

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 1-1

ENSO Phase Transition Enables Prediction of Winter North Atlantic Oscillation One Year Ahead

Kiwook Kim¹, Myong-In Lee¹, and Adam A. Scaife^{2,3}

¹Department of Civil, Urban, Earth and Environmental Engineering,
Ulsan National Institute of Science and Technology

²Met Office Hadley Centre

³Department of Mathematics and Statistics, University of Exeter

The winter North Atlantic Oscillation (NAO) is a dominant mode of climate variability affecting temperature and precipitation across the Northern Hemisphere, yet its prediction at seasonal to decadal (S2D) lead times remains challenging. Using multi-year hindcasts from a multi-model ensemble (MME) initialized on 1 November for 1962–2019, we show that NAO skill one year ahead improves significantly when the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) undergoes a phase transition next year. This improvement is linked to the northward propagation of anomalous atmospheric angular momentum (AAM), which dynamically organizes the NAO and is well captured in reanalysis and models. During ENSO transition years, prediction skill increases with ensemble size, and when more than 8 members are used, the anomaly correlation coefficient (ACC) exceeds the signal-to-noise ratio (SNR), producing a signal-to-noise paradox (SNP). These findings highlight the potential for enhanced one-year NAO predictability when ENSO transitions are present and large ensemble sizes are used in S2D prediction systems.

Keywords: North Atlantic Oscillation (NAO), ENSO Transition, Atmospheric Angular Momentum (AAM), Large Ensemble Prediction, Seasonal-to-Decadal (S2D) Prediction

※ This work was funded by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program "Operating and Developing Global Seasonal Forecast System" (KMA2018–00322).

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 1-2

에어로졸과 메탄의 전지구 및 동아시아 기온에 대한 정량기여도 산출

이태경¹, 성현민², 심성보³, 구자호¹

¹연세대학교 대기과학과

²기상과학원 기후변화예측연구팀

³기상청 기후위기협력팀

기후변화 대응을 위한 탄소중립 전략 수립에 있어 단기체류 기후변화 유발물질 (Near-Term Climate Forcers, NTCFs)의 기후 영향에 대한 과학적 이해가 필수적이다. 에어로졸과 메탄은 각각 냉각과 온난화라는 상반된 복사강제력을 가지며, 이러한 특징은 지역 기후 변화에 중대한 영향을 미친다. 본 연구는 CMIP6의 AerChemMIP 시뮬레이션을 활용하여, 에어로졸 및 메탄 배출 변화가 현재기후 (1995-2014년)와 미래기후 (2046-2055년)의 평균기온 및 연중 최고기온 (TXx)에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 에어로졸과 메탄에 대한 실험을 수행한 두 모델 (MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL)을 활용하여 기후 변수에 대한 에어로졸과 메탄의 기여도를 평가하고, 모델 간 결과의 일관성과 차이점을 비교하였다. 현재기후에서는 에어로졸 배출이 동아시아 지역에서 뚜렷한 냉각효과를 유도하며, 이는 메탄에 의한 온난화보다 최대 6배 이상 크게 나타났다. TXx에 대해서도 에어로졸의 효과는 통계적으로 유의미하며 계절 간 일관된 반응₉ 보였다. 반면 메탄은 기온에 미치는 영향이 상대적으로 미약했으며, TXx에 대한 영향은 북중국 일부 지역에만 제한적으로 나타났다. 미래기후 분석 결과, 에어로졸의 냉각 효과는 전반적으로 약화되었으며, 메탄의 온난화 효과는 전지구와 동아시아 지역에서 크게 강화되었다. 특히 겨울철 (DJF) 남중국 지역에서 메탄의 온난화 효과가 뚜렷하게 나타났다. TXx에 대한 메탄의 영향은 불확실성이 컸으며, 모델 간 차이도 확인되었다. 본 연구는 에어로졸 및 메탄의 시기별, 지역별 기후 영향 기여도를 정량적으로 비교함으로써, 향후 기후 정책 수립 시 NTCFs에 대한 차등적 관리 전략의 필요성을 강조하고, 지역 맞춤형 기후 리스크 평가의 기반 정보를 제공한다.

