델을 구동해보니, 노드 간에는 MPI, 공유 메

모리를 갖는 노드 안에서는 OpenMP를 각각 혼용하고, 네트워크 카드를 여러 개 묶어 고속 통신할 때, 최대 41% 계산 시간 절감 효과를 보였다(Lee et al., 2005). 클러스터 시스템을 활용한 MM5 모델 운영 기술과 병렬 처리 기술은 몽골기상청에도 이전되었다(KIAPS, 2011).

3.5 예보 응용

전지구 모델에서 지역 모델에 이르기까지 다양한 모델을 기상용 슈퍼컴퓨터에서 자체 구동하여 수치예측 자료를 생산하자, 예보 의사결정에 참고할 수 있는 분석도와 예상도가 기하급수적으로 늘어났다. 전지구 모델의 예측장을 배경장으로 삼아 MM5 모델의 초기장을 분석할 수 있게 되면서, 수치 일기도의 품질도 크게 향상되었다. 또한 여분의 슈퍼컴퓨터 자원을 이용하여, 다양한 모델 초기장에서 앙상블 예측 자료를 생산하고 예측 확률 정보를 제공하게 되자, 단기에서 중기까지 이음새 없는 일기예보 서비스의 토대가 마련되었다. 처음에는 서로 다른 분석 시점의 초기장을 이용하여 앙상블 섭동을 구성했으나, 그 후 빠르게 성장하는 경압 파동 성분을 반영한 섭동(bred vector)을 혼용하여 앙상블 섭동 생성 방안을 개량하였다(Koo et al., 2001; Chung et al., 2007).

한편 학계에서는 범용 지역모델을 이용한 사례 연구와 예측 민감도 연구가 활발하게 진행되었다. 공군 기상전대에서는 MM5 모델을 일기예보에 응용하다가, 2007년에는 WRF 모델로 대체하였다(Byun et al., 2011). 그런가 하면 아시아의 황사 발원과 배출 과정을 대기질 모델 CMAQ에 반영하여, 황사 수송과정을 모의하는 수치 실험이 진행되었다(Chung and Park, 1997; In and Park, 2002; In and Park, 2003). 이 황사모델(ADAM)은 기상청에 이전되어 단기 황사 농도 예보에 쓰이게 되었다. 한편 해상 예보를 지원하기 위해 파랑모델이 현장에 도입되었다. 연안 파고를 예보하기 위해 1992년 1세대 파랑모델(DSA-5)을 시작으로, 3세대 파랑모델(WAM)을 거쳐, 2003년 이후부터는 WW3 기반의 고해상도 파랑모델이 현장에서 운영되었다.

수치모델이 개선될 때마다 예측 특성이 달라지므로, 계통 오차를 보정하려면 그때마다 통계모델을 새로 구성하지 않으면 안 되었다. 이러한 문제를 모면하기 위해 한편으로는 적응형 통계 기법이 연구되었고, 다른 편으로는 분석자료만으로 통계 해석이 용이한 PPM 기법의 연구가 한동안 이어졌다. 칼만 필터 기법은 최고 최저기온의 단기예보에 먼저 응용되었고(Lee et al., 1999). 전지구 모델 GSM에서 중기 예측자료가 생산되자 5일 이상의 중기 기온과 강수확률 예보에까지 확대 적용되었다(Sohn and Kim, 2001).

1990년대 초반에는 일본 기상청의 재분석자료를 지원받아 다중선형회귀 기법으로 기온이나 강수확률을 예측하는 통계모델이 개발되었고, MM4 모델 예측 결과를 PPM 방식으로 통계적으로 해석하는데 사용되었다(Choi and Cho, 2001; Choi and Cho, 2002). 통계적 해석 기술은 2005년을 전후로 디지털예보(지금의 동네예보) 기술 개발에 착수하면서 일대 전환을 맞게 된다. 한반도 주변을 5 km 간격의 그물망으로 구성하고, 다중 회귀 통계 기법을 구사하여 각 격자점마다 기온, 바람, 습도, 강수확률 등 날씨 요소를 시각 단위로 해석하는 기술을 개발한 것이다. 이 기술은 2007년까지 시범적으로 제공된 후 정규 서비스로 전환되었다. 미국에서는 당시 NDFD라는 디지털 예보 자료를 민간과 일반에 제공하는 서비스를 개시하였는데 (Glahn and Ruth, 2003), 이 개념을 벤치마크 하여 국내 실정에 맞게 구현한 것이다. 동네예보 해석 기술에서 특이한 점은, 산악이 많은 복잡한 지형에서 모델의 배경 자료가 상당한 한계를 갖기 때문에 기후 분석 방식을 혼용했다는 것이다. 산악의 고도, 지형면 같은 지형학적 특성을 고려하기 위해, PRISM 기법을 응용하여 고해상도 격자 값을 통계적으로 추정하는데 활용하였다(Hong et al., 2007; Shin et al., 2008; Ahn et al., 2014).

모델의 예측자료는 방대하므로, 제한된 시간 안에 모델의 다양한 특성을 온전히 파악하기 어렵다. 모델의 기본 변수와 이를 가공한 진단 변수를 다양한 방식으로 예보관이 살펴보기 쉽게 도와주는 후처리 가시화 도구가 필수적이다. 사용자 인터페이스 공학적인 기반은 별도의 투자가 필요한 만큼, 미국기상청 예보 시스템연구소(FSL)에서 개발한 모델자료 표출 지원 대화형 도구 AWIPS가 기상청에 도입되며 모델과 예보관의 상호작용을 하게 되었다. 한편 모델 강수량은 실황과 큰 차이가 있는데다, 산지가 많아 복잡한 지형조건에서 강우 분포의 연속성을 유지하며 모델 강수량을 보정하려면, 단순 통계 처리 방식으로는 한계가 있다. 예보관이 주관적으로 격자점의 강수량 값을 손쉽게 보정할 수 있는 편집 인터페이스가 개발되면서(Park et al., 2005), 그래픽 예보 서비스가 본격적으로 시작되었다. 2003년부터는 수치 일기도나 예상도 위에 주관적으로 전선을 그려내거나 등치선을 부분 보정하도록 지원하는 편집 도구가 개발되었다(KIAPS, 2011).

4. 기술 도약(2006~)

4.1 역학코어

역학코어 분야에서는 구면에서 이중 푸리에 급수를 기저함수로 삼아 수평 방향의 미분 연산을 차분화하

여 모델링하려는 연구가 계속 확대되었다(Cheong and Kwon, 2007). 이 차분 방법은 G-RSM의 역학 코어를 우리 실정에 맞게 응용하려는 연구와 맞물려 GRIMs의 선택 옵션으로 장착되었다(Cheong, 2006).

고해상도 격자에서 정역학 모델과 비교하여 비정역학 모델의 특성을 조사하는 연구가 진행되었다. NCAR MPAS 격자체계에서 지구 반경을 임의로 축소하여 해상도를 높인 다음 비정역학계와 정역학계의 정합성을 이상적인 수치실험을 통해 조사하는가 하면(Klemp et al., 2015), 동아시아 집중호우 사례를 통해서 두 역학계의 특성을 분석하기도 하였다(Jang and Hong, 2016). 한편 비정형 격자체계의 역학코어를 다룬 연구도 잇따랐다. 이상적인 경압 파동을 재현하는 실험에서는 MPAS의 가변격자체계에서 저해상도 영역과 고해상도 영역 사이에 파동의 왜곡이 미미한 반면, WRF의 등지 격자체계에서는 측면경계조건으로 인해 파동의 왜곡이 나타남을 보였다(Park et al., 2014). 독일기상청의 가변격자 모델 GME를 도입하여, 구면에 내접한 20개의 육각형 격자체계에서 차분 계산함으로써, 예측성을 분석하거나 강수량의 규모축소에 응용하는 연구가 진행되기도 하였다(Wu et al., 2009; Kim and Oh, 2010).

방사능 물질과 같은 추적 물질을 보존 원리로 모의하고자 할 때, 분광모델의 차분 기법은 파동 불일치 문제(Gibbs phenomena)로 인해 공간적으로 변화가 심한 물질의 농도 분포 패턴이나 질량을 보존하는데 어려움이 따른다. 준 라그랑지언(semi-Lagrangian) 처방은 이런 점에서 유리한 측면이 있어서, 지역 분광 모델에서 추적 물질을 준 라그랑지언 방식으로 풀어내는 연구가 수행되기도 하였다(Koo and Hong, 2012; Chang and Yoshimura, 2015). 시간에 대한 중앙 차분 방법을 적용하여, 중간 시점의 격자점에 도달하는 출발 위치를 계산하고, 1차원 이류과정을 2회 반복하여 2차원 이류과정을 풀어냈다.

시간 차분 방법으로는, 경제적이면서 해의 정확도가 보장되는 명시적 처방에 대한 연구가 진행되었다. 분리형 명시적 기법(split-explicit scheme)은 느리게 진동하는 이류-지균조절 과정과 빠르게 진동하는 음파 과정을 분리하여 시간 적분하는 것인데, 수치실험을 통해서 여러 기법의 경제성과 정확도를 비교 분석하였다(Park and Lee, 2009). 명시적 방법의 시간 적분 간격에 따라 집중호우의 패턴이나 시간 흐름에는 큰 변화가 없었으나 강수 강도는 민감하게 달라졌고, 특히 명시적 강수물리과정이 더 많은 영향을 받은 것으로 조사되었다(Lee and Lee, 2006).

측면 경계조건에 따라 모델의 예측성은 크게 달라진다. 재분석 자료의 측면 경계조건에 따라, 지역 기후 모사 특성이 크게 달라지는 점이 부각되기도 했다

(Oh et al., 2013). 미국기상청 지역 분광모델 RSM을 이용한 기후 규모 상세화 실험에서(Yhang and Hong, 2011; Hong and Chang, 2012), 다양한 분광 너질의 민감도가 조사되었다. 분광 너질 방식은 지역모델이 모의 가능한 운동 중에서 큰 규모의 운동은 가능한 전지구 모델과 일관성을 갖게 하면서도, 작은 규모의 운동은 전지구 모델의 강제력에서 벗어나 지역 모델의 고유 특성을 반영하려는 너질 방식이다. 대기 상층에서 회전 바람성분에 대한 역학적 너질을 했을 때 가장 우수한 결과를 얻었다. 그런가 하면 강수와 기온 분포는 물론 일변동성도 기존 기후 모사에 비해 향상되었다(Lee and Hong, 2014). 지역모델은 흔히 기후모델의 규모축소화 과정에 사용되는데, 모델 해상도가 높아질수록 기후 모사에 있어서 강수 분포가 개선된 것으로 나타났다(Lee et al., 2008). 전지구 기후 모델과 지역 기후모델간의 물리-역학 과정의 차이, 측면 경계조건과 너질의 방식에 따른 모의 불확실성에 대한 상세한 리뷰는 Hong and Kanamitsu (2014)에 나와있다.

현장 응용을 목적으로 한 역학코어는 한국형 수치 예보 모델 개발 사업(2011~2019)이 진행되면서 본격적으로 개발되었다(Hong et al., 2018). 구형에 내접한 육면체구에서 등각 격자체계를 채택하여, 극지에서도 경제적인 수치계산을 도모하였다(Nair et al., 2009; Choi and Hong, 2016). 지형 효과를 반영하면서도 자유대기에서 기압 좌표계의 이점을 살리기 위해서, 시그마-기압 하이브리드 좌표계를 채택하였다. 연직으로는 건조공기에 대한 정역학 기압을 좌표계로 설정하고, 모델 변수는 로렌즈가 제안한 방식으로 연직 층과 면에 배열하였다(Choi et al., 2014). 정역학 균형 조건을 만족하는 기본장에 대한 섭동 성분만 가지고 기압경도력을 계산하여, 산악에 따른 계산 오차를 줄였다(Laprise, 1992; Skamarock et al., 2012). 시간 적분은 명시적 방안을 사용하여 병렬 연산이 용이하게 하고(Kelly and Giraldo, 2012), 빠르게 진동하는 음파 성분과 느린 진동 성분을 구분하여 계산 효율을 높였다(Scamarock and Klemp, 2008). 이러한 기술 개발을 통해서, 중규모 모델 WRF가 갖는 역학적 특성을 분광 요소 방법으로 전지구 영역에 창의적으로 구현하게 되었다(Skamarock et al., 2008).

연속 함수의 미분 연산을 분광 요소로 차별화하는 과정에서는, 다른 방안과 마찬가지로 다양한 수치 계산 잡음이 발생한다. 모델의 비선형 이류 과정을 비롯하여, 각종 물리과정에서 유발되는 작은 규모의 계산 잡음이 수치 계산 불안정을 부추기므로 흔히 고차분산 연산자로 단과 수치 잡음을 제어한다(Park et al., 2011; Cheong et al., 2021). Cheong and Kang (2015)와 Choi (2018)은 각각 선형계에서 분산 연산자의 고

유 수치해의 특성을 분석하고 계산 안정 조건을 만족하는 분산계수를 제시하였다. 한편 모델의 해상도가 높아지면 지형의 굴곡도 심해지고, 기압경도력의 수치 계산 오차도 증가한다. 지형 표고의 공간 규모를 대규모 성분과 잔여 성분으로 분리하고, 소규모 성분에 대해서는 기압 좌표계로 회귀하는 연직 고도를 효과적으로 낮추는 처방(Schar et al., 2002)을 한국형 전지구 모델 KIM에 응용하는 연구가 진행 중이다(Choi and Klemp, 2021).

4.2 물리과정

2000년대를 지나면서 다양한 중규모 모델들이 각종 연구에 쓰이게 되었다. 특히 미국에서 개발된 범용 중규모모델 MM5/WRF 외에도 ARPS, LAMS 모델이 사례 연구에 많이 쓰였다. 모델 연구가 활발해지면서, 사례 실험이나 지역 기후 모의 과정에서 개별 물리과정의 민감도를 분석하는 연구도 계속 증가하였다. 예를 들어 적운 대류에 대한 방안별 비교실험 연구로는 Hong and Choi (2006), Park et al. (2010), Ham and Hong (2013)을 들 수 있다. 깊은 적운 대류방안의 주요 모수를 변경하거나 세부 물리과정을 개선하여 민감도를 분석하는 연구도 많이 나왔다. Lee and Lee (2006)는 KF 방안에서 경계층 난류 에너지의 함수로 방아쇠 조건을 처방하여 집중 호우 민감도를 조사하였고, Byun and Hong (2007)은 적운의 운고, 운동량 연직 수송, 수증기 수렴을 반영한 환경의 불안정화가 계절 예측에 미치는 민감도를 분석하였다. 질량속 방안 SAS에서는 습도의 영향을 흡기율에 반영하고(Han and Pan, 2011), 운고에 따라 강수 전환율을 보정하였다(Han et al., 2016; Han et al., 2019). 한편 얇은 적운 대류에 대해서는 Tiedtke (1989) 방안에서 난류 분산 계수와 대류 방아쇠 조건을 개선하고, GRIMs의 예측 민감도를 분석하였다(Hong and Jang, 2018).

경계층 물리과정에서는 층적운 상부의 적외 복사 냉각과 하부의 복사 흡수 승온으로 유발되는 열적 불안정과 대류를 감안하여, 경계층의 연직 혼합 과정을 보정해주는 방안이 개발되었다(Lee et al., 2018a). 수치 모의실험에서는 층적운과 경계층이 긴밀하게 상호 작용하며, 층적운이 대류 경계층의 혼합을 촉진하기도 하지만 동시에 경계층 고도를 낮추어 혼합을 억제한다는 점을 보여주기도 하였다(Park and Kwon, 2018).

산악 중력과 항력에 대해서는, 아격자 산악의 비대칭 성분에 따른 하층의 파동 파쇄 효과와 산악 주변을 흐르는 기류의 저지 효과를 개선하여, GRIMs 모델에서 예측 민감도를 실험하였다(Hong et al., 2008; Choi and Hong, 2015). 비 산악 중력과 항력에 대해서는, 적운에 의한 중력파의 비선형과정에 따른 효과를 모수화하고(Chun et al., 2008), 3차원 중력 파동선

전파과정과 적은 이동 속도를 고려하게 되었다(Song and Chun, 2008; Choi and Chun, 2011; Kang et al., 2017; Kim et al., 2019a). KIM에는 적은 뿐 아니라 중위도 전선대의 중력과 항력을 모수화한 방안이 쓰이고 있다(Choi et al., 2018).

