SNAPSI 프로젝트: 성층권 돌연승온이 대류권 예측성에 끼치는 영향 이해

홍동찬¹, 손석우¹, 김혜라¹, 이조한², 현유경²

¹서울대학교 지구환경과학부

²국립기상과학원 기후연구부

성층권 돌연승온(Sudden Stratospheric Warming; SSW) 현상이 최대 2달까지 중·고위도 대류권 순환장에 영향을 주는 것이 알려지면서, SSW는 계절내-계절(Subseasonal-to-seasonal; S2S) 시간규모의 예측성 인자로 주목받고 있다. 이를 위해 다양한 S2S 현업 모형에서 성층권 변동성을 통제하여 SSW에 의한 지표의 영향을 연구하는 Stratospheric Nudging and Predictable Surface Impact (SNAPSI) 프로젝트가 진행 중이다. 본 연구에서는 기상청에서 운영 중인 전지구 기후예측시스템(Global Seasonal forecasting system version 6; GloSea6)에 SNAPSI 프로젝트의 넷징 방법론을 적용하고, SSW가 대류권 순환장과 지표의 예측성 개선에 미치는 영향을 확인하였다. 2018년 2월 12일에 발생한 북반구 SSW 사례에 대해, 관측값 넷징 실험(NUDGED)과 기준실험(FREE)을 비교 분석한 결과, NUDGED 실험에서 관측과 유사한 대류권 극지방 아노말리의 하향전파를 모의하였다. 또한 극지방의 높은 해면 기압 및 유라시아 지역의 한랭편차를 보다 관측에 유사하게 모의하면서, 지표의 예측성에도 영향을 미칠 수 있음을 보였다. 이들은 NUDGED 실험이 SSW 이후 나타나는 음의 북반구 환형모드를 모의한 결과로 보이며, SSW를 너징 시 그에 따른 대류권 순환장 반응이 정성적·정량적으로 예측성 개선에 기여할 수 있음을 의미한다. 향후 SNAPSI 프로젝트에 참여한 타 S2S 모형들과의 비교 분석을 통해, SSW에 의한 대류권 반응과 예측성 개선 효과를 일반화하고자 한다.

Key words: 성층권 돌연승온, 계절내 계절 시간규모 예측, 성층권 넷징

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 기후예측 현업시스템 운영 및 개발(KMA2018-00322)과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2020M1A5A1110579).

WRF-Chem/DART 시스템을 이용한 고해상도 하향식 온실가스 배출량 감시 시스템 개발

구본훈¹, 권도윤¹, 이주엽¹, 김정원¹, 조성수¹, 전영후¹, 홍진규¹,
Eri Saikawa², Alexander Avramov², 심창섭³, 오영석⁴, 김수민⁴, 주상원⁴

¹연세대학교 대기과학과

²Emory University

³한국환경연구원

⁴국립기상과학원

우리나라는 2018년 대비 2030년 배출량을 40% 감축하는 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안을 수립하였다. 이와 같은 장기적인 배출량 감축목표 달성을 위해서는 과학적이고 정량적인 방법을 통해 정확한 온실가스 배출량 정보(온실가스 인벤토리)를 산출하는 과정이 필요하다. 이를 위해 전 세계적으로 하향식 배출량 산출 방식을 통해 온실가스 인벤토리를 산정하고 있으며, 이와 같은 방식은 대기 흐름 상의 모든 배출, 흡수 과정을 탐지할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 국내에서는 고해상도의 하향식 배출량 모니터링 시스템 도입 및 운용된 바가 없었으며, 이에 본 연구팀은 IG3IS의 하향식 배출량 산정 방식을 토대로 온실가스 배출의 시공간 변동성을 감지할 수 있는 고해상도의 모니터링 시스템을 구축하였다. 해당 시스템은 대기/화학 수송 과정 모의를 위해 WRF-Chem 모델을, 온실가스 농도 및 배출량 자료동화 과정에는 DART 자료동화 모델을 이용하였으며, 두 모델을 접합하여 기상장과 온실가스를 동시에 추적 감시할 수 있다. 또한 WRF-Chem 모델 및 입력자료를 개선하여 WRF-Chem의 지표 플럭스 및 수송, 확산모의 과정에서 동아시아 및 우리나라의 환경에 맞는 시공간 변동성이 반영될 수 있도록 하였다.