Keywords: CMIP6, 에어로졸, 메탄, 동아시아 기후변화

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 1-3

하향식 접근법을 통한 국내 온실기체 배출량 자료생산 및 계절특성 분석

신호연¹, 김재민², 이윤곤¹

¹충남대학교 지구환경·우주융합학과

²충남대학교 자연과학연구소

대기 중 온실기체 농도의 지속적인 증가는 지구온난화 및 기후변화의 핵심적인 원인으로 지목되고 있으며, 이에 대한 대응으로 전 세계적인 탄소 중립 선언과 다양한 감축 정책이 추진되고 있다. 이러한 효과적인 기후위기 대응을 위해서는 정교한 온실가스 배출량 산정이 중요한 과제로 대두되고 있으며 국내에서는 GHG-CAPSS, 국외에서는 EDGAR 등과 같은 상향식(Bottom-up) 접근법에 기반한 다양한 배출량 산정이 이루어지고 있다. 이러한 방식은 통계 기반의 배출계수와 부문별 활동도 자료를 바탕으로 하고 있으나, 통계자료의 불확실성 및 시공간적 한계 등으로 실제 배출량과의 차이를 초래할 수 있는 한계를 지닌다. 따라서 최근 온실기체 농도 관측자료와 대기수송모델을 결합한 하향식(Top-down) 접근법이 보완적 대안으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 ERA5 재분석 기상자료를 기반으로 한 STILT 라그랑지안 수송모델과 국내 WMO/GAW 관측소의 온실기체 관측농도 자료를 바탕으로 베이지안 역모델링 기법을 통해 국내 온실기체 배출량 월별 플렉스를 하향식으로 산정하였다. 또한 산정된 배출량 자료를 기반으로 계절별 한반도 온실기체 농도와 플렉스의 공간특성을 분석하였으며 이를 통해 온실기체 기원의 계절적 특성과 흡수·배출 양상을 규명하고자 하였다. 산정된 하향식 배출량 결과는 기존 상향식 접근법에 따른 배출량의 계절특성과 유사한 변동을 보이며 세부적으로 월별 플렉스가 조정되었다. 특히 월별 11%에서 최대 37%까지 배출량 불확도가 감소하였고, 이러한 배출량 최적화는 주로 대도시나 산업 단지 등 대규모 배출원에서 강하게 나타났다. 향후 역모델링 시스템 종류에 따른 결과 비교를 위해 오일러리안 좌표계 기반의 INVERSE-KOREA 분석 자료와 비교 분석을 수행하고자 하며, 배출 부문별 공간 기여도를 분석함으로써 한반도 온실기체 기원의 계절적 특성을 더욱 정량적으로 규명하고자 한다. 이러한 연구결과는 국내 온실기체 농도 변동의 원인을 체계적으로 파악하고, 연간 배출·흡수 특성을 규명하여 향후 국가 온실기체 감축 정책 수립 및 이행 평가에 과학적 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

Keywords: 온실기체, Bayesian inversion, STILT model, 하향식 접근법, WMO/GAW 관측소

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “기후변화 입체감시 기술개발(KMA2018-00324)”의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 1-4

인공강우 시딩라인 설계 조건에 따른 인공증우 효과 민감도 분석

이성빈¹, 송상근^{1,2}, 고은아¹, 문수환¹, 임윤규³, 장기호³¹제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공²제주대학교 지구해양학과³국립기상과학원 기상응용연구부

인공강우 실험과 수치모의 연구는 수자원 확보, 가뭄 해소, 안개소산, 태풍 약화 등 기상방재를 목적으로 수행되어 왔으며, 국내에서도 수도권 미세먼지 저감, 안개소산, 보령댐 유역 가뭄 완화, 강원도 산불 예방 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 국립기상과학원은 다양한 기상조건을 고려한 최적의 시딩라인 설정과 수치모델 예측 성능 개선에 주력하며, 실험 후 시딩 영향 지역의 인공증우량을 산출 및 분석하고 있다. 현재 국내 인공강우 항공 실험의 시딩라인 설계는 실험일의 기상조건, 시딩효과 발현 시간, 목표지점 위치를 종합적으로 고려하며, 수치모델을 활용한 시딩라인 설계 또한 시딩 물질의 종류와 반응 시간, 풍향 및 풍속과 같은 기상요소를 주요 요인으로 반영한다. 그러나 이러한 방식은 기상조건과 시딩 물질 반응 속도의 불확실성 등에 따라 정확한 시딩라인 설계(시딩 위치, 고도, 시간 등)에 한계가 있다. 본 연구에서는 2024년 강원도 대관령 인근의 인공강우 항공실험을 기반으로 시딩라인 위치별(동, 서, 남, 북) 인공증우 효과가 뚜렷한 사례를 선정하여, 기상모델(Weather Research and Forecasting, WRF)을 통해 시딩라인 설계 조건에 따른 증우효과의 민감도 분석을 수행하였다. 선정된 사례에 대해 국립기상과학원에서 항공실험을 위해 설정한 기존 시딩라인 거리(Original seeding distance, OSD), 시딩고도(Original seeding height, OSH), 시딩시간(Original seeding time, OST) 조건에 따른 인공강우 수치모의 결과(NIMS)를 분석하였다. 또한 다양한 시딩라인 실험 설계 조건(OSD 대비 가까운 또는 먼 시딩라인 거리, OSH 대비 높고 낮은 시딩고도, OST 대비 빠르고 늦은 시딩시간) 경우의 수에 따른 모의 결과를 함께 비교하여 인공증우량 민감도 분석을 수행하였다. 시딩라인 조건을 변화시킬 때는, 사례별 최초 시딩 고도에서의 풍속과 시딩 물질의 반응시간을 고려하여 최적의 시딩라인 거리를 계산하였으며, 이 과정에서 공항 위치, 민항기 운항 고도, 공역 등 세부 조건들도 함께 고려하였다. 시딩라인 설계 조건에 따른 수치모의 결과, 동쪽 시딩라인의 경우는 OSD 및 OST 대비 빠른 시딩시간 조건, 서쪽 및 북쪽에서는 OSD 대비 먼 시딩라인 거리 및 OST 조건, 마지막으로 남쪽의 경우는 OSD, OSH 대비 높은 시딩고도, OST 조건에서 대체로 NIMS 대비 누적 인공증우량이 뚜렷하게 증가하였다.