강수-구름과정은 수상의 크기에 따른 농도 분포를 다루는 방식에 따라 벌크 유형과 빈 유형의 미세물리 방안으로 발전해왔다(Lim, 2019). 벌크 유형의 미세물리 방안은 대기 수상의 크기에 따른 농도를 함수로 표현하는 반면, 빈 유형의 미세물리 방안은 대기 수상의 농도를 특정 범위의 수상 입자 크기에 따라 해당하는 영역의 수상 농도를 예단하는 방식이다. 벌크 방식은 단일 수상에 대해서 단일 변수를 예단하기 때문에 계산 효율이 뛰어나, 빠른 계산시간을 요하는 현장 수치예보모델이나 기후모델용으로 많이 연구되어왔다(Dudhia et al., 2008; Juang and Hong, 2010; Lim and Hong, 2010). 반면 빈 방식은 수상 크기에 따른 농도를 산출하기 때문에 함수를 임의적으로 가정할 필요가 없어서 정교한 예측을 하거나 과학적 현상을 규명하기 위한 연구에 주로 사용해 왔다(Lee and Baik, 2017; Jin and Baik, 2020; Jin et al., 2019, 2022).

한편 에어로졸이 구름과정에 미치는 간접효과에 관한 연구도 진행되었다. Lim et al. (2011)은 초기 응결핵의 수농도를 변경해가면서 에어로졸이 이중모멘트 미세물리과정과 소나기구름 발달에 미치는 효과를 분석하였다. Kang et al. (2019)은 GRIMs 모델에 WRF-Chem의 5종 흡습성 에어로졸 과정을 결합하여, 응결핵의 수 농도 증가에 따른 단파 차단 효과와 강수 전환 촉진 효과를 보기도 하였다.

구름량에 대해서는 아격자 물리과정의 효과를 반영한 예단 방식이 개발되었는데, 특히 위성자료(Cloudsat)를 참조하여 적은 대류에 의한 구름량의 변화를 모델링한 것이 특색이다(Park et al., 2016). 아격자 안의 구름량을 고려하여, 구름이 존재하는 지역에서의 증발과 구름이 없는 지역에서의 응결과정을 현실적으로 모의하는 미세물리과정이 개발되기도 하였다(Kim and Hong, 2018). 나아가 수상량의 유효반경을 산정할 때 아격자에서 적은 대류에 따라 발생하는 구름물, 얼음입자, 눈의 혼합비를 감안하여, 구름물리와 복사과정의 일관성을 확보하기도 하였다(Bae and Park, 2019).

아격자 구름량은 구름역의 불확실성을 감안하여 수직적으로 다양한 방식으로 겹침이 가능하다. KIM에는 최대-임의 수직 구름 겹침(maximum-random overlap) 방안을 쓰고 있으나, 인접한 구름층이라도 기상 조건에 따라 임의 겹침을 허용하는 방안(exponential-random overlap)으로 최근 개선 중에 있다. 한편 적운과 층운으로 구름 유형을 세분하고, 다시 구름 특성에 따라

대류 활동과 혼합 수상 강수 여부 등으로 세분하여 각각 최대 또는 임의적 수직 구름 겹침을 모델링하는 보다 복잡한 겹침 방안도 개발되었다(Park, 2017). 얼음입자의 광학 깊이를 처방하는 방안에 따른 민감도를 분석하거나(Hong et al., 2009), 장파의 얼음입자 산란과정을 소산계수, 단일 산란 알베도, 비대칭 요소의 함수로 처방하는 연구도 진행되었다(Jee and Lee, 2013).

복사과정에 대해서는, 기존 모델에 장착된 기법을 분석하고 개선하는 연구가 이어졌다(Kim et al., 2009; Lim et al., 2009). 한편 응용 목적으로 복사과정만 분리하여 단순화하고(Zo et al., 2014), 아격자의 지형 경사각, 하늘시계요소, 최대 그림자각을 산출하여 지면에 도달하는 직달 일사량과 산란 일사량을 각각 보정하는 연구도 수행되었다(Jee et al., 2017).

이중모멘트 미세물리과정의 수농도를 이용하여 수상량의 유효반경을 결정하고 이를 구름지역의 복사과정에 응용하는가 하면(Bae et al., 2016), 아격자 규모의 수상량을 유효반경 계산에 반영하여 강수-구름-복사과정간 일관성을 도모하였다(Bae and Park, 2019). Baek (2017)은 아격자에서 수직 구름 겹침 가정과 구름량의 비율을 만족하는 여러 개의 대표 구름 기동을 상정하고, 각 기동별로 다른 파장의 복사계산 과정을 거치게 하여 해의 정확성은 유지하면서도 계산 비용을 절감하였다.

지면과정에서는 기존에 개발된 지면모델의 알베도, 토양 온도, 토양 수분의 대기 민감도를 통해 지면모델의 특성을 분석하는 연구가 많이 진행되었다(Suh and Lee, 2004; Kim and Hong, 2007, Kang and Hong, 2008; Park et al., 2017 등). 지면모델의 일종인 Noah LSM은 KIM에 이식되어 현장에서 쓰이고 있다(Koo et al., 2017), 모델의 해상도 증가에 따른 지형과 토양 분포의 정밀화, 그리고 이에 따른 예측 민감도를 분석하는 연구가 이어졌다(예를 들면 Kang et al., 2007; Ha and Lee, 2011). 식생과 경작지의 분포가 토양 수분을 통해서 모델 지역 기후에 미치는 영향도 조사되었다(예를 들면 Rha et al., 2005; Oh and Suh, 2019). 차세대 도시 농림 융합 스마트 기상 서비스 개발 사업(WISE; 2012~2016)이 진행되는 기간에는, WRF 모델로 0.5~1 km 고해상도 격자를 구성하여, 도심 지역의 지면 피복이나 거칠기 따른 예측 민감도를 조사하기도 하였다(Park et al., 2015; Jee et al., 2016). 고해상도 지형을 이용하면 기온과 풍속의 예측성은 향상될 수 있지만, 강수 예측성에 대해서는 연구에 따라 상이한 결과를 보였다(Lee and Hong, 2014; Jee and Kim, 2016). 해양 표층 등 지면 외 경계조건이 모델 기후에 미치는 영향에 대해서도 많은 민감도 수치실험 연구가 진행되었다(예를 들면 Min et al.,

Table 1. Physical parameterization used in Korea Integrated Model (KIM).

Physics component	Scheme	References
Radiation	Revised RAD (RRTMK)	Baek (2017)
Land surface	Revised LSM	Koo et al. (2017)
Vertical diffusion	Scale-aware nonlocal PBL	Hong et al. (2006); Shin and Hong (2014); Lee et al. (2018)
Gravity wave drag	Subgrid orographic GWD Nonorographic GWD	Hong et al. (2008); Choi and Hong (2015) Choi et al. (2017)
Deep convection	Scale-aware mass-flux CPS	Han and Pan (2011); Han et al. (2016); Kwon and Hong (2017)
Shallow convection	Scale-aware mass-flux SCV	Han et al. (2017)
Microphysics	WSM5 MPS	Hong et al. (2004); Bae et al. (2016)
Cloudiness	Prognostic CLD	Park et al. (2016)

2017; Kim et al., 2019b).

기상청은 예보 서비스의 품질을 획기적으로 높이기 위해, 2010년 당시 세계 2위 중기예측 성능을 가진 영국 통합모델(UM)을 도입하였다. UM은 단중기부터 계절예보에 이르기까지 하나의 물리 과정으로 모사해 보려는 시도를 갖고 있어서, 적은 인력으로 이음새 없는 서비스를 제공하려는 기상청의 취지와 잘 부합하였으며, UM에서 지원하는 단일기동모델을 활용하여 깊은 적운 대류과정, 구름-강수 물리과정, 복사-구름 상호작용 과정이 모델의 예측 성능에 미치는 민감도를 분석하기도 하였다(Kim et al., 2014c). 한편, 학계에서 수행해 온 다양한 물리과정 연구는 한국형수치예보모델 개발사업을 통해서 지속 발전하였다. KIM이 2020년 5월부터 UM을 대체하여 운영하게 되면서, 그간 개발된 물리과정도 KIM에 장착되어 현장 수치예보에 쓰이게 되었다(Table 1). KIM 물리패키지는 현업운영에 적합하도록 정확성은 유지하면서 계산효율성을 극대화한 복사과정을 적용하거나(Baek, 2017), 구름량 예단방안(Park et al., 2016)과 미세물리 과정 내 구름량 상세 적용 방안(Partial Cloudiness, Kim and Hong, 2018) 등을 통해 구름정보의 상세화를 추구하기도 하였다.

국제적으로는 지역모델을 응용하여 지역기후 전망 비교실험(CORDEX)에 참여한 연구 결과도 꾸준히 나왔다(예를 들면 Kim et al., 2014a; Choi and Ahn, 2017; Kim et al., 2020). 또한 WMO GEWEX 프로그램 산하 전지구 대기 시스템 연구 사업단(GASS)이 주관하는 각종 물리과정 비교 실험(Zeng et al., 2018)에도 적극 참여하여, 지면모델의 온도 및 적설 초기화에 따른 대기의 계절예측성을 비교하거나(Xue et al., 2021), 모델이 갖는 아격자 규모의 중력과 항력(Niekerk et al., 2020), 적운 대류에 따른 강수 일변화(Tang et al., 2022) 특성을 분석하기도 하였다. 물리과정에 대한 전문 역량이 크게 향상되었고, 모델 개발

기반과 단일기동모델 실험 환경이 갖추어 진 만큼, 국제 비교실험 사업에 참여하는 국내 연구는 계속 확대 될 전망이다.

그간 수리과학 기술 발전과 슈퍼컴퓨터 성능 향상에 힘입어, 모델의 해상도는 계속 높아져, 호우, 대설, 돌풍 등 깊은 적운의 급작스러운 발달과 성쇠에 따른 돌발 기상 현상의 정밀 계산이 가능한 영역으로 진입했다. 한편 고해상도 영역에서는 그동안 독립적으로 처방했던 개별 물리과정들이 중첩되므로, 여러 물리과정을 종합적인 관점에서 처방하거나 일관성을 높여려는 연구도 늘어나는 추세다. 깊은 적운 대류와 얇은 적운 대류를 질량 속 방안으로 일원화하고(Han and Pan, 2011), 나아가 경계층의 비 국지 혼합과정도 질량 속 방안으로 대체하되 국지 혼합과정은 경계층 난류에너지의 함수로 모수화하는 연구가 진행되었다(Han and Bretherton, 2019). 한편 아격자 영역안에서도 지면에서 출발하는 다양한 난류 섭동을 가정하고 각 섭동이 구성하는 구름의 앙상블을 구성하여, 경계층의 건조 습윤 대류와 층적운 강제 대류(forced convection), 얇은 적운 대류, 깊은 적운 대류에 이르기까지 연직 혼합 물리과정을 하나의 방법론으로 처방하는 방안도 연구되었다(Park, 2014a, 2014b). 나아가 아격자의 한기풀 영역을 명시적으로 예측함으로써, 한기풀에 동반한 돌풍전선에서 조직된 적운 군집의 대류활동이 역학체계에 미치는 상호작용 과정을 명시적으로 반영하여, 중규모 적운 군집체를 보다 효과적으로 모의할 수 있게 되었다.

격자 간격이 수 km 이내로 좁아지는 회색지대(gray zone)에서는, 아격자 규모의 모수화와 격자규모의 물리과정의 역할 분담이 달라지므로 격자 규모에 따라 물리과정도 적응해야 한다. 적운 모수화 방안도 해상도에 따라 집중 호우 예측 특성이 달라지는데, 특히 5 km 이하의 고해상도 영역에서는 적운 모수화를 거치면서 강수 강도가 약해지는 특징을 보였다(Lee and

Lee, 2011). 질량 속 적은 대류 방안에서는 구름 하부 질량 연직 플럭스, 대류 억제 조건, 구름 배기량을 격자 크기의 함수로 처방하는가 하면(Kwon and Hong, 2017; Han et al., 2017; Han et al., 2020), 경계층 방안에서는 연직 에디 플럭스를 국지 에디 성분과 비국지 성분으로 구분하고 각각 격자 크기의 함수를 곱해 처방하였다(Shin and Hong, 2014). 아격자 내부의 산악 복잡도에 따라 증가하는 난류와 바람 저지 효과는, 지형 표고 복잡도를 재산정하여 반영하기도 하였다(Koo et al., 2018). 그간 격자적용 물리과정의 각종 연구 결과는 한국형 모델 개발 사업의 뒤를 이어 차세대 수치예보 모델 개발 사업(2020~2026)에도 응용될 예정이다.

연직적으로는 모델의 층수가 늘어나고 상단 경계가 성층권을 넘어 중간권으로 향하면서, 성층권의 오존 분포에 대한 관심도 증가하였다. Jeong et al. (2016)은 광화학 과정의 선형 효과를 반영한 통계적 오존량 예측 모델을 전지구 모델에 접합하여 예측 민감도를 조사하였다. 차세대 수치예보 모델 개발 사업에서도 선형 오존 통계 모델을 KIM에 장착하여, 오존의 단파 복사에 따른 모델의 성층권 기후도의 품질을 높이고 나아가 중력파의 상부 전파에 따른 파쇄 과정과 중위도 제트와의 상호작용 과정을 개선하려는 연구가 진행 중이다.

한편 지구시스템모델을 응용하여 단중기에서 계절 내 변동성에 이르기까지 이음새 없는 수치예보를 구현해보려는 연구가 전세계적으로 증가하는 추세다. 기상청에서는 UM에 기반을 둔 지구시스템 모델을 3~6개월 계절 예측에 응용해왔으며(Jeong et al., 2017), MoM/CICE 해양/해빙모델을 OASIS3 결합연산자로 UM에 연결하여 기후전망 시나리오를 산출하고, CMIP 국제 비교실험 사업에도 참여해 오고 있다(Lee et al., 2020a; Kim et al., 2021). 지구시스템모델과 전지구 대기모델의 예측 성능을 비교한 결과, 지구시스템모델이 단중기 강수나 대기변수의 예측에 있어서 전지구 대기모델과 유사한 성능을 가질 수 있음을 밝힌 바 있다(Lee et al., 2016). 최근에는 지구시스템모델에 대기 화학과정을 결합하는 방향으로 확장하는 추세다. 지구시스템모델 GRIMs에 대기 화학모델 GEOS-CHEM을 결합하여 대기 중 오존 전량과 에어로졸 분포를 재현하는가 하면(Jeong et al., 2019b; Lee et al., 2022d), UK ESM에 해양 식생에 따른 화학과정을 결합하여 탄소 순환과 기후 영향을 분석하기도 하였다(Lee et al., 2021).

연장 중기 구간(15~30일)은 초기치 문제이면서 동시에 경계 조건의 영향이 증가하는 혼합 구간이라서, 수치예보 문제도 지구시스템 모델링의 관점에서 접근해야 한다. 차세대 수치예보 모델 개발사업에서는 한

국형 모델의 기반 위에서, 범용 경계 모델들을 결합하여 연장 중기 구간의 확률적 예측 기법을 연구 중이다. 해양모델로는 NEMO, 해빙모델은 SI3, 지면모델은 Noah-MP를 각각 채택하여, MCT 집합 연산자를 통해 이 경계모델을 차세대 전지구 모델에 결합하여 예측 시험 중이다. 또한 WRF-CHEM의 모듈 중에서 응결핵에 민감한 흡습성 에어로졸 5종에 대한 화학과정을 미세물리과정에 결합하여, 에어로졸의 간접 효과를 수치모의에 반영하고자 연구 중이다.