향후 다른 주요 온실가스 화학종 및 대기오염물 등에 대한 배출과 거동을 파악하는 데에 있어 확장 및 활용 가능성을 가지고 있으며, 궁극적으로 다양한 종에 대한 감시체계로서 시스템을 활용할 수 있도록 여러 방면에서의 개선 및 후속 연구를 진행하고자 한다.

Key words: 온실가스 배출량, 인벤토리, 하향식, WRF-Chem/DART, IG3IS

※ 이 연구는 기상청 <「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발 사업」>(RS-2024-00404365)의 지원으로 수행되었습니다.

UKESM-TOPAZ 모델의 개발, 적분 성능 평가 및 기후 모의 개선을 위한 분석

윤세민¹, 위지은¹, 이효미², 성현민², 장필훈², 변영화², 문병권¹

¹전북대학교 과학교육학부

²국립기상과학원 기후변화예측연구팀

UKESM-TOPAZ는 전북대학교와 국립기상과학원이 영국 기상청의 UKESM1에 해양 생지화학 모듈을 미국 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)의 Tracers in the Ocean with Allometric Zooplankton(TOPAZ)로 교체한 새로운 지구 시스템 모델이다. 이 연구는 UKESM-TOPAZ를 장기간 적분(preindustrial control)하여 모의 성능을 평가하고, 모델을 정상 상태에 더 가깝게 개선하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 대기와 해양 간의 dimethylsulfide (DMS) 및 CO₂ 교환, 그리고 대기 먼지의 해양 침적을 고려한 pictl2 실험과 해당 과정을 고려하지 않은 pictl 실험을 수행하였다. 분석 결과 pictl과 pictl2 실험 모두 CMIP6 모델에 비해 전 지구적으로 한랭한 지표 기온을 보였으며, 특히 pictl2는 DMS 배출량 증가로 인해 구름을 과도하게 모의함으로써 태양 복사 에너지가 감소하여 북반구 고위도에서 더 낮은 기온을 모의한 것으로 나타났다. 또한 극지 해빙 면적과 지표 기온 간의 상관관계를 분석한 결과, pictl 실험의 고위도 한랭 편차는 얼음-알베도 피드백에 의한 지표 냉각으로 설명할 수 있었다. 모델 성능 개선을 위해 알베도 파라미터 조정 실험, DMS 디버깅 실험, 구름-에어로졸 개선 과정 실험을 추가로 진행하고 있으며 이 실험들은 장기적인 적분을 통해 CMIP6 모델 자료 및 관측 자료와 비교하여 평가될 예정이다. 이를 통해 UKESM-TOPAZ는 기후 과정을 개선하고 IPCC AR7 참여 및 미래 기후 변화 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key words: 지구시스템모델, UKESM-TOPAZ

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가 (KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다. 이 연구의 주요 계산은 기상청(국가기상슈퍼컴퓨터센터)이 제공한 슈퍼컴퓨터 자원을 이용하여 수행되었습니다.

설명가능한 인공지능을 활용한 전 지구적 변동성 기반 예측인자 선별 및 폭염 예측성 향상

이연수, 임정호

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

지구온난화로 인한 해빙과 적설 감소, 극심한 가뭄, 그리고 상승하는 해수면 온도는 대기와 지면 간의 상호작용을 통해 전 지구적 순환에 영향을 미치며, 다양한 지역에 기상 이변을 초래하고 있다. 그러나 기존의 전 지구 기후예측모델은 몇 달에 걸친 대기, 지면, 해면, 빙권 간의 복잡한 상호작용을 정확하게 모의하는데 한계가 있어, 이러한 기상 이변을 예측하는 데 있어 제한적인 성능을 보인다. 본 연구는 데이터 기반 모델링을 활용하여 겨울철과 봄철의 전 지구적 변동성을 바탕으로 한국 폭염의 장기 예측 성능을 향상하고자 하였다. 본 연구에서는 1960년부터 2022년까지 여름철 한국 폭염일수와 겨울철/봄철 지면 변동성 사이의 상관성을 분석하고, 상관성이 높은 지역을 선별하여 예측인자로 활용하였다. 지면 변동성으로는 ERA5 재분석 자료의 적설 깊이와 토양수분, HadiSST 재분석 자료의 해수면 온도와 해빙 농도를 사용하였다. 선별된 예측인자를 바탕으로 기계학습 기반 예측 모델을 구축하고, 설명가능한 인공지능 기법인 SHapley Additive exPlanation (SHAP) 분석법을 이용하여 각 예측인자가 폭염일수 예측에 미친 영향을 분석하였다. 기계학습 예측 모델의 성능을 2001년부터 2022년까지 hindcast 검증을 통해 평가한 결과, 0.756의 상관계수(correlation coefficient, R), 4.303일의 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE), 0.488의 평균 제곱 예측성(mean square skill score, MSSS)을 보였다. 비교 모델로 사용한 PNU CGCM 모델은 R=0.264, RMSE=6.586일, MSSS=-0.200의 성능을 나타냈다. SHAP 분석 결과, 고비사막의 적설 깊이와 텐산산맥의 적설 깊이가 가장 중요한 인자로 확인되었으며, 여름철 기온, 강수량, 200-, 500-, 850-hPa 지위 고도와의 합성분석을 통해 이들 인자가 실제로 강한 폭염 현상과 큰 상관성이 있음을 확인하였다. 또한, 한국에 폭염을 유발하는 대규모 대기순환과의 연결성을 제시하며, 고비사막과 텐산산맥의 적설 변동성이 한국 폭염일수 예측에 중요한 역할을 함을 밝혔다. 본 연구는 전 지구적 변동성을 활용한 데이터 기반 모델링이 한국 폭염의 장기 예측에서 기존 기후모델 대비 향상된 성능을 제공할 수 있음을 보였으며, 이러한 접근법이 다른 지역의 기후 예측에도 적용될 수 있음을 시사한다.

Key words: 폭염 장기 예측, 설명가능한 인공지능, 원격상관, 대기-지면 상호작용

※ 이 연구는 기상청 「기상·지진See-At기술 개발연구」 KMIPA 2017-7010의 지원으로 수행되었습니다.

전산유체역학(CFD) 모델을 이용한 건물 밀집 지역에서 고해상도 현열 플럭스 공간 분포 분석

강정은¹, 이상현², 홍진규³, 김재진¹

¹부경대학교 지구환경시스템과학부

²공주대학교 대기과학과

³연세대학교 대기과학과

도시 지역은 다양한 토지 피복으로 구성되어 있다. 도시의 많은 부분을 차지하는 콘크리트, 아스팔트와 같은 토지 피복은 자연 식생에 비해 태양 복사에너지의 흡수가 높아 상대적으로 높은 온도가 나타난다. 도시 지역의 열 환경을 조사하기 위해 현열 플럭스 분석에 대한 지속적인 연구가 수행되고 있다. 그러나 도시 지역에 있는 많은 건물과 다양한 토지 피복 유형을 모두 고려하여 현열 플럭스를 산출한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구는 도시 지역의 현열 플럭스를 분석하기 위해 고해상도 모의가 가능한 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics) 모델을 기반으로 하는 고해상도 현열 플럭스 산출 방법을 개발하였다. 또한 개발한 방법을 이용하여 다양한 토지 피복이 있고 건물이 밀집한 서울 은평구 1km² 영역을 대상으로 10m 수평 해상도로 현열 플럭스의 공간 분포를 분석하였다. 현실적인 현열 플럭스 산출을 위해, LDAPS(Local data assimilation and prediction system)의 바람, 기온 자료와 VUCM(Vegetation urban canopy model)의 토지피복별 지표면 온도를 사용하는 LDAPS-CFD-VUCM을 개발하였다. 또한 건물/지형, 토지 피복 입력자료는 각각 국토지리정보원의 수치지형도 자료와 환경부의 세분류 토지피복지도를 이용하여 구축하였다. 본 연구에서 모의한 현열 플럭스는 플럭스 타워에서 측정된 값을 이용하여 검증하였고, 선행 연구들의 통계 수치와 비교하였을 때 신뢰할 만한 수준이었다. 현열 플럭스는 건물, 도로, 나지, 수목, 초지 지역으로 나누어 분석하였고, 토지 피복별 특성이 뚜렷하게 나타났다. 또한 현열 플럭스는 동일한 토지 피복이라도 주변 환경에 따라 다소 차이가 나타났다.