4.3 자료동화

ECMWF와 일본기상청은 2005년을 기점으로 각각 전지구모델과 지역모델에 대한 4차원 변분 자료동화 기법(4DVar)을 개발하여 현장에서 쓰게 되었는데, 기상청은 당시에 3DVar를 기반으로 한 자료동화 기법에 머물렀다. 당시 학계에서는 4DVar를 응용한 관측 또는 예측 민감도 수치실험 연구가 활발하게 이루어지던 때이다(예를 들면 Lee and Chang, 1997; Lee and Lee, 2000; Park and Kalnay, 2004). 그런가 하면 OSSE 접근 방법을 채택하여, 재분석장에서 추출한 모의 관측 자료가 중규모 모델 MM5의 태풍 진로 예측에 미치는 민감도를 분석하기도 하였다(Park et al., 2008).

국제적으로는 수치예보 기술을 관측·예보 연구에 반영한 THORPEX 사업이 진행되면서, 자료동화 기법을 응용하여 관측 자료의 예측 민감도를 분석하고 목적 관측망을 설계하는 연구 사업이 지역별로 활발하게 수행되었다(Park, 2002; Parsons et al., 2017). 아시아권에서는 북서태평양 집중관측(T-PARC) 사업을 통해서 태풍 예측성 연구가 많이 진행되었다. 국내에서는 MM5의 수반모델(adjoint model)을 응용하여 빠르게 성장하는 섭동의 구조를 밝혀내거나(Kim et al., 2008a), 예측 민감도가 높은 관측종이나 지역을 찾아내는 연구가 활발하게 이어졌다(Kim et al., 2011; Jung et al., 2013; Kim et al., 2013b; Kim and Kim, 2017). 한반도 여름철 집중관측 자료를 활용한 민감도 실험에서는 특히 기상레이더와 지상자동관측(AWS) 자료가 강수량과 분포의 예측 정확도를 높이는데 기여함을 보였다(Lee et al., 2010). T-PARC 자료를 사용한 민감도 실험에서는 특히 드롭 존대를 태풍 진로의 남쪽 방향에 떨어뜨렸을 때 태풍의 진로 예측 정확도가 높아지는 것을 보였다(Jung et al., 2010; Kim et al., 2010). 한편 CAM-SE의 분광요소 역학코어에 대응하는 점선 선형 모델과 수반 모델을 개발하는 연구가 진행되었다(Jung et al., 2014; Kim et al., 2014b).

수치모델이 개선될 때마다 점선 선형 모델과 수반 모델도 함께 보완해야 하는 부담 때문에, 국내에서 4DVar 연구는 제한적으로 진행될 수밖에 없었다. 기

상청이 2010년부터 UM을 운영하면서, 자연스럽게 UM의 4DVar를 함께 도입하였고, 이후 앙상블의 배경 오차 공분산을 일부 반영한 하이브리드 앙상블 4DVar를 쓰게 되었다. 앙상블 예측 기법이 현장 예보에 광범위하게 활용되면서, 이 기법을 응용한 자료동화 연구도 계속 확대되었다. UM의 자료동화 체계에서는 앙상블 변환 칼만필터(ETKF)를 이용하여 앙상블 섭동을 만들어냈다. 앙상블 섭동의 개수가 24개에서 48개로 늘어나며 앙상블 예측 성능도 나아진 것을 확인하고(Kay et al., 2013), 섭동의 구조와 특성을 분석하기도 하였다(Kay and Kim, 2014). 그 후 한국형 모델 개발사업이 2011년부터 시작하면서 앙상블 4DEnVar 연구가 활발히 이루어졌다. Shin et al. (2016)은 국지 앙상블 자료동화 기법(LETKF)를 육면체구 격자체계에 응용하였고, Yang and Kim (2021)은 WRF 모델의 예측 오차 공분산을 응용하여 앙상블 자료동화 기법의 특성을 분석하였다. 앙상블 자료동화기법은 수반 모델을 쓰지 않아 접근이 용이한 반면, 섭동 표본의 부족으로 자료동화필터가 발산하는 문제점을 안고 있어, 현장 기관에서는 변분 자료동화 기법과 앙상블 예측시스템을 결합한 하이브리드 방식을 주로 사용해왔다(Song et al., 2017c).

KIM의 초기장을 제공하기 위해, 육면체구 격자에서 3DVar가 먼저 개발된 후(Song and Kwon, 2015), 연이어 LETKF를 3DVar와 접목한 하이브리드 앙상블 자료동화 기법, 4DEnVar가 개발되었다(Kwon et al., 2018a). LETKF에서 산출된 초기장을 시간 적분하여 앙상블 예측 자료를 생산하고, 이를 변분 자료동화에 반영하여 그날 그날의 모델 오차를 분석에 쓸 수 있도록 하였다(Shin et al., 2016, 2018). 앙상블 배경 오차 공분산 성분 중에서 파동의 크기에 따라 국지화(localization)를 달리 처방하는 방식을 실험하였다(Song et al., 2018). 또한 자료동화 조절 변수에 쓰이는 균형관계식이 자료동화에 미치는 영향을 분석하였다(Song et al., 2017b). 배경오차 공분산의 시간 불변 성분을 구면조화 함수 공간에서 구할 때, 등위경도 격자를 거치지 않고 육면체구 등각격자에서 직접 변수 변환을 수행하는 방법을 개발하였다(Song and Kwon, 2015). 변분 계산과정에서 외부 순환(outer loop)의 반복 횟수가 늘어날수록 작은 파동에만 국지화 영향이 미치도록 하였다. 자료동화에 필요한 양질의 관측을 제공하기 위해 독자적인 관측 전처리 시스템 KPOP을 개발하여 실시간으로 관측을 처리하도록 하였다(Kang et al., 2018). 이렇게 개발한 4DEnVar는 기상청 현장에서 KIM의 초기장을 제공하는데 쓰이고 있다(Kwon et al., 2018a, 2018b).

앙상블 자료동화 기법에서는 수반모델을 쓰지 않고도 관측 민감도를 분석할 수 있는데, Lee et al. (2020d)

은 앙상블 공간에서 분석장의 오차 상관과 예보장의 오차상관을 이용하여 예측 민감도를 추정해냈다. 한국형 모델의 LETKF 앙상블 자료동화 체계를 이용하여 관측 민감도를 분석하는 기법도 연구가 진행 중이다.

위성이나 레이더 등 비 종관 자료를 이용한 초기화 기법에 관한 연구도 계속 이어졌다. Ha et al. (2007)은 위성 SSM/I 추정 강수량에서 잠열의 분포를 추정하고, 역학적 너징 방식으로 WRF 모델의 대기 변수를 초기화하여, 예측 초반 10시간 정도까지는 강수 예측 성능이 개선될 수 있음을 보였다. 기상청 현장에서는 레이더 반사도로 추정된 강수량을 잠열로 환산하여, 역학적 너징 방식으로 UM 모델의 대기 변수를 초기화하였다. 한편 LAPS를 기반으로 한 구름 등 국지 분석 기법은 WISE 개발사업을 통해서 도시 기상 분석에도 쓰였다(Chun et al., 2014). 최근에는 LETKF의 앙상블 자료동화 방법을 응용하여 레이더 반사도와 바람장, 정지궤도 위성의 수분 간격 고해상도 자료를 분석하는 연구가 진행 중이다. 앙상블 필터의 해상도를 높이기 위해 국지화 연산과정에 규모인자 기능을 부여하여 고해상도 관측 정보가 분석 증분에 반영되도록 연구 중이다.

외국 모델링 센터에서는 변분 자료동화 비용함수에 역학적 균형조건을 구속조건으로 추가하여 초기화를 도모하기도 하지만, 이 방법의 국내 연구는 드물다. 대신 국내에서는 IAU 방안에 시간 필터를 적용하여 관측 증분을 충격 없이 모델에 주입하는 FGAT 방식의 연구(Lee, 2005)가 이어지고 있다. KIM의 4DEnVar에도 IAU 방안이 쓰이고 있다.

국내에서 위성 복사량을 직접 동화하는 기술은 주로 청천 영역에서만 쓰여왔다. 품질 관리도 구름 영향 자료를 효과적으로 제거하는데 집중했다. 초기에는 1DVar를 통해서 ATOVS 위성관측으로부터 대기의 연직 기온과 습도를 분석하였다(Joo and Lee, 2007). 그러다가 UM과 함께 4DVar가 현장에 도입되자, ATOVS 뿐만 아니라 IASI, SSMIS, GPS-RO, AIRS 등의 위성 복사량 관측 자료가 직접 동화되면서, 모델의 예측 성능이 크게 향상되었다. 특히 500 hPa 지위고도, 850 hPa 풍속 및 습도의 개선이 두드러졌다(Lee et al., 2011).

KIM이 수치예보 현장에 쓰이면서, 대기 온도에 민감한 마이크로파 위성 센서인 AMSU-A를 시작으로, 위성 복사량 자료동화 연구는 빠르게 발전하고 있다. 습도에 민감한 MHS를 3DVar와 LETKF를 통해 동화하며 대기의 중·하층 습도 분석도 향상되었다. 자료동화에 쓰이는 위성 복사량은 계속 확대되어, 마이크로파 채널로는 ATMS, SSMIS, SAPHIR을 비롯하여, 초분광 적외선센서인 IASI, CrIS, 위성 라디오미터 AMSR2로 계속 확대되었다(Lee et al., 2018b). LETKF에 GPS-

RO 관측 자료를 동화하면서 연직 국지화 연산에 따른 자료동화의 민감도를 분석하였다(Jo et al., 2015). 또한 3DVar에서 GPS-RO 관측의 연직해상도에 따른 분석 및 예측 성능에 대한 민감도도 확인하였다(Ha et al., 2018). 위성 영상 처리를 통해 추정된 대기운 동벡터 AMV를 자료 동화하게 됨에 따라, 바람 관측 공백 지역인 위도 50~70°의 바람정보를 제공하는 LEOGEO AMV를 추가로 자료동화에 활용하여, 바람 뿐만 아니라 온도의 예측 성능이 유의성 있게 개선되었다(Lee and Song 2018). 또한 ALADIN의 HLOS 바람관측 자료를 동화하는 기술을 개발하여 대류권 및 성층권 바람 분석도 향상되었다(Lee et al., 2022c).

AMSU-A의 복사량의 기초 오류검사, 구름제거, 모델과 비교를 통한 품질 검사, 편향보정, 속아내기 등의 위성관측 전처리 기술을 KPOP 패키지에 구현하였다(Lee et al., 2013b). 적응형 편향보정법(Adaptive BC)을 개발하여, 분석 시점의 배경장과 관측장의 차이에서 비롯한 위성자료의 편향오차를 반복적으로 보정하며 품질을 검사하게 되었다(Jeong et al., 2019a). 나아가 VarBC를 개발하여, 변분 자료동화 과정에서 편향 오차를 체계적으로 보정하게 되었다. VarBC는 MHS 위성 자료에 우선 적용하였고, 점차 다른 위성 자료로 적용 범위를 확장하는 중이다.

기존의 위성 복사 자료동화에는 구름 영역이 제거된 청천복사 관측만이 활용되었는데, ECMWF를 비롯한 선진 센터에서는 구름 지역은 물론이고 지면의 영향을 많이 받는 채널과 극지의 위성 자료를 이용하는 방향으로 확장하는 추세다. 국내에서는 MHS 전천 복사 자료를 3DVar에 적용하여 동화하는 기술을 개발하고 그 성능을 평가하는 연구가 수행되었다. 구름 지역까지 확장된 복사관측 자료를 쓰게 되면, 전지구 모델 영역 대부분의 온도와 습도의 예측 성능이 향상될 수 있다는 가능성을 제시했다(Lee et al., 2020c). 구름 영향으로 오염된 복사량 자료를 1DVar를 통해 걸러내는 한편, 구름 영역과 육상에서 마이크로파 및 초분광 적외 채널 자료를 자료동화에 활용하는 연구도 진행 중이다.

고해상도 대류규모 분석을 위해서 레이더 관측을 자료동화에 이용하려는 노력이 지속되고 있다. Lee et al. (2020b)은 3DVar와 하이브리드 자료동화 방안을 사용하여 레이더 반사도를 동화하고 두 방안의 특성을 비교하였다. 하이브리드 자료동화 방안에서 상대적으로 강수 예측 성능이 높았다. 이는 하이브리드 자료동화가 수증기의 변화를 더 잘 모의하여, 대기 수증량이 증가한데 따른 것으로 분석되었다. 또한 널 에코(null echo)를 구분하여 자료동화한 경우, 대기 수증량의 과대 예측 오차가 줄어든 것으로 분석되었다(Lee et al., 2020b). LETKF와 3DVar의 레이더 반사도와 시

선속도 자료동화 특징을 비교하면, LETKF가 3DVar에 비해 바람은 더 정확하게 모의하나 대류권 하부의 수증기량과 온도는 과소평가함이 확인되었다. 온도와 습도 변수로부터 반사도를 계산하는 관측연산자의 유무가 수증기 분석에 중요하게 작용하는 것으로 조사되었다(Lee et al., 2022b; Min et al., 2022).

전지구 수치예보 예측 기간이 단중기 이후로 확장하게 되면서, 결합 모델의 자료동화에 대한 관심도 계속 높아가는 추세다. 기상청은 영국기상청의 계절예측 시스템(GloSea5)을 도입 응용하면서, 해양 자료동화 체계인 NEMOVAR를 응용한 해양자료동화시스템(GODAPS)을 운영 중이다(Chang et al., 2021). 해양 관측자료를 이용한 결합 해양 자료동화 시스템 평가 연구에서는 미국 해양모델 HYCOM과 비교했을 때, GODAPS의 해수면 온도와 수온 프로파일, 해류의 분석 오차가 줄어드는 것을 보였다(Ko et al., 2018; Hyun et al., 2022). 한반도 근해에서 해양모델의 예측 민감도 조사에서는 해양 부이(Argo) 관측 자료가 동해의 수온과 염분 등 해양 내부 구조 분석에 유용함을 밝혔다(Choo et al., 2021). 그런가 하면 Argo 관측 자료에 3DVar를 적용하여 해양 상태를 분석하고, 결합 기 후모델 PNU-CGCM의 계절 예측성과 극 진동 지수의 1개월 예측성을 수치실험을 통해 조사하기도 하였다(Ahn and Lee, 2015; Kim and Ahn, 2015).

재분석 자료의 대기 강제력을 이용하여, 기후 변화 시나리오에 따른 한반도 토양 수분을 전망하기도 하고(Park et al., 2017), 기후 변동성에 부합하게 토양 수분을 정규화 한 후 결합모델에 입력하여 1개월 기 온 예측성이 개선됨을 밝히기도 하였다(Seo et al., 2016). 그런가 하면 너징 기법을 응용하여 지면 모델의 적설량이 적설 관측 자료(JCDAS)에 근접하도록 초기화하여 계절 예측성을 분석하기도 하였다(Shim et al., 2015). 관측 자료를 이용하여 토양 수분을 직접 동화한 연구 사례로는, ASCAT의 산출물인 토양수분자료를 지면 모델에 자료 동화하여 KIM의 초기 지면정보로 활용한 Jun et al. (2021)을 들 수 있다. 이 자료 동화 실험을 통해서, 대기 중·하층에서 습도는 낮게 모의하고 기온은 높게 모의하는 KIM의 편향 오차가 감소하는 것이 확인되었다.

차세대 수치예보 모델개발 사업에서는 약 결합 방식으로 지구 시스템의 자료동화 기법을 개발 중이다. 이 기법은 각 경계모델 마다 각기 자료동화 기법을 독립적으로 적용하고, 결합 모델의 적분과정에서 지구 시스템 요소간 결합의 효과를 다음 분석 시 배경장을 통해 반영하는 방식이다. 장기적으로는 결합모델의 이상블을 이용하여 결합 오차 공분산을 고려하고, 표면의 방출률과 알베도와 대기의 상태변수를 함께 제어하는 강한 결합 자료동화 방식도 검토 중이다.

4.4 운영체계

이 기간 동안 기상청에서는 전지구 모델이 2010년 UM으로 교체되는 큰 변화가 있었다. 또한 지역모델은 초기에 MM5를 사용하다가 후속 버전인 WRF로 교체하여 운영한 후, UM이 들어온 이후에는 일종의 참고모델로만 사용하게 되었다. KIM이 개발되자, UM은 다시 KIM으로 교체되었다. KIM은 2020년부터 기상청 현장에서 수치예보 서비스에 쓰이고 있는데, Fig. 1의 5일 예측 RMSE 오차를 기준으로 한 전지구 모델의 예측 성능은 전세계적으로 5~8위 사이를 오간다.

슈퍼컴퓨터가 2005년에 2호기로 교체되면서, 종전보다 공유 메모리 백터 프로세서 보다는 분산 메모리 일반 프로세서가 증가하는 형태로 아키텍처가 변모했다. 그러면서 모델 병렬화도 Open-MP 보다는 MPI의 역할이 중시되는 방향으로 진화해왔다. 이러한 병렬화 추세는 이후 15년간 슈퍼컴퓨터가 3차례 교체되는 동안에도 계속 확대되었다.

한편 기상청-NCAR간 협력 사업이 수년간 진행되면서, WRF 3DVar를 병렬화 하는 작업이 추진되었다. 이 사업을 통해서 기상청 현장의 자료동화과정 계산 속도가 향상되었다. WRF 모델과 자료동화 체계는 연구자의 문제 해결 계층과, 각종 병렬 인프라를 지원하는 드라이버 계층 사이에 원활한 인터페이스를 지원하는 중간 계층으로 설계되어 있다(Michalakes et al., 2001). 또한 단일 프로세서, 공유 메모리 기반 병렬화, 분산 메모리 기반 병렬화, 이것들의 혼합 병렬화를 모두 지원하는 공학 기반이 갖춰져 있어서, 병렬화 연구에 좋은 본보기가 된다. 한편 모델 성능이나 정확도는 전산 환경의 영향에서 자유롭지 않다. 전지구 모델 GRIMs를 10종의 컴퓨터에서 구동하여, 컴파일러, 분산 연산 도구, 최적화 수준, 반올림 오차(round off error) 처리 방식이 모델 예측 계산에 미치는 영향을 분석한 결과, 전산기 기종에 따라 10일 대기 중층 고도장에서 약 2% 내외의 오차를 보였다(Hong et al., 2013b).

Kim et al. (2008b)은 인터넷으로 연결된 여러 컴퓨터를 이용하여 정량적 강수 진단 모델을 병렬화 하여 구동한 바 있다. 그런가 하면 GPU 기반의 초 병렬 컴퓨팅 환경에서 모델을 구동하기 위한 병렬화 연구도 진행하였다. Kim et al. (2013c)은 CUDA 프로그래밍 언어를 구사하여 WRF 물리과정을 분산 GP-GPU 프로세서에서 SMIT 방식으로 연산하도록 재 코딩한 바 있다.

한국형 수치예보모델 개발 사업이 시작될 2011년 무렵에는 페타 규모(Peta-scale)의 대규모 고성능 컴퓨팅 환경에 맞추어, 고해상도 모델도 병렬 확장성이 우수한 기능적 요건을 갖추어야 했다. KIM의 역학코어에 육면체구 격자 기반의 분광요소법(spectral-element method)이 적용된 것도, 병렬 확장성을 고려한 것이

다(Choi and Hong, 2016). 역학코어를 비롯해서 자료동화, 전후처리를 포괄하는 제반 수치예보시스템을 새로 구축하는 과정에서, 수치예보 운영체계 전반에 걸쳐 병렬화·최적화 기술이 발전하는 계기가 되었다. 아울러 기상용 슈퍼컴퓨터가 4호기, 5호기로 교체되며, 점차 방대해지는 분산 메모리 시스템에 맞추어 수치예보 운영체계를 개발하는 동안, MPI 병렬 처리 기술도 동반 발전하게 되었다.

먼저 역학코어에서는 육면체구 격자 영역을 공간-분할 곡선(space-filling curve) 혹은 줄무늬(stripe) 방법으로 분할하여, 계산 로드를 여러 프로세서로 나누어 주었다. 또한 요소(element)의 경계에서는 기저 함수의 연속성을 보장하기 위한 DSS 합산을 거치는데, 이 과정에 수반되는 통신을 구현했다(Kim et al., 2018). 계산에 필요한 최소 격자점 수가 줄어들고, 통신 부하가 감소하면서 병렬 계산 효율이 높아져, 12 km 단위 격자 해상도 모델 실험에서는 10만 CPU 코어까지 병렬 확장성이 확인되었다.

변분 자료동화에서는 역학코어의 육면체구 격자점 변수와 구면조화함수 공간에서 정의된 변분 조절변수를 상호 변환하는 과정에서 프로세스 간의 빈번한 통신이 요구된다(Song et al., 2017a). 특히 변분 외부 순환(outer loop) 단계별로 국지화 처방의 공간 규모가 달라지면서, 변수 변환 과정이 반복되며 통신이 늘어나는데, 이 과정을 병렬 처리하여 50 km 해상도에 대해 수천 CPU 코어까지 병렬 확장성을 확인할 수 있었다(Song et al., 2018). 관측자료 전처리 과정에서는 관측 종별로 관측자료 처리 부담을 프로세스 별로 고르게 할당하여 병렬화 하였다(Kang et al., 2018). LETKF에서 각 격자점 별로 반복 수행하는 변분 계산은 모델의 영역 분할과 유사한 방식으로 처방하였다(Shin et al., 2018). 모델에서는 방대한 자료 입력과 출력 과정을 처리하고, 자료동화 체계에서는 많은 관측 자료와 앙상블 자료를 처리해야 한다. 입출력 과정에 수반되는 통신 부하 문제를 해결하기 위해서, MPI-IO를 이용하여 입출력 과정을 병렬화하는 방안을 새로 개발하고, KIM의 운영 체계에 적용하였다(Kim et al., 2018).

앞으로 고성능 컴퓨팅 기술이 발전하더라도, 모델의 해상도와 지구 시스템 결합 요소의 복잡도가 증가하고, 위성 자료나 사물 인터넷 기반의 비정형 관측 자료가 기하급수적으로 증가하며, 관측자료를 수시로 동화하여 모델을 구동하는 과정에서 계산 비용도 지속적으로 증가할 것이므로, 운영체계 관점에서 병렬화와 최적화 기술을 발전시켜가는 것은 계속 숙제로 남아있다.

4.5 예보 응용

대학에서도 범용 지역모델 WRF, ARPS, RAMS을

이용한 일기예보 수치실험이 준 실시간으로(quasi real-time) 진행되었다(예를 들면, Lee et al., 2010). KAF-GRIMs 모델은 공군기상전대에 이식되어 현장에서 활용하게 되었다(Hong et al., 2013a). 국지 규모의 수치 실험을 통해서, 대설이나 강풍 등 지역의 특이 기상 현상을 규명하고, 나아가 예보 판단을 지원하는 학연 협력도 활발하게 이어졌다(Kwon et al., 2006). 특히 강원 산지에 따른 대설의 사례에 대한 수치실험을 통해 강설 유형을 구분 짓는 연구가 진행되는가 하면(Lee and Lee, 2003), 국지 강풍에 대한 수치 실험을 통해 양간지풍의 예보 기술을 지원하기도 했다(예를 들면 Park and Han, 2021).

기상청에서는 UM의 바람 예측 자료를 받아 황사 모델을 구동하여, 지상 PM10 농도와 연직 적분 부유 분진 농도(TSP)를 예보하는데 이용하였다. 모델의 초기 황사 농도는 PM10 관측값을 최적내삽법으로 분석하여 구했다(Lee et al., 2013a). 나아가 MODIS 위성의 에어로졸 광학 두께(AOT) 추정값을 같은 방식으로 분석하였다(Lee et al., 2017). AOT 분석장은 다시 선형 관계식을 통해 에어로졸 질량 농도로 변환하여, 모델 초기장에 반영하였다. 예보부서에서는 예측 불확실성의 분석 비중이 늘어난 만큼 앙상블 예측자료의 응용 범위가 넓어졌다. 앙상블 초기 섭동이나 물리 섭동을 설계하거나, 앙상블 예측 자료를 해석하는 기술 개발 연구도 증가하였다. 기상청에서는 앙상블 섭동 생성 방안을 중전의 bred-vector 방식에서 UM의 ETKF 방식으로 대체하면서, 앙상블이 모의하는 오차 성장과 분산(spread)이 개선되었다.

한편 WMO의 관측 예보 연구 프로그램인 THORPEX에서는 이음새 없는 예보 체계를 구축하기 위한 목적으로 GIFS-TIGGE 자료 지원 사업을 추진하게 되었고(Swinbank et al., 2016), 우리나라도 현장과 연구 측면에서 이음새 없는 예경보 지원 시범사업에 참여하여 앙상블 예측 자료의 활용도를 높였다. 기상청도 이 사업에 참여하여, 전지구 모델 앙상블 자료를 지원하였다. 그 후 TIGGE 자료를 이용한 다양한 예측 민감도 연구가 진행되었다(예를 들면 Hwang et al., 2012; Lee et al., 2014). 앙상블 자료를 응용하면, 호우나 대설의 시점과 강도를 3~7일 전부터 확률적으로 예측할 수 있다는 가능성을 보여주었다.

PPM을 기반으로 한 동네예보는 시험 기간을 거쳐 2007년 공식 예보서비스로 자리잡는다. 현장 모델의 후처리 과정은 2010년 UM이 도입되면서 MOS 방식으로 대체되었다. 그러다가 캐나다 기상청의 UMOS 개념을 채택하여, 모델의 잦은 변경에 따른 MOS의 문제점을 보완하였다(Hong et al., 2010). UMOS는 MOS와 달리 자동으로 통계 관계식을 보정해가는 방식이며, 사용자가 가중치에 개입하여 최신 모델 예측

자료에 높은 가중치를 부여할 수 있는 탄력성을 갖는다(Wilson and Vallee, 2003). 동네예보 예측 기간은 점차 늘어나 5일까지 확대되었고, 주간 구간에서도 낮과 밤으로 세분하여 정량적인 날씨 예측 자료를 제공하게 되었다. 윈도우 기반의 인터페이스가 보강되면서, 동네예보 주관 편집 기능은 점차 일반 개인용 컴퓨터에서도 쓸 수 있게 되었다. 한편 PRISM은 기후 모델 자료와 융합하여 기후전망 시나리오의 규모축소화 과정에 응용되면서, 분석 해상도가 향상되고 분석 요소도 평균값에서 극값으로 확장되었다(Kim et al., 2012; Kim et al., 2013a; Kim et al., 2016; Lee et al., 2016). 한편 Kim and Oh (2010)는 고해상도 지형 효과를 반영한 강수량 보정 기법을 개발하여, 독일기상청에서 도입한 전지구 모델과 지역 모델의 예측 강수량을 국지적으로 상세화 하는데 응용하였다.

초단기 예측 기법은 패턴 추적 방식의 VSRF, SCAN, MAPLE에 덧붙여서, 2000년대 후반부터는 점차 자료 동화의 초기장 효과가 반영된 역학적 모델 예측기법을 혼용하는 방식으로 발전해왔다. VDRAS는 레이더 자료를 변분 동화 기법으로 분석하여 초단기 모델 예측에 접목한 것이다. KLAPS는 원격 탐측 자료와 지상 기반 관측 자료를 활용하여 구름·강수량 분석을 보강하고, 이로부터 추정된 잠열을 역학적 너징을 통해 모델에 입력하여 예측함으로써 초단기 예측을 지원하는 방식이다. 예보부서에서는 AWIPS를 통해서 초단기 모델 예측자료를 다양한 방식으로 표출할 수 있게 되었다(Roberts et al., 2019).

2010년대 중반부터는 고객 지향적 날씨 의사결정 과정을 지원하기 위해, 수치예보 모델과 응용 분야의 모델을 융합하는 연구가 꾸준히 늘어나고 있다. 항공 분야에서는 난기류를 예측하는 시스템을 수치모델과 접목하여, 항공 운항 지원에 응용해왔다(Lee and Chun, 2018; Lee et al., 2022a). 수문 모델과 연동하여 수계별 홍수위나 댐 수위 관리를 지원하는가 하면, 지면 모델과 연계하여 산사태나 도로 결빙 예측을 지원하기도 한다. 난류 모델과 연동하여 풍력 발전량을 예측하거나, 위성 복사량 등 실측 자료와 복사모델을 융합하여 태양광 발전량 예측을 지원하기도 한다. 응용 분야는 대부분 국지 규모 축소화 과정을 거치게 되고, 모델 예측자료와 분야별 빅데이터를 종합하여 활용하기 위해 인공지능 등 다양한 기법이 동원되는 추세다. 빠른 의사결정이 필요한 분야에서는 모델의 일부 물리과정을 인공지능으로 대체하여 계산 효율을 높이는 연구도 진행 중이다.

최근 기상 서비스 기관에서는 앙상블 자료를 해석하여, 기상과 관련된 사회 각 부문의 피해 또는 영향 정도를 확률적으로 산정하여 제공하고자 한다. 예를 들면 Kang et al. (2020)에서는 국지 앙상블 예측 시

시스템(LENS)의 기온, 바람, 복사량 예측 자료에서 계통 오차를 감쇠형 평균 기법(decaying average technique)으로 보정한 후, 인지 온도를 계산하고, 미리 정해 둔 기준에 따라 폭염 건강 위험도를 산정한다. 앙상블 자료의 편차를 통계적으로 보정하는 방법으로는 이 외에도 EMOS, BMA 등이 연구된 바 있으며(Han et al., 2018), 향후에는 이 방면에 인공 지능을 접목한 연구도 늘어날 것으로 전망된다(KMA, 2019).

5. 결 론

수치예보 연구는 지난 40여년간 산학협력을 통해서 발전을 거듭해왔다. 처음에는 외국의 모델과 자료동화 기술을 도입하여 실용화하는 기술 이전 연구에서 출발하였지만, 학계와의 협력을 통해서 점차 우리 과학 기술로 대체되면서 한국형 모델을 현장에서 운영하기에 이르렀다. 각종 국제 비교 수치실험 사업에도 능동적으로 참여하고, 개도국에는 수치예보 기술을 이전해주면서 국제 무대에서 우리 수치예보 과학 기술 활동이 점차 확대되는 추세다. 그럼에도 불구하고 정보화 사회와 4차 산업기술이 요구하는 국내 수요에 부응하기 버거운 분야도 적지 않다. 또한 국제적으로 수치모델링 분야 기술 선도 그룹과 비교하여 상대적으로 낙후된 분야도 없지 않다.

사물 기반 인터넷, 스마트 시티, 자율 주행 차량, 저고도 무인 항공(UAM)이 보편화된 미래형 사회에서는, 비정형 기상 관측 자료를 분초 단위로 신속하게 처리하여 날씨에 민감한 의사결정과정을 지원하는 자료동화와 빠른 예측 계산 기술이 필요하다. 초단기 모델은 실무적 관점에서 주로 역학적 초기화를 응용해왔지만, 물리과정의 주요 모수를 자료동화의 조절 변수로 놓고 처방하는 직접 자료동화 연구는 아직 걸음마 단계다. 도플러 레이더 반사도 역시 역학적 초기화의 관점에서 많이 연구되어 왔으며, 모델 수상량을 자료동화 조절함수로 삼아, 구름이나 지면의 영향을 많이 받는 위성채널의 복사량을 직접 동화에 응용하는 분야에도 더 많은 연구가 절실하다. 인공지능 기술을 역학적 모델링 기법에 접목하여 물리과정이나 초단기 실험 예측 분야에서 계산 효율성을 높이는 연구도 필요하다(예를 들면 Ukkonen, 2022).

장기 예측 분야에서는 그동안 지구시스템 모델을 응용하여 계절예보와 기후전망의 분야에서 많은 연구가 이루어진 반면, 보름에서 한 달까지의 확률적 예측을 겨냥한 연장 중기 분야의 모델링 접근은 이제 시작일 뿐이다. 특히 극지 성층권의 파동이나 열대 MJO 활동은 10일 정도면 중위도에 영향을 줄 수 있기 때문에, 지구시스템 안에서도 극지·해빙과 대기화학, 열대 적운 군집체와 중위도 기상과의 상호작용과

결합 모델링 연구가 관건이다. 또한 결합모델을 연장 중기 예측이나 계절 내 변동성 예측에 활용하려면, 결합 자료동화 기법의 개발도 시급하다.