Key words: 전산유체역학 모델, 현열 플럭스, 도시 지역, 열 환경, 토지 피복

옥상 녹화가 도시 협곡 내 열역학적 메커니즘과 열 완화에 미치는 영향

문다솜¹, 강건², 김재진¹, 양민준¹

¹부경대학교 지구환경시스템과학부

²부경대학교 대기환경연구소

기후변화로 인해 도시 온도가 지속적으로 상승함에 따라 친환경 시스템의 도입은 지속 가능한 도시 개발과 열 환경 개선을 위한 중요한 전략이 되었다. 특히, 그린 인프라(벽면 녹화, 옥상 녹화, 도심 공원 등)는 여름철 태양 복사를 반사하여 건물의 냉장 수요를 최대 75%까지 감소시킨다. 이러한 지속 가능성을 보장하기 위한 전략을 수립하기 위해서는 도시 지역에서 그린 인프라가 태양 복사에 의한 가열에 미치는 영향을 깊이 이해하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 CFD 모델을 이용하여 도시 협곡에서 건물 옥상에 식재된 수목의 항력과 냉각 효과가 다양한 벽면 가열 조건 하에서 흐름, 기온 분포, 환기에 미치는 영향을 분석했다. 수치 모의 결과, 가열된 지면, 건물 벽면, 옥상이 도시 협곡 내에서 열적 상승류를 강화시켰다. 이러한 열적 상승류는 도시 협곡 내의 지붕 고도 부근에서 수평 풍속을 감소시키고, 도시 협곡 외부에서 내부로 유입되는 흐름을 강화시켰다. 지붕에서 수목의 항력 효과만을 고려했을 때 도시 협곡 내의 지붕 고도에서 수평 풍속이 크게 감소하고 도시 협곡 외부로부터의 유입 흐름이 강해지는 것이 관찰되었다. 하지만, 수목의 항력과 냉각 효과가 함께 고려되었을 때, 수목의 냉각 효과로 인해 도시 협곡 내의 지붕 고도에서 음의 부력이 강해지고 열적 상승류가 약해지면서 수평 풍속이 상대적으로 증가하였고 이로 인해, 도시 협곡 외부로부터의 유입 흐름이 비교적 약해졌다. 벽면과 지면 가열과 수목의 항력과 냉각 효과는 도시 협곡 내외부로의 흐름 변화는 공기 교환율에 큰 영향을 미쳤다. 벽면과 지면 가열이 있을 때 도시 협곡 내의 지붕 고도에서 외부로 유출되는 공기량이 증가하는 것이 관찰되었으며, 수목의 항력과 냉각 효과를 모두 고려했을 때 도시 협곡 내의 지붕 고도에서 약해진 수평 풍속으로 인해 외부로 유출되는 공기량이 더욱 증가하였다. 또한, 수목 효과로 인해 도시 협곡 외부에서 내부로 유입되는 흐름이 강해지면서 도시 협곡의 측면 경계를 통해 유입되는 공기량이 증가하였다. 결과적으로 옥상에 수목이 있는 경우에 도시 협곡 내의 지붕 고도의 온도 상승이 완화되었으며 도시 협곡 내외부로의 환기가 촉진되면서 도시 협곡 내의 평균 온도 상승을 완화시킴으로써 열적 쾌적성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key words: CFD model, Trees' drag and cooling effects, Wall heating, Air exchange rate, Air temperature mitigation

※ 이 연구는 2024년도 교육부 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(RS-2024-00341302)의 지원으로 수행되었습니다.