초단기에서 연장중기 나아가 계절 내 예측에 이르기까지 이음새 없고 일관성 있는 예보 서비스를 실현하려면, 수치예측 기술이 이를 뒷받침해주어야 한다. 모델 해상도가 높아지면서 역학 코어와 물리과정의 구분이 허물어지고, 물리과정에서도 경계층, 자유대기, 적운의 대류과정이 서로 중첩되는 만큼, 통합적인 관점에서 모델을 재설계하거나 해상도에 유연한 물리과정의 연구도 서둘러야 한다. 앙상블 예측 표본을 늘려 예측 불확실성을 추정하고, 기류 흐름을 반영한 모델 오차를 결합 자료동화에 응용하면, 시공간적으로 유연한 확률 예측 체계를 구축할 수 있을 것이다. 다만 전통적인 변분 자료동화 기법은 모델 오차의 비정규분포 특성과 모델-관측연산자의 비선형성을 다루는데 한계가 있는 만큼, 파티클 필터(particle filter) 등 유연한 앙상블 자료동화 기법에 대한 최신 연구 동향도 주목할 필요가 있다.

최근 학계의 연구 중심이 기후 분석과 기후변화 전망 수치모의의 분야로 이동하면서, 상대적으로 일기예보를 위한 수치모델링과 자료동화 분야에는 인재 양성이 더딘 반면, 현장에서는 이 분야의 인재 수요가 거꾸로 늘어나는 추세다. 수치예보 분야 안에서도 모델의 역학 체계에 관한 연구는 상대적으로 빈약하고, 모델을 병렬화하는 소프트웨어 기반 연구도 주로 현장 기관을 중심으로 제한적으로 수행되어왔다. 자료동화분야도 범용 변분 자료동화 기법이 보급되면서 관측 민감도 연구로 확대되어 오기는 했지만, 동화 기법 자체의 원천 연구는 여전히 미흡한 편이다. 원격탐사 분야에서도 복사전달모델을 이용한 대기 분석(retrieval) 연구가 많이 나오고 있음에도 불구하고, 이를 현장 수치모델의 자료동화에 접목한 연구는 상대적으로 적은 편이다. 앙상블 예측 분야에서도 민감도 예측 실험 연구는 많이 나와 있지만, 이를 앙상블 변분 자료동화에 응용한 연구도 부족하다.

수치예보 분야가 학연관의 협동으로 그동안 성공적으로 발전해 온 것을 생각해 보면, 선진국과 비교 우위에 설 수 있는 분야임이 자명해진다. 학연관 소통을 통해서 대기과학 분야의 균형 발전과 미래 인재 양성을 위한 전략적 논의가 필요한 시점이다. 아울러 WMO의 연구 프로그램의 일환으로 추진중인 각종 국제 비교실험에 보다 능동적으로 참여하는 것도 우리 과학 수준의 위상을 점검하고 상대적으로 취약한 분야를 진단하는데 도움이 될 것이다.

국내외적으로 범용 수치모델과 자료동화 체계의 확산이 현장 수치예보 서비스 발전에 크게 기여해왔다는 점을 확인하기라도 하듯이, 미국이나 영국에서는

현장 모델을 범용화해서라도 연구의 현장화(R2O)를 촉진하겠다는 시도가 잇따르고 있다. 국내에서는 한국형 모델을 범용 모델화하여 학계에 보급하기 위한 사업이 진행 중이다. 범용 모델과 시험자료가 공개되어 누구나 쉽게 한국형 모델을 가지고 사례 실험을 하거나 모델의 구성 요소를 개량하는 연구를 할 수 있게 된다면, 국내 수치예보의 또 한 단계 도약을 기대해 볼 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 본 연구는 기상청 출연사업인 (재)차세대수치예보모델개발사업단의 가변 격자체계 기반 통합형수치예보모델 개발(KMA2020-02212) 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

ACRONYMS

1DVar	1D Variational data assimilation
3DVar	3D Variational data assimilation
4DVar	4D Variational data assimilation
4DEnVar	4D Ensemble Variational data assimilation
AC	Anomaly Correlation coefficient
ADAM	Asian Dust Aerosol Model
AIRS	Atmospheric InfraRed Sounder
ALADIN	Atmospheric Laser Doppler Instrument
AMIPS	Atmospheric Model Intercomparison Project
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A
AMV	Atmospheric Motion Vector
AOT	Aerosol Optical Thickness
ARPS	Advanced Regional Prediction System
A-S	Arakawa Schubert
ASCAT	Advanced Scatterometer
ATMS T	Advanced Technology Microwave Sounder Temperature channels
ATMS WV	Advanced Technology Microwave Sounder Water Vapor channels
ATOVS	Advanced TIROS Operational Vertical Sounder
AWIPS	Advanced Weather Interactive Processing System

AWS	Automatic Weather Station
BATS	Barotropic Adaptive-grid Typhoon Simulation
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
BMA	Bayesian Model Averaging
BUFR	Binary Universal Form for the Representation of meteorological data
CAM	Community Atmosphere Model
CAM-SE	Community Atmosphere Model with Spectral Element dynamics
CCM	Community Climate Model
CGCM	Coupled Global Climate Model
CICE	Los Alamos Sea Ice Model
CLD	Cloud fraction scheme
CMAQ	Community Model for Air Quality
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
COMS	Communication, Ocean, and Meteorological Satellite
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
CPS	Convective Parameterization Scheme
CrIS	Cross-track Infrared Sounder
CSR	Clear Sky Radiance
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DA	Data Assimilation
DSA-5	Densités Spectro-Angulaires model version 5
DSS	Direct Stiffness Summation
DVAR	Double-Fourier-Series BARotrophic Typhoon-Prediction Model
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather and Forecasting
EMOS	Ensemble MOS
ERA	ECMWF Reanalysis
ESM	Earth System Model
ETKF	Ensemble Transform Kalman Filter
FGAT	First Guess at Appropriate Time
FSL	Forecast System Laboratory
FV3	Finite-Volume Cubed-Sphere
GASS	Global Atmospheric System Studies Panel
GCM	Global Climate Model
GEM	Generalized Equivalent Markov
GEOS-CHEM	Goddard Earth Observing System Global chemistry transport model
GEWEX	Global Energy and Water Exchanges

GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	LENS	Limited Area Ensemble Prediction System
GFS	Global Forecast System	LEOGEO	Low Earth Orbit-Geostationary satellites
GIFS	THORPEX Interactive Grand Global Ensemble	LES	Large-Eddy Simulation
GloSea5	Global Seasonal Forecast System version 5	LETKF	Local Ensemble Transform Kalman Filter
GME	Globales Modell	LIS	Land Information System
GODAPS	Global Ocean Data Assimilation and Prediction System	LSM	Land Surface Model
GP-GPU	General-Purpose Graphics Processing Unit	MAPLE	McGill Algorithm for Precipitation nowcasting by Lagrangian Extrapolation
GPS-RO	Global Position System-Radio Occultation	MAS	Mesoscale Atmospheric Simulation
GPU	Graphics Processing Unit	MCT	Model Coupling Toolkit
GRIMs	Global/Regional Integrated Model system	METAR	METEorological Aerodrome Report
G-RSM	Global and Regional Spectral Model	MetOp-B	Meteorological Operational satellite-B
GSM	Global Spectral Model	MHS	Microwave Humidity Sounder
GWD	Gravity Wave Drag	MJO	Madden Julian Oscillation
GWDo	Gravity Wave Drag induced by Orography	MM	Mesoscale Model
HLOS	Horizontal Line-Of-Sight	MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
HYCOM	Hybrid Coordinate Ocean Model	MoM	Modular Ocean Model
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer	MOS	Model Output Statistics
IAU	Incremental Analysis Update	MPAS	Model for Prediction Across Scales
ICON	Icosahedral Non-hydrostatic	MPI	Message Passing interface
IFS	Integrated Forecasting System	MPS	Microphysics scheme
I/O	Input/Output	MRI	Meteorological Research Institute
JCDAS	JMA Climate Data Assimilation System	NCAR	National Center for Atmospheric Research
JMA	Japan Meteorological Administration	NCEP	National Centers for Environmental Prediction
KAF	Korean Air Force	NDFD	National Digital Forecast Database
KF	Kain-Fritsch scheme	NEMO	Nucleus for European Modeling of the Ocean
KIAPS	Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems	NEMOVAR	NEMO Variational Data Assimilation
KIM	Korean Integrated Model	NGGPS	Next-Generation Global Prediction System
KISTI	Korea Institute of Science and Technology Information	NIM	Non-hydrostatic icosahedral model
KLAPS	Korea Local Analysis and Prediction System	NNMI	Nonlinear Normal Mode Initialization
KMA	Korea Meteorological Administration	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
KPOP	KIAPS Package for Observation Processing	Noah-MP	Noah MultiParameterization land surface model
KVAR	KIM VARiational data assimilation system	NWP	Numerical Weather Prediction
LAPS	Local Analysis and Prediction System	OASIS3	Ocean Atmosphere Sea Ice Soil version 3
		OSSE	Observing System Simulation Experiment

PBL	Planetary Boundary Layer	TYM	Typhoon Model
PGF	Pressure Gradient Force	UAM	Urban Air Mobility
PIREP	PIlot REPort	UK	United Kingdom
PNU	Pusan National University	UM	Unified Model
PPM	Perfect Prog Method	UMOS	Updateable MOS
PRISM	Parameter-elevation Regression on Independent Slope Model	US	United States
QC	Quality Control	UTC	Universal Time Coordinates
R2O	Research to Operation	VarBC	Variational Bias Correction
RAD	Radiation scheme	VDRAS	Variational Doppler Radar Assimilation System
RAMS	Regional Atmospheric Modelling System	VSRF	Vert Short Range Forecast scheme
RCM	Regional Climate Model	WAM	Wave Modelling
RMSE	Root-Mean-Square Error	WMO	World Meteorological Organization
RRTMK	Rapid Radiative Transfer Model for KIM	WRF	Weather and Research Forecasting model
RSL	Runtime System Library	WRF-Chem	Weather and Research Forecasting coupled with CHEMistry
RSM	Regional Spectral Model	WISE	Weather Information Service Engine
RTPS	Relaxation To Prior Spread method	WSM	WRF Single-Moment microphysics scheme
SAPHIR	Sounder Atmospherique de Profil d'Humidite Intertropical par Radiometrie	WW3	Wave Watch III
SAS	Simplified Arakawa-Schubert scheme	YSU	Yonsei University
SCAN	System for Convection Analysis and Nowcasting	YONU	Yonsei University
SCV	Shallow Convection scheme		
SEM	Spectral Element Method		
Si3	Sea Ice Modeling Integrated Initiative		
SIB	Simple Biosphere model		
SMIT	Single Instruction Multiple Threads		
SNU	Seoul National University		
SPDT	Stochastically Perturbed Dynamical Tendency		
SPPT	Stochastically Perturbed Physical Tendency		
SPS	Soil Plant Snow model		
SSMIS	The Special Sensor Microwave Imager / Sounder		
SST	Sea Surface Temperature		
THORPEX	The Observing System Research and Predictability Experiment		
TIGGE	THORPEX Interactive Grand Global Ensemble		
TMPA	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis		
T-PARC	Pacific Asian Regional Campaign		
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission		
TSP	Total suspended particulate		

REFERENCES

- Ahn, J.-B., J. Hur, and A.-Y. Lim, 2014: Estimation of fine-scale daily temperature with 30m-resolution using PRISM. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 101-110, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.1.101.
- _____, and J. Lee, 2015: Comparative study on the seasonal predictability dependency of boreal winter 2 m temperature and sea surface temperature on CGCM initial conditions. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 353-366, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.2.353.
- Ahn, M.-H., J. Kim, G.-W. Lee, and S.-W. Kim, 2023: A progress status of remote sensing in the Korean Meteorological Society. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 197-222, doi: 10.14191/Atmos.2023.33.2.197.
- Bae, S. Y., and R.-S. Park, 2019: Consistency between the cloud and radiation processes in a numerical forecasting model. *Meteor. Atmos. Phys.*, **131**, 1429-1436, doi: 10.1007/s00703-018-0647-9.
- _____, S.-Y. Hong, and K.-S. Lim, 2016: Coupling WRF double-moment 6-class microphysics schemes to RRTMG radiation scheme in weather research forecasting model. *Adv. Meteor.*, doi: 10.1155/5070154.
- Baek, S. H., 2017: A revised radiation package of G-packed McICA and two-stream approximation: Per-

- formance evaluation in a global weather forecasting model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, doi: 10.1002/2017MS000994.
- Byun, U.-Y., and Coauthors, 2011: WRF-based short-range forecast system of the Korea Air Force: verification of prediction skill in 2009 summer. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **21**, 197-208, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.2.197.
- Byun, Y.-H., and S.-Y. Hong, 2007: Improvements in the subgrid-scale representation of moist convection in a cumulus parameterization scheme: the single-column test and its impact on seasonal prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2135-2154.
- Chang, D.-E., and D.-K. Lee, 1989: A simulation study of the tropical cyclone Vera using a mesoscale numerical model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 148-167.
- Chang, E.-C., and K. Yoshimura, 2015: A semi-Lagrangian advection scheme for radioactive tracers in the NCEP regional spectral model (RSM). *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3247-3255, doi: 10.5194/gmd-8-3247-2015.
- Chang, P.-H., and Coauthors, 2021: Global ocean data assimilation and prediction system in KMA: description and assessment. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 229-240, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.2.229.
- Cheong, H.-B., 1999a: Solution of elliptic equation on a sphere using double Fourier series. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 247-253.
- _____, 1999b: A spectral method using double Fourier series on a sphere: application of spherical harmonics filter to the vorticity equation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 254-262.
- _____, 2001: Solution of elliptic equations on a sphere using double Fourier series. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 247-253.
- _____, 2005: Spectral Galerkin-finite difference combined method for reduced grid system on the sphere. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 481-494.
- _____, 2006: A dynamical core with double Fourier series: comparison with the spherical harmonics method. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1299-1315.
- _____, and H.-G. Kang, 2015: Eigensolutions of the spherical Laplacian for the cubed-sphere and icosahedral-hexagonal grids. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 3383-3398, doi: 10.1002/qj.2620.
- _____, and I.-H. Kwon, 2007: Use of aliased DFS spectral method for the shallow water equations on the sphere. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 429-447.
- _____, Y.-J. Nam, C.-H. Lee, and J.-J. Kim, 2021: Isotropic high-order filter for a local domain on the sphere. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 149-160, doi: 10.1007/s13143-020-00177-3.
- Cho, J.-Y., and J.-W. Kim, 1983: A synoptic structure of the vertical P-velocity: I. adiabatic calculation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **19**, 51-58.
- Choi, H.-J., and Coauthors, 2018: Effects of non-orographic gravity wave drag on seasonal and medium-range predictions in a global forecast model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 385-402, doi: 10.1007/s13143-018-0023-1.
- _____, and H.-Y. Chun, 2011: Momentum flux spectrum of convective gravity waves. Part I: an update of a parameterization using mesoscale simulations. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 739-759, doi: 10.1175/2010JAS3552.1.
- _____, and S.-Y. Hong, 2015: An updated subgrid orographic parameterization for global atmospheric forecast models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 12445-12457, doi: 10.1002/2015JD024230.
- Choi, J.-T., and J.-Y. Cho, 2001: Prediction of Max/Min temperatures using PPM. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 465-474.
- _____, and _____, 2002: The objective prediction of probability of precipitation (PoP) based on PPM. *J. Korean Meteor. Soc.*, **38**, 119-127.
- _____, and T.-Y. Lee, 2000: Capability of observing systems over the Korean Peninsula for the observation of mesoscale atmospheric structure- a study using observing system simulation experiments. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 619-630.
- Choi, S.-J., 2018: Structure of eigenvalues in the advection-diffusion equation by the spectral element method on a cubed sphere. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 293-301, doi: 10.1007/s13143-018-0020-4.
- _____, F. X. Giraldo, J. Kim, and S. Shin, 2014: Verification of non-hydrostatic dynamical core using the horizontal spectral element method and vertical finite difference method. *Geosci. Model Dev.*, **7**, 2717-2731, doi: 10.5194/gmd-7-2717-2014.
- _____, and J. B. Klemp, 2021: A new hybrid sigma-pressure vertical coordinate with smoothed coordinate surfaces. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 4077-4089, doi: 10.1175/MWR-D-21-0086.1.
- _____, and S.-Y. Hong, 2016: A global non-hydrostatic dynamical core using the spectral element method on a cubed-sphere grid. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 291-307, doi: 10.1007/s13143-016-0005-0.
- Choi, Y.-W., and J.-B. Ahn, 2017: Impact of cumulus parameterization schemes on the regional climate simulation for the domain of CORDEX-East Asia

- phase 2 using WRF model. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 105-118, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.1.105.
- Choo, S.-H., P.-H. Chang, S.-O. Hwang, H.-J. Jo, J. Lee, S.-M. Lee, Y.-K. Hyun, and J.-H. Moon, 2021: Assessment of assimilation impact of Argo float observations in marginal seas around Korean peninsula through observing system experiments. *Atmosphere*, **31**, 283-294, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.3.283.
- Chun, H.-Y., H.-J. Choi, and I.-S. Song, 2008: Effects of nonlinearity on convectively forced internal gravity waves: application to gravity wave drag parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 557-575.
- _____, and J.-J. Baik, 1998: Momentum flux by thermally induced internal gravity waves and its approximation for large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3299-3310.
- _____, and S.-B. Kim, 1997: Sensitivity of the biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) to the parameter values for Suwon province. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 521-534.
- Chun, J.-M., S.-Y. Lee, K.-R. Kim, and Y.-J. Choi, 2014: A study of the urban heat island in Seoul using local analysis system. *J. KOSAE*, **30**, 119-127, doi: 10.5572/KOSAE.2012.28.2.119.
- Chung, K.-Y., D. Barker, S.-O. Moon, E.-H. Jeon, and H.-S. Lee, 2007: Comparison of ensemble perturbations using Lorenz-95 model: bred vectors, orthogonal bred vectors and ensemble transform Kalman filter (ETKF). *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **17**, 217-230.
- _____, and S.-U. Park, 1997: Numerical simulations of Yellow Sand events observed in Korea: I. an aerosol modelling and preliminary results. *Korean J. Atmos. Sci.*, **33**, 179-199.
- Chung, S.-K., and S.-S. Kim, 1983: Linear baroclinic instability on the Changma front. *J. Korean Meteor. Soc.*, **19**, 37-46.
- Dudhia, J., S.-Y. Hong, and K.-S. S. Lim, 2008: A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86A**, 33-44.
- Gates, W. L., and Coauthors, 1999: An overview of the results of the atmospheric model intercomparison project (AMIP I). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 29-55.
- Glahn, H. R., and D. P. Ruth, 2003: The new digital forecast database of the national weather service. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 195-201.
- Ha, J.-C., D.-E. Chang, and C.-H. Cho, 2007: The assimilation of SSM/I rain rates into a mesoscale model with latent heat nudging method. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 285-298.
- Ha, J.-H., J.-H. Kang, and S.-J. Choi, 2018: The impact of vertical resolution in the assimilation of GPS radio occultation data. *Wea. Forecasting*, **33**, 1033-1044, doi: 10.1175/WAF-D-17-0061.1.
- Ha, K.-J., and J.-W. Kim, 1987: A quasi-geostrophic model for sea level pressure forecast. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 91-102.
- _____, _____, K.-Y. Kim, and J.-Y. Moon, 1998: Sensitivity experiments of an atmospheric general circulation model to coupling of a multi-layer land surface model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 630-642.
- Ha, W.-S., and J.-G. Lee, 2011: WRF sensitivity experiments on the choice of Land Cover Data an event of sea breeze over the Yeongdong region. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **21**, 373-389, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.4.373.
- Ham, S., and S.-Y. Hong, 2013: Sensitivity of simulated intraseasonal oscillation to four convective parameterization schemes in a coupled climate model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 483-496, doi: 10.1007/s13143-013-0043-9.
- Han, J., and C. S. Bretherton, 2019: TKE-based Moist Eddy-Diffusivity Mass-Flux (EDMF) Parameterization for Vertical Turbulent Mixing. *Wea. Forecasting*, **34**, 869-886, doi: 10.1175/WAF-D-18-0146.1.
- _____, 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.
- _____, W. Wang, Y.-C. Kwon, S.-Y. Hong, V. Tallapragada, and F. Yang, 2017: Updates in the NCEP GFS cumulus convection schemes with scale and aerosol awareness. *Wea. Forecasting*, **32**, 2005-2017, doi: 10.1175/WAF-D-17-0046.1.
- 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.
- _____, S.-Y. Hong, 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). *Mon. Wea. Rev.*, **35**, 1113-1128, doi: 10.1175/WAF-D-19-0219.1.

- _____, S.-Y. Kim, I.-J. Choi, and E. K. Jin, 2019: Effects of the convective triggering process in a cumulus parameterization scheme on the diurnal variation of precipitation over East Asia. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **10**, doi: 10.3390/atmos10010028.
- Han, K., J.-T. Choi, and C. Kim, 2018: Comparison of statistical post-processing methods for probabilistic wind speed forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 91-101, doi: 10.1007/s13143-017-0062-z.
- Ho, C.-H., B.-G. Kim, B.-M. Kim, D.-S. Park, C.-K. Park, S.-W. Son, J.-H. Jeong, and D.-H. Cha, 2023: Review of the weather hazard research: focused on typhoon, heavy rain, drought, heat wave, cold surge, heavy snow, and strong wind. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 223-246, doi: 10.14191/Atmos.2023.33.2.223.
- _____, and I.-S. Kang, 1996: A parameterization of the terrestrial radiation suitable for a climate model: absorption bands of water vapor. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 29-39.
- Hong, K.-O., M. S. Suh, D.-K. Rha, D.-H. Chang, C. Kim, and M.-K. Kim, 2007: Estimation of high-resolution gridded temperature using GIS and PRISM. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **17**, 255-268.
- _____, _____, J.-H. Kang, and C. Kim, 2010: Development of updateable model output statistics (UMOS) system for the daily maximum and minimum temperature. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **20**, 73-89, doi: 10.1007/s13143-011-0009-8.
- Hong, S.-Y., 2010: A new stable boundary-layer mixing scheme and its impacts on the simulated East Asian summer monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1481-1496, doi: 10.1002/qj.665.
- _____, and Coauthors, 2013a: The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 219-243, doi: 10.1007/s13143-013-0023-0.
- _____, and Coauthors, 2013b: An evaluation of the software system dependency of a global atmospheric model. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 4165-4172, doi: 10.1175/MWR-D-12-00352.1.
- _____, and D.-K. Lee, 1987: A numerical simulation of the winter cyclone in a mesoscale model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 35-55.
- _____, and E.-C. Chang, 2012: Spectral nudging sensitivity experiments in a regional climate model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 345-355, doi: 10.1007/s13143-012-0033-3.
- _____, and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- _____, and H.-L. Pan, 1998: Convective trigger function for a mass-flux cumulus parameterization scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2599-2620.
- _____, and J. Choi, 2006: Sensitivity of the simulated regional climate circulations over East Asia in 1997 and 1998 summers to three convective parameterization schemes. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **42**, 361-378.
- _____, J. Choi, E.-C. Chang, H. Park, and Y.-J. Kim, 2008: Lower tropospheric enhancement of gravity wave drag in a global spectral atmospheric forecast model. *Wea. Forecasting*, **23**, 523-531.
- _____, J. Duhdia, and S.-H. Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103-120.
- _____, and J. Jang, 2018: Impacts of shallow convection processes on a simulated boreal summer climatology in a global atmospheric model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 361-370, doi: 10.1007/s13143-018-0013-3.
- _____, and M. Kanamitsu, 2014: Dynamic downscaling: fundamental issues from an NWP point of view and recommendation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 83-104, doi: 10.1007/s13143-014-0029-2.
- _____, S. Ham, Y.-H. Byun, and J. Kim, 2009: Investigation of ice-cloud radiation interaction in a general circulation model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 391-409.
- _____, and Y. Noh, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- _____, 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.
- Hwang, Y.-J., and Coauthors, 2012: Predictability for heavy rainfall over the Korean Peninsula during the summer using TIGGE model. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **22**, 287-298, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.3.287.
- Hyun, J.-H., and D.-K. Lee, 1990: Simulation of sea-land breeze over Jeju Island on a three-dimensional meso-scale model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 121-136.
- Hyun, S.-H., S.-O. Hwang, S.-M. Lee, S.-H. Choo, 2022: Verification of the KMA ocean model NEMO against Argo floats and drift buoys: a comparison with the up-to-date US navy HYCOM. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 71-84, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.1.071.
- In, H. J., and S. U. Park, 2002: A simulation of long-range transport of Yellow Sand observed on April 1998 in Korea. *Atmos. Environ.*, **36**, 4173-4187.

- _____, and _____, 2003: Estimation of dust deposition for the yellow Sand event observed in April 1998 in Korea. *Korean J. Atmos. Sci.*, **6**, 13-25.
- Jang, J., and S.-Y. Hong, 2016: Comparison of simulated precipitation over East Asia in two regional models with hydrostatic and nonhydrostatic dynamical cores. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3579-3590, doi: 10.1175/MWR-D-15-0428.1.
- Jee, J.-B., and Coauthors, 2016: Sensitivity analysis of the high-resolution WISE-WRF model with the use of surface roughness length in Seoul metropolitan areas. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 111-126, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.1.111.
- _____, J.-S. Min, M. Jang, Y.-B. Kim, I.-S. Zo, and K.-T. Lee, 2017: Sensitivity Analysis of Numerical Weather Prediction Model with Topographic Effect in the Radiative Transfer Process. *Atmosphere*, **27**, 385-398, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.4.385.
- _____, and K.-T. Lee, 2013: Parameterization for Long-wave Scattering Properties of Ice Clouds with Various Habits and Size Distribution for Use in Atmospheric Models. *Atmosphere*, **23**, 39-45, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.1.039.
- _____, and S. Kim, 2016: Sensitivity study on high-resolution numerical modeling of static topographic data. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **7**, doi: 10.3390/atmos7070086.
- Jeong, G.-R., B. M. Monge-Sanz, E.-H. Lee, and J. R. Ziemke, 2016: Simulation of stratospheric ozone in global forecast model using linear photochemistry parameterization. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 479-494, doi: 10.1007/s13143-016-0032-x.
- Jeong, H.-B., H.-W. Chun, and S. Lee, 2019a: A Study of Iterative QC-BC Method for AMSU-A in the KIAPS Data Assimilation System. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **29**, 241-255, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.3.241.
- Jeong, J.-H., and Coauthors, 2017: The status and prospect of seasonal climate prediction of climate over Korea and east Asia: a review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 149-173.
- Jeong, Y.-C., S.-W. Yeh, S. Lee, and R. J. Park, 2019b: A global/regional integrated model system-chemistry climate model: I. simulation characteristics. *Earth and Space Sci.*, **6**, 2016-2030, doi: 10.1029/2019EA000727.
- 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.
- Jo, Y., J.-S. Kang, and H. Kwon, 2015: Optimization of the vertical localization scale for GPS-RO data assimilation within KIAPS-LETKF system. *Atmosphere*, **25**, 529-541, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.3.529.
- 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.
- Juang, H.-M., and S.-Y. Hong, 2010: Forward semi-Lagrangian advection with mass conservation and positive definiteness for falling hydrometeors. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1778-1791, doi: 10.1175/2009MWR3109.1.
- Jun, S., J.-H. Park, H.-J. Choi, Y.-H. Lee, Y.-J. Lim, K.-O. Boo, and H.-S. Kang, 2021: Impact of Soil Moisture Data Assimilation on Analysis and Medium-Range Forecasts in an Operational Global Data Assimilation and Prediction System. *Atmosphere*, **12**, 1089, doi: 10.3390/atmos12091089.
- Jung, B.-J., H.-M., Kim, T. Auligné, X. Zhang, X. Zhang, and X.-Y. Huang, 2013: Adjoint-derived observation impact using WRF in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 4080-4097, doi: 10.1175/MWR-D-12-00197.1.
- _____, H.-M. Kim, Y.-H. Kim, E.-H. Jeon, and K.-H. Kim, 2010: Observation system experiments for Typhoon Jangmi (200815) observed during T-PARC. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 305-316, doi: 10.1007/s13143-010-1007-y.
- _____, S. Kim, and Y. Jo, 2014: Representer-based variational data assimilation in a spectral element shallow water model on the cubed-sphere grid. *Tellus A*, **66**, 24493, doi: 10.3402/tellusa.v66.24493.
- Kang, H.-S., and S.-Y. Hong, 2008: An assessment of the land surface parameters on the simulated regional climate circulations: the 1997 and 1998 east Asian summer monsoon cases. *J. Geophys. Res.*, **113**, D15121.
- Kang, J.-H., and Coauthors, 2018: Development of an observation processing package for data assimilation in KIAPS. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 303-318, doi:

- 10.1007/s13143-018-0030-2.
- _____, M.-S. Suh, and C.-H. Kwak, 2007: Comparison of the land cover data sets over Asian region: USGS, IGBP, and UMD. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **17**, 159-169.
- Kang, J.-Y., S.-Y. Bae, R.-S. Park, and J.-Y. Han, 2019: Aerosol indirect effects on the predicted precipitation in a global weather forecasting model. *Atmosphere*, **10**, 392, doi: 10.3390/atmos10070392.
- Kang, M.-J., H.-Y. Chun, and Y.-H. Kim, 2017: Momentum flux of convective gravity waves derived from an offline gravity wave parameterization. Part I: spatio-temporal variations at source level. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 3167-3189, doi: 10.1175/JAS-D-17-0053.1.
- Kang, M.-S., M. Belorid, and K.-R. Kim, 2020: Development of impact-based heat health warning system based on ensemble forecasts of perceived temperature and its evaluation using heat-related patients in 2019. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 195-207, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.2.195.
- Kay, J.-K., and H.-M. Kim, 2014: Characteristics of initial perturbations in the ensemble prediction system of the Korea Meteorological Administration. *Wea. Forecasting*, **29**, 563-581, doi: 10.1175/WAF-D-13-00097.1.
- _____, _____, Y.-Y. Park, and J. Son, 2013: Effect of doubling the ensemble size on the performance of ensemble prediction in the warm season using MOGREPS implemented at the KMA. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**, 1287-1302, doi: 10.1007/s00376-012-2083-y.
- Kelly, J. F., and F. X. Geraldo, 2012: Continuous and discontinuous Galerkin methods for a scalable three-dimensional nonhydrostatic atmosphere model: limited area mode. *J. Comput. Phys.*, **231**, 7988-8008, doi: 10.1016/j.jcp.2012.04.042.
- KIAPS, 2011: *History of operational numerical weather prediction in Korea*. Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, 436pp (in Korean).
- Kim, C.-H., R. Park, S.-H. Lee, S.-W. Kim, and C.-K. Song, 2023: 60-year research history and future prospects in environment field in Korean Meteorological Society. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 173-195, doi: 10.14191/Atmos.2023.33.2.173.
- Kim, H., J. Lee, Y.-K. Hyun, and S.-O. Hwang, 2021: The KMA global seasonal forecasting system (GloSea6) – Part I: operational system and improvements. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 341-359, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.3.341.
- Kim, H.-J., I.-U. Chung, and K.-T. Lee, 2009: Effects of an advanced radiation parameterization on a troposphere-stratosphere AGCM simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 439-462.
- _____, I.-U. Chung, and M.-S. Joh, 2005: On the coupling of a land surface model to an atmospheric general circulation model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 1137-1149.
- _____, and J.-B. Ahn, 2015: Improvement in prediction of the arctic oscillation with a realistic ocean initial condition. *J. Climate*, **28**, 8951-8967, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00457.1.
- _____, and Y. Noh, 1999: Simulation of convective boundary layer using a new large eddy simulation model with the analysis on the effects of subgrid parameterization. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 587-598.
- Kim, H.-M., and B.-J. Jung, 2006: Adjoint-based forecast sensitivities of Typhoon Rusa. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L21813, doi: 10.1029/2006GL027289.
- _____, _____, Y.-H. Kim, and H.-S. Lee, 2008a: Adaptive observation guidance applied to typhoon Rusa: implications for THORPEX-PARC 2008. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 297-312.
- Kim, J., N. Miller, J. Oh, J. Chung, and D. Rha, 1998: Eastern Asian hydrometeorology simulation using the regional climate system model. *Global Planet. Change*, **18**, 225-240.
- Kim, J., and Coauthors, 2014a: Evaluation of the CORDEX-Africa multi-RCM hindcast: systematic model errors. *Climate Dyn.*, **42**, 1189-1202, doi: 10.1007/s00382-013-1751-7.
- _____, Y. C. Kwon, and T.-H. Kim, 2018: A scalable high-performance I/O System for a numerical weather forecast model on the cubed-sphere grid (in press). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, doi: 10.1007/s13143-018-0021-3.
- Kim, J.-E., and S.-Y. Hong, 2007: Impact of soil moisture anomalies on summer rainfall over east Asia: a regional climate model study. *J. Climate*, **20**, 5732-5734.
- Kim, J.-U., and Coauthors, 2020: Evaluation of performance and uncertainty for multi-RCM over CORDEX-East phase 2 region. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 361-376, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.4.361.
- Kim, J.-W., 1983: A numerical model of weather prediction over Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **19**, 33-50.
- _____, and J.-T. Wang, 1981: The January and July heat balance simulated by the OSU two-level atmospheric general circulation model. Report. No. 28, *Climatic Res. Institute*, Oregon State University, Corvallis, 55pp.

- Kim, J.-Y., J.-H. Oh, D.-Y. Kim, and P. Sen, 2008b: Prediction of rainfall with high-resolution model using public-resource distributed computing. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 287-296.
- Kim, M.-K., and Coauthors, 2016: Statistical downscaling for daily precipitation in Korea using combined PRISM, RCM, and quantile mapping: part I, methodology and evaluation in historical simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 79-89, doi: 10.1007/s13143-016-0010-3.
- _____, D.-H. Lee, and J. Kim, 2013a: Production and validation of daily grid data with 1km resolution in South Korea. *J. Climate Res.*, **8**, 13-25.
- _____, M.-S. Han, D.-H. Jang, S.-G. Baek, W.-S. Lee, Y.-H. Kim, and S. Kim, 2012: Production technique of observation Grid data of 1km resolution. *J. Climate Res.*, **7**, 55-68.
- Kim, O.-Y., and J.-H. Oh, 2010: Verification of the performance of the high resolution QPF model for heavy rainfall event over the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 119-133, doi: 10.1007/s13143-010-0012-5.
- Kim, S., B.-J. Jung, and Y. Jo, 2014b: Development of a tangent linear model (version 1.0) for the High-Order Method Modeling Environment dynamical core. *Geosci. Model Dev.*, **7**, 1175-1182, doi: 10.5194/gmd-7-1175-2014.
- _____, H.-M. Kim, E. J. Kim, and H.-C. Shin, 2013b: Forecast sensitivity to observations for high-impact weather events in the Korean Peninsula. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 171-186, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.2.171.
- Kim, S.-H., H.-Y. Chun, R. D. Sharman, and S. B. Trier, 2019a: Development of near-cloud turbulence diagnostics based on a convective gravity-wave drag parameterization. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **58**, 1725-1750, doi: 10.1175/JAMC-D-18-0300.1.
- 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. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 93-104, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.1.093.
- _____, _____, S.-W. Joo, H.-C. Shin, and D. Won, 2011: Development of tools for calculating forecast sensitivities to the initial condition in the Korea Meteorological Administration (KMA) Unified Model (UM). *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **21**, 163-172.
- Kim, S.-Y., J.-Y. Han, I.-J. Choi, and S.-Y. Bae, 2014c: Evaluation of cloud and precipitation parameterization using a single-column model: a TWP-ICE case study. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 469-480, doi: 10.1007/s13143-014-0037-2.
- _____, and S.-Y. Hong, 2018: The Use of Partial Cloudiness in a Bulk Cloud Microphysics Scheme: Concept and 2D Results. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 2711-2719, doi: 10.1175/JAS-D-17-0234.1.
- _____, S.-Y. Hong, Y.-C. Kwon, Y.-H. Lee, and D.-E. Kim, 2019b: Effects of Modified Surface Roughness Length over Shallow Waters in a Regional Model Simulation. *Atmosphere*, **10**, 818, doi: 10.3390/atmos10120818.
- Kim, Y.-H., E.-H. Jeon, D.-E. Chang, H.-S. Lee, and J.-I. Park, 2010: The impact of T-PARC 2008 dropsonde observations on typhoon track forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 287-303, doi: 10.1007/s13143-010-1011-2.
- Kim, Y.-J., 1996: Representation of subgrid-scale orographic effects in a general circulation model: part I. impacts on the dynamics of a simulated January climate. *J. Climate*, **9**, 2698-2717.
- _____, and A. Arakawa, 1995: Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1875-1902.
- _____, and J. D. Doyle, 2005: Extension of an orographic-drag parameterization scheme to incorporate orographic anisotropy and flow blocking. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **131**, 1893-1921.
- _____, S. D. Eckermann, and H.-Y. Chun, 2003: An overview of the past, present, and future of gravity-wave drag parameterization for numerical climate and weather prediction models. *Atmos.-Ocean*, **41**, 65-98.
- Kim, Y.-S., C.-H. Cho, and O.-R. Park, 2004: A three-dimensional cloud analysis for diabatic initialization of mesoscale model and its impact study. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 497-509.
- _____, O.-R. Park, and S.-O. Hwang, 2002a: Realtime operation of the Korea local analysis and prediction system at METRI. *J. Korean Meteor. Soc.*, **38**, 1-10.
- Kim, Y.-T., 2003: Parallel implementation of the MAS (mesoscale atmospheric simulation) model for distributed memory computers. *Korean J. Atmos. Sci.*, **6**, 63-69.
- _____, Y.-H. Lee, J.-T. Choi, and J.-H. Oh, 2002b: Implementation and performance analysis of PC clusters using fast PCs and high-speed networks. *Journal of KIISE: System and Theory*, **29**, 57-64.
- _____, _____, and K.-Y. Chung, 2013c: WRF physics

- models using GP-GPUs with CUDA Fortran. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 231-235, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.2.231.
- Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and S.-H. Park, 2015: Idealized Global Nonhydrostatic Test Case on a Reduced Radius Sphere. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, **7**, 1155-1177, doi: 10.1002/2015MS000435.
- KMA, 2019: *A study on the diagnosis and development direction of the forecasting system*. Korea Meteorological Administration, 107pp.
- Ko, E.-B., I.-J. Moon, Y.-Y. Jeong, and P.-H. Chang, 2018: A Comparison of accuracy of the ocean thermal environments using the daily analysis data of the KMA NEMO/NEMOVAR and the US Navy HYCOM/NCODA. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 99-112, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.1.099.
- Koo, M.-S., H.-J. Choi, and J.-Y. Han, 2018: A parameterization of turbulent-scale and mesoscale orographic drag in a global atmospheric model. *J. Geophys. Res.*, **123**, 8400-8417, doi: 10.1029/2017JD028176.
- _____, S.-H. Baek, K.-H. Seol, and K. Cho, 2017: Advances in land modeling of KIAPS based on the Noah land surface model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 361-373, doi: 10.1007/s13143-017-0043-2.
- _____, and S.-Y. Hong, 2012: Double Fourier series (DFS) dynamical core with hybrid sigma-pressure vertical coordinates and semi-Lagrangian moisture advection. Proceedings of the Autumn Meeting, *Korean Meteor. Soc.*, 152-153, doi: 10.3402/tellusa.v65i0.19851.
- Koo, T.-Y., S.-O. Moon, H.-B. Cheong, and W.-J. Lee, 2001: A study on ensemble prediction with breeding method. Proceedings of the Autumn Meeting, *Korean Meteor. Soc.*, 139-142.
- Kurihara, Y., M. A. Bender, R. E. Tuleya, and R. J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791-2801.
- Kwon, H.-J., and Coauthors, 2007: Performance of MTM in 2006 typhoon forecast. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **17**, 207-216.
- _____, S.-H. Han, and K.-S. Shin, 2001: Operational prediction of typhoon track at KMA using barotropic adaptive-grid typhoon simulation (BATS) model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 1157-1168.
- _____, and S.-H. Won, 2002: GFDL-type typhoon initialization in MM5. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2966-2974.
- Kwon, I.-H., and Coauthors, 2018a: Development of an operational hybrid data assimilation system at KIAPS. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 319-335, doi: 10.1007/s13143-018-0029-8.
- _____, S. English, W. Bell, R. Potthast, A. Collard, and B. Ruston, 2018b: Assessment of progress and status of data assimilation in numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, ES75-ES79, doi: 10.1175/BAMS-D-17-0266.1.
- Kwon, T.-Y., and Coauthors, 2006: Development of Yeong-dong heavy snowfall forecast supporting system. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **16**, 247-257.
- 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.
- Laprise, R., 1992: The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 197-207.
- Lee, D.-B., and H.-Y. Chun, 2018: Development of the global-Korean aviation turbulence guidance (global-KTG) system using the global data assimilation and prediction system (GDAPS) of the Korea Meteorological Administration (KMA). *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 223-232, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.2.223.
- _____, _____, S.-H. Kim, R. D. Sharman, and J.-H. Kim, 2022a: Development and evaluation of global Korean aviation turbulence forecast systems based on an operational numerical weather prediction model and in situ flight turbulence observation data. *Wea. Forecasting*, **37**, 371-392, doi: 10.1175/WAF-D-21-0095.1.
- Lee, D.-K., C.-H. Joung, S.-U. Park, S.-C. Yoon, and C.-W. Lee, 1991a: Numerical simulation of an explosive cyclogenesis near the East Asian coast. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 1-21.
- _____, and Coauthors, 1987: A study on numerical simulation of winter cyclone development in the East Asian coast area. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 1-22.
- _____, and D.-E. Chang, 1997: Sensitivity of cyclone development to initial data using an adjoint model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 364-384.
- _____, D.-Y. Eom, J.-W. Kim, and J.-B. Lee, 2010: High-resolution summer rainfall prediction in the JHWC real-time WRF system. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 341-353, doi: 10.1007/s13143-010-1003-2.
- _____, J.-G. Jhun, S.-Y. Hong, and H.-R. Kim, 1993: Numerical simulations of a heavy rainfall case occurred over central Korea during 10-12 September 1990. *J. Korean Meteor. Soc.*, **29**, 147-169.
- _____, and J.-G. Park, 2002: A comparison study of moist physics schemes in a simulation of East Asian heavy

- rainfall. *J. Korean Meteor. Soc.*, **38**, 581-592.
- _____, and K.-H. Lee, 2006: Sensitivity study of integration time-step size in simulations of heavy rainfall. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 379-388.
- _____, and S.-Y. Hong, 1989: A case study of the sensitivity of sea surface temperature on the mesoscale model simulation of winter cyclone development. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 1-14.
- _____, and S.-Y. Hong, 1991: Initialization experiments on a mesoscale numerical model for heavy rainfall simulation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 144-164.
- _____, S.-Y. Hong, J.-H. Bong, C.-W. Lee, and H.-S. Lee, 1994a: An operational regional-scale weather prediction model system for Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 413-422.
- _____, Y.-C. Kwon, and T.-K. Wee, 1992a: Typhoons approaching Korea, 1960~1989 Part II: prediction experiments on a mesoscale numerical model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 149-163.
- Lee, E.-J., and J.-G. Jhun, 1996: Development of normal mode initialization scheme in the tropics. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 169-188.
- Lee, E.-H., E. Lee, R.-S. Park, Y. C. Kwon, and S.-Y. Hong, 2018a: Impact of Turbulent Mixing in the Stratocumulus-Topped Boundary Layer on Numerical Weather Prediction. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 371-384, doi: 10.1007/s13143-018-0024-0.
- _____, J.-C. Ha, S.-S. Lee, and Y. Chun, 2013a: PM10 data assimilation over South Korea to Asian dust forecasting model with the optimal interpolation method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 73-85, doi: 10.1007/s13143-013-0009-y.
- Lee, H., and Coauthors, 2021: Development of the UKESM-TOPAZ earth system model (version 1.0) and preliminary evaluation of its biochemical simulations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 379-400, doi: 10.1007/s13143-021-00263-0.
- Lee, H., and J.-J. Baik, 2017: A physically based autoconversion parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 1599-1616, doi.org/10.1175/JAS-D-16-0207.1.
- Lee, J., and Coauthors, 2020a: Evaluation of the Korea Meteorological Administration advanced earth-system model (K-ACE). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 381-395, doi: 10.1007/s13143-019-00144-7.
- _____, J.-B. Ahn, and H.-G. Jeong, 2016a: A study on the method for estimating the 30m-resolution daily temperature extreme value using PRISM and GEV method. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 697-709, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.4.697.
- _____, 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. Korean Meteor. Soc.*, **21**, 85-93, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.1.085.
- Lee, J.-W., K.-H. Min, and K.-S. S. Lim, 2022b: Comparing 3DVAR and hybrid radar data assimilation methods for heavy rain forecast. *Atmos. Res.*, **270**, 106062, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106062.
- _____, _____, Y.-H. Lee, and G. Lee, 2020b: X-Net-Based radar data assimilation study over the Seoul metropolitan area. *Remote Sens. Environ.*, **12**, 893, doi: 10.3390/rs12050893.
- Lee, J.-B., and D.-K. Lee, 2011: Impact of cumulus parameterization schemes with different horizontal grid sizes on prediction of heavy rainfall. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **21**, 391-404, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.4.391.
- Lee, J.-G., and J.-S. Lee, 2003: A numerical study of Yeongdong heavy snowfall events associated with easterly. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 475-490.
- Lee, J.-W., and S.-Y. Hong, 2014: Potential for added value to downscale climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model. *Theor. Appl. Climatol.*, **117**, 667-677, doi: 10.1007/s00704-013-1034-6.
- Lee, K.-T., 1998: Parameterizations of radiation process for numerical climate models. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 548-559.
- _____, and J.-B. Jee, 2002: Parameterizations of infrared radiative transfer using correlated k-distribution method. *J. Korean Meteor. Soc.*, **38**, 141-153.
- _____, J.-W. Kim, S.-M. Lee, T.-Y. Lee, and K.-H. Lee, 1994b: Research on the parameterization processes in climate models: IV. A parameterization of radiation for a climate model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 363-376.
- Lee, M.-J., and D.-K. Lee, 2006: Effects of trigger function in the Kain-Fritsch cumulus parameterization scheme on heavy rainfall simulation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 397-410.
- Lee, M.-S., 2005: Preliminary tests of first guess at appropriate time (FGAT) with WRF 3dVar and WRF model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 495-505.
- _____, and D.-K. Lee, 2000: Characteristic of the propagation of observational information and its dynamical interactions produced by MM5 4dVar in different synoptic environments. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 601-618.

- Lee, M.-Y., D.-I. Lee, and W.-J. Lee, 1999: The forecasting the maximum/minimum temperature using the Kalman filter. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 283-289.
- Lee, S., and H.-J. Song, 2018: Impacts of LEOGEO Atmospheric Motion Vectors on East Asian weather forecasts. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **144**, 1914-1925, doi: 10.1002/qj.3392.
- _____, H.-J. Song, H.-W. Chun, I.-H. Kwon, J.-H. Kang, and S. Lim, 2020c: All-sky microwave humidity sounder assimilation in the Korean Integrated Model forecast system. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **146**, 3570-3586, doi: 10.1002/qj.3862.
- _____, H.-W. Chun, and H.-J. Song, 2018b: Impact of SAPHIR data assimilation in the KIAPS global numerical weather prediction system. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 141-151, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.2.141.
- _____, I.-H. Kwon, J.-H. Kang, H.-W. Chun, K.-H. Seol, H.-B. Jeong, and W.-H. Kim, 2022c: Data Assimilation of Aeolus/ALADIN Horizontal Line-Of-Sight Wind in the Korean Integrated Model Forecast System. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 27-37, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.1.027.
- _____, J.-H. Kim, J.-H. Kang, and H.-W. Chun, 2013b: Development of pre-processing and bias correction modules for AMSU-A satellite data in the KIAPS observation processing system. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 453-470, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.4.453.
- Lee, S., R.-J. Park, S.-Y. Hong, M.-S. Koo, J. I. Jeong, S.-W. Yeh, and S.-W. Son, 2022d: A new chemistry-climate model GRIMs-CCM: Model evaluation of interactive chemistry-meteorology simulations, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 647-666, doi: 10.1007/s13143-022-00281-6.
- Lee, S.-M., and Coauthors, 2014: Predictability study of snowfall case over South Korea using TIGGE data on 28 December 2012. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **24**, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.1.001.
- _____, H.-S. Kang, Y.-H. Kim, Y.-H. Byun, and C.-H. Cho, 2016b: Verification and comparison of forecast skill between global seasonal forecast system version 5 and unified model during 2014. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 59-72, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.1.059.
- _____, J.-W. Kim, H.-K. Cho, T.-Y. Lee, and K.-H. Lee, 1991b: Research on the parameterized processes in climate models: I. the change of surrounding by a transient shallow cumulus. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 257-266.
- Lee, S.-S., and Coauthors, 2017: Improved dust forecast by assimilating MODIS IR-based nighttime AOT in the ADAM2 model. *SOLA*, **13**, 192-198, doi: 10.2151/sola.2017-035.
- Lee, T.-Y., J.-W. Kim, H.-K. Cho, S.-M. Lee, and K.-H. Lee, 1992b: Research on the parameterized processes in climate models: II. Diurnal variation of stratocumulus-topped marine boundary layer. *J. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 9-28.
- _____, and S.-Y. Hong, 2005: Physical parameterization in next-generation NWP models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 1615-1618.
- Lee, W.-H., and K.-T. Jee, 2003: Thermal infrared radiation parameterization for gaseous absorption in YONU GCM. *J. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 415-429.
- Lee, W.-J., C.-W. Lee, and H.-J. Seong, 1984: A study on the 4-level quasi-geostrophic numerical model. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **17**, 211-219.
- _____, and M. Mak, 1995: Dynamics of stormtracks: a linear instability perspective. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 697-723.
- _____, and M. Mak, 1996: Role of orography in the dynamics of storm tracks. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1737-1750.
- Lee, Y.-H., and Coauthors, 2005: Development of Mongolian numerical weather prediction system (MNWPS) based on cluster system. *J. Korean Meteor. Soc.*, **15**, 35-46.
- _____, D.-H. Cha, and D.-K. Lee, 2008: Impact of horizontal resolution of regional climate model on precipitation simulation over the Korean Peninsula. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **18**, 387-395.
- Lee, Y., S. Shin, and J. Kim, 2020d: A monitoring system of ensemble forecast sensitivity to observation based on the LETKF framework implemented to global NWP model. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 103-113, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.2.103.
- Lim, H.-C., Y.-H. Byun, S. Park, and W.-T. Kwon, 2009: Changes in the characteristics of wintertime climatology simulation for METRI AGCM using the improved radiation parameterization. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **19**, 127-143.
- Lim, K.-S., 2019: Bulk-type cloud microphysics parameterization in atmospheric models. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **29**, 227-239, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.2.227.
- _____, and Coauthors, 2011: Aerosol effects on the development of a supercell storm in a double-moment

- bulk-cloud microphysics scheme. *J. Geophys. Res.*, **116**, D02204, doi: 10.1029/2010JD014128.
- _____, and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with a prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612, doi: 10.1175/2009MWR2968.1.
- Link, J., H. Tolman, and K. Robinson, 2017: NOAA's strategy for unified modelling. *Nature*, **549**, doi: 10.1038/549458b.
- Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock, 2001: Development of a next-generation regional weather research and forecast model. Developments in Teracomputing: Proceedings of the 9th ECMWF workshop on the use of high-performance computing in meteorology, 269-276.
- Miller, R. G., 1984: Very short-range statistical forecasting of automated weather observations. NOAA, DOT/FAA/PM-84/31, 25pp.
- Min, J.-S., J.-B. Jee, M. Jang, and J.-G. Park, 2017: A study on improvement of high-resolution regional NWP by applying ocean mixed layer model. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 317-329, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.3.317.
- Min, K.-H., K.-S. Chung, J.-W. Lee, C.-R. You, and G. Lee, 2022: Intercomparing radar data assimilation systems for ICE-POP 2018 snowfall cases. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 1-32, doi: 10.5194/gmd-2022-18.
- Nair, R. D., H.-W. Choi, and H. M. Tufo, 2009: Computational aspect of a scalable high-order discontinuous Galerkin atmospheric dynamical core. *Comput. Fluids*, **38**, 309-319.
- Niekerk, A. V., and Coauthors, 2020: Constraining Orographic Drag Effects (COORDE): a model comparison of resolved and parameterized orographic drag. *J. Adv. Modeling Earth Sys.*, **12**, e2020MS002160, doi: 10.1029/2020MS002160.
- Noh, Y., W.-G. Cheon, S.-Y. Hong, and S. Raasch, 2003: Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Bound.-Layer Meteor.*, **107**, 401-427.
- NSF, 1988: A study on statistical forecasting method in Korea. NSF, 228pp (in Korean).
- Oh, J.-H., J.-H. Jung, and J.-W. Kim, 1994: Radiative transfer model for climate studies: 1. solar radiation parameterization and validation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 315-333.
- _____, 1996: Radiative transfer model for climate studies: 2. longwave radiation parameterization for a clear sky. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 471-484.
- Oh, S.-G., and M.-S. Suh, 2019: Effects of irrigated cropland on the local and regional climate over northeast Asia in a regional climate model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 351-371, doi: 10.1007/s13143-018-0092-1.
- _____, M.-S. Suh, and D.-H. Cha, 2013: Impacts of lateral boundary conditions on precipitation and temperature extremes over South Korea in the CORDEX regional climate simulation using RegCM4. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 497-509, doi: 10.1007/s13143-013-0044-8.
- Oh, W.-T., 2003: History of meteorological activities at Korea Meteorological Administration. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **13**, 16-27.
- Park, H., and S.-Y. Hong, 2007: An evaluation of a mass-flux cumulus parameterization scheme in the KMA global forecast system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 151-169.
- Park, J.-R., H.-B. Cheong, and H.-G. Gang, 2011: High-order filter for the spherical surface limited area. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1256-1278, doi: 10.1175/2010MWR3440.1.
- Park, R.-S., J.-H. Chae, and S.-Y. Hong, 2016: A revised prognostic cloud fraction scheme in a global forecasting system. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1219-1229, doi: 10.1175/MWR-D-15-0273.1.
- _____, and Y. C. Kwon, 2018: The Implications for radiative cloud forcing via the link between shallow convection and planetary boundary layer mixing. *J. Geophys. Res.*, **123**, doi: 10.1029/2018JD028678.
- Park, S., 2014a: A unified convection scheme (UNICON). Part I: formulation. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3902-3930, doi: 10.1175/JAS-D-13-0233.1.
- _____, 2014b: A Unified Convection Scheme (UNICON). Part II: Simulation. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3931-3973, doi: 10.1175/JAS-D-13-0234.1.
- _____, 2017: A heuristic parameterization for the integrated vertical overlap of cumulus and stratus. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, 2437-2465, doi: 10.1002/2017MS001055.
- _____, S.-Y. Hong, and Y.-H. Byun, 2010: Precipitation in boreal summer simulated by a GCM with two convective parameterizations schemes: implications of the intraseasonal oscillation for dynamic seasonal prediction. *J. Climate*, **23**, 2801-2816, doi: 10.1175/2010JCLI3283.1.
- Park, S.-H., J.-B. Jee, and C. Yi, 2015: Sensitivity test of the numerical simulation with high resolution topography and landuse over Seoul metropolitan and sur-

- rounding area. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 309-322, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.2.309.
- _____, J. B. Klemp, and W. C. Skamarock, 2014: A comparison of mesh refinement in the global MPAS-A and WRF models using an idealized normal-mode baroclinic wave simulation. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 3614-3634, doi: 10.1175/MWR-D-14-00004.1.
- _____, and T.-Y. Lee, 2009: Accuracy tests for two-time-level split-explicit scheme. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 347-355.
- Park, S.-K., 2002: The observing system research and predictability experiment (THORpex) and potential benefit for Korea. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **12**, 463-467.
- _____, D.-L., Zhang, and H.-M., Lee, 2008: Impact of dropwindsonde data on the track forecasts of a tropical cyclone: an observing-systems simulation experiment study. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 85-92.
- _____, and E.-H. Lee, 2005; Characteristics on Land-Surface and Soil Models Coupled in Mesoscale Meteorological Models. *Atmosphere*, **15**, 1-16.
- _____, and E. Kalnay, 2004: Inverse three-dimensional variational data assimilation for an advection-diffusion problem: impact of diffusion and hybrid application. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L04102, doi: 10.1029/2003GL018830.
- _____, S. O, and C. Cassardo, 2017: Soil temperature response in Korea to a changing climate using a land surface model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 457-470, doi: 10.1007/s13143-017-0048-x.
- Park, S.-K., and Coauthors, 2005: Development of graphic editing module (GEM) for digital forecast. Proceedings of the Autumn Meeting, *Korean Meteor. Soc.*, 418-419.
- Park, S.-Y., and T.-Y. Lee, 2003: A case study on the dependence of simulated cumulus convection on horizontal grid size. *J. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 379-396.
- Park, Y.-J., and Y.-D. Han, 2021: Analysis on the Yeongdong downslope windstorms generation condition verified by observation cases. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 405-420, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.405.
- Parsons, D. B., and Coauthors, 2017: THORPEX research and the science prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 807-830, doi: 10.1175/BAMS-D-14-00025.1.
- Randall, D. A., and Coauthors, 2019: 100 years of Earth system model development. A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial. *Meteor. Monogr.*, **59**, doi: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0018.1.
- Rha, D.-K., M.-S. Suh, and C.-H. Kwak, 2005: Impacts of Land Cover Changes on the Simulation of Heavy Rainfall over South Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 809-824.
- Roberts, B., I. L. Jirak, A. J. Clark, S. J. Weiss, and J. S. Kain, 2019: Postprocessing and visualization techniques for convection-allowing ensembles. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 1245-1258, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0041.1.
- Schar, C., D. Leuenberger, O. Fuhrer, D. Luthi, and C. Girard, 2002: A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2459-2480.
- Seo, E., and Coauthors, 2016: Improvement of soil moisture initialization for a global seasonal forecast system. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 35-45, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.1.035.
- Shim, J.-K., and S.-Y. Hong, 2006: A study on the sensitivity of the simulations of typhoon Saomai (2000) to the cumulus parameterization and planetary boundary layer schemes in MM5. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 75-85.
- Shim, T.-H., and Coauthors, 2015: Development and assessment of dynamical seasonal forecast system using the cryospheric variables. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 155-167, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.1.155.
- Shin, D.-H., and T.-Y. Lee, 1997: Turbulence structure of the stratocumulus-topped marine boundary layer revealed by large eddy simulations. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 75-91.
- Shin, H.-H., and S.-Y. Hong, 2014: Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 250-271, doi: 10.1175/MWR-D-14-00116.1.
- Shin, S., and Coauthors, 2018: Real data assimilation using the local ensemble transform Kalman filter (LETKF) system for a global non-hydrostatic NWP model on the cubed-sphere. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 351-360, doi: 10.1007/s13143-018-0022-2.
- _____, J.-S. Kang, and Y. Jo, 2016: The local ensemble transform Kalman filter (LETKF) with a global NWP model on the cubed sphere. *Pure Appl. Geophys.*, **173**, 2555-2570, doi: 10.1007/s00024-016-1269-0.
- Shin, S.-C., M.-K. Kim, M.-S. Suh, D.-H. Jang, C.-S. Kim, W.-S. Lee, and Y.-H. Kim, 2008: Estimation of high-resolution gridded precipitation using GIS and PRISM. *Atmosphere. Korean Meteor. Soc.*, **18**, 71-81.

- Shin, S.-H., T.-Y. Lee, and S.-M. Lee, 1998: Interaction between the cumulus convection and surrounding atmosphere. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 376-389.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN- 4751STR, 113 pp.
- Skamarock, W. C., and J. B. Klemp, 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3465-3485.
- _____, _____, M. G. Duda, L. D. Fowler, and S.-H. Park, 2012: A multiscale nonhydrostatic atmospheric model using centroidal Voronoi tessellations and C-grid staggering. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3090-3105.
- Sohn, K.-T., and S.-D. Kim, 2001: Mid-term prediction of the daily maximum/minimum temperature in Seoul area using GDAPS outputs and dynamic linear models. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 13-20.
- Song, H.-J., and I.-H. Kwon, 2015: Spectral transformation using a cubed-sphere grid for a three-dimensional variational data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 2581-2599, doi: 10.1175/MWR-D-14-00089.1.
- _____, _____, and J. Kim, 2017a: Characteristics of a spectral inverse of the Laplacian using spherical harmonic functions on a cubed-sphere grid for background error covariance modeling. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 307-322, doi: 10.1175/MWR-D-16-0134.1.
- _____, J.-H. Ha, I.-H. Kwon, J. Kim, and J. Kwun, 2018: Multi-resolution Hybrid Data Assimilation Core on a Cubed-sphere Grid (HybDA). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 337-350, doi: 10.1007/s13143-018-0018-y.
- _____, J. Kwun, I.-H. Kwon, J.-H. Ha, J.-H. Kang, S. Lee, H.-W. Chun, and S. Lim, 2017b: The impact of the nonlinear balance equation on a 3D-Var cycle during an Australian-winter month as compared with the regressed wind-mass balance. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **143**, 2036-2049, doi: 10.1002/qj.3065.
- _____, S. Shin, J.-H. Ha, and S. Lim, 2017c: The advantages of hybrid 4dEnVar in the context of the forecast sensitivity to initial conditions. *J. Geophys. Res.*, **122**, doi: 10.1002/2017JD027598.
- Song, I.-S., and H.-Y. Chun, 2005: Momentum flux spectrum of convectively forced internal gravity waves and its application to gravity wave drag parameterization. Part I: theory. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 107-124.
- _____, and _____, 2008: A Lagrangian spectral parameterization of gravity wave drag induced by cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1204-1224.
- Suh, M.-S., and D.-K. Lee, 2004: Impacts of land use/cover changes on surface climate over east Asia for extreme climate cases using RegCM2. *J. Geophys. Res.*, **109**, D02108.
- Swinbank, R., and Coauthors, 2016: The TIGGE project and its achievements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 49-67, doi: 10.1175/BAMS-D-13-00191.1.
- Tang, S., and Coauthors, 2021: Long-term single column model intercomparison of diurnal cycle of precipitation over midlatitude and tropical land. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **148**, 641-669, doi: 10.1002/qj.4222.
- Ukkonen, P., 2022: Exploring pathways to more accurate machine learning emulation of atmospheric radiative transfer. *J. Adv. Modeling Earth Sys.*, **14**, e2021MS002875, doi: 10.1029/2021MS002875.
- Wee, T.-K., and D.-K. Lee, 1994: Semiprognostic tests of Fritsch-Chappell water-cycle process for numerical simulation of heavy rainfalls in Korean Peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 537-563.
- Wilson, L. J., and M. Vallee, 2003: The Canadian updateable model output statistics (UMOS) system: validation against prefect prog. *Wea. Forecasting*, **18**, 288-302.
- Wu, S.-M., J.-H. Oh, and D. Majewski, 2009: High-resolution numerical simulation with 10km global icosahedral hexagonal gridpoint model. Proceedings of the Spring Meeting, *Korean Meteor. Soc.*, 224-225.
- Xue, Y., and Coauthors, 2021: Impact of initialized land surface temperature and snowpack on subseasonal to seasonal prediction project, phase I (LS4P-I): organization and experimental design. *Geosci. Model. Dev.*, **14**, 4465-4494, doi: 10.5194/gmd-14-4465-2021.
- Yang, E.-K., and H.-M. Kim, 2021: A comparison of variational, ensemble-based, and hybrid data assimilation methods over East Asia for two one-month periods. *Atmos. Res.*, **249**, 105257, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105257.
- Yhang, Y.-B., and S.-Y. Hong, 2011: A study on large-scale nudging effects in regional climate model simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 235-243.
- Zeng, X., and Coauthors, 2018: Future community efforts in understanding and modelling atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 159-162, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0139.1.
- 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.