Keywords: 인공강우, 시딩라인, 인공증우, 민감도 분석, 항공실험, WRF

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았습니다.

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 1-5

영동지역에서 인공강설 실험 성공가능성 향상을 위한 적절한 기상조건 분석

박석우¹, 김병곤¹, 하현재¹, 김예지¹, 김지혜¹, 김희영¹, 장기호², 임윤규²

¹국립강릉원주대학교 대기환경과학과

²국립기상과학원 기상응용연구부

영동지역은 태백산맥의 지형적 특성으로 인해 겨울철과 봄철에 핀 현상이 빈번히 발생하여 장기간 건조한 상태가 지속되기 쉽다. 이로 인해 2022년 강릉·울진 산불 및 2025년 안동산불과 같은 대형 산불의 발생 빈도가 높아지고 있으며, 이에 따른 사회·경제적 피해도 심각해지고 있다. 그러므로 기후위기시대 인공강설 기술은 산불 예방과 수자원 확보를 위한 실용적 대안으로 주목받고 있다. 하지만, 인공강설실험 효과에 대한 검증은 다양한 연구결과에도 불구하고 여전히 논란이 있으며 시딩 실험에 따른 강수량 변화의 정량적 효과 분석은 어려운 문제이다. 본 연구에서는 영동지역에서 인공강설 실험 효과의 과학적 검증과 실험 성공가능성 향상을 위한 최선의 구름 및 대기환경조건을 제안하고자 한다.

영동지역에서 빈번히 발생하는 동해효과 강설 이외에도 독특한 중규모 강설 현상으로는 Seeder-Feeder effect (SF)와 Cold Air Damming(CAD) 등이 있는데 이들의 특성에 따라 강설의 위치나 강도 등이 결정되는 경향이 있다. SF 강설은 크게 혼합형과 분리형으로 구분되며, 분리형 SF의 경우는 상층 Seeder 구름에서 낙하하는 빙정이 건조층(Seeder와 Feeder 구름 사이)에서 승화·증발하여 하층 Feeder 구름에 충분한 수증기를 공급하게 된다. 이러한 조건에서 Feeder 구름 상부에서 항공시딩이 이루어진다면 영동 평지 부근에 빙정의 성장 및 강설 발달을 촉진할 가능성이 크다. 한편 CAD 사례에서는 CAD 강도에 따라 동해로부터 유입되는 눈구름대의 강설 위치가 달라지는 데, 강한 CAD 조건에서는 전반적으로 눈구름이 해안선 부근이나 동해상에 머무르게 되는 반면에, 약한 CAD 조건에서는 동해상의 눈구름대가 영동 내륙으로 밀고 들어오면서 태백산맥 동쪽 산사면이나 산정상쪽으로 상승하며 지형성 눈구름을 유발하게 된다. 따라서 대관령 산악지역에 강설을 유도하기 위해서는 대체로 강한 북동풍 조건의 Fr 수가 큰(약한 CAD) 조건에서 대관령 지상 혹은 상층 항공시딩이 진행되어야 할 것이다. 따라서 이상의 장기간의 영동지역 강설관측 연구결과를 기반으로 SF와 CAD 강도를 고려한 시딩실험 지역(목표지역 선정)과 시딩방법(지상 및 항공시딩) 등을 결정하고 인공강설실험 및 효과에 대한 관측이 이루어져야 성공적인 실험 결과를 얻을 수 있을 것이다.

Keywords: 영동지역, 인공강설, Seeder-Feeder effect, Cold Air Damming

※ 이 연구는 실용적 인공증우량 확보기술 및 실험효과 종합분석 연구(2025080237-1)의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 1-6

기상청 한국형 지역예보모델(KIM-지역모델) 기반 저고도 항공난류 예측 시스템 개발 및 검증

김정희¹, 김정훈¹, 김수현², 최희욱³, 이상삼³

¹서울대학교 지구환경과학부

²NASA Postdoctoral Program (NPP) Fellow, NASA Ames Research Center

³국립기상과학원 기상응용연구부

항공난류는 항공기의 안전한 운항을 저해하는 주요 기상 현상으로, 특히 저고도 영역에서 발생하는 저고도 난류(Low-Level Turbulence, 이하 LLT)는 항공기의 이·착륙에 있어서 위험 요소로 작용한다. 최근 차세대 교통수단으로 주목받는 도심항공교통(Urban Air Mobility, 이하 UAM)에 사용되는 소형 전기항공기는 기존의 항공기보다 난류에 더욱 민감하게 반응하여, 안전한 UAM 운항 지원을 위해서는 UAM의 주 순항 고도인 600 m 이하에서 더욱 정밀하고 체계적인 LLT 예측 기술이 요구된다. 본 연구에서는 기상청 한국형 지역예보모델(Korea Integrated Model-Regional, 이하 KIM-지역)을 이용하여, 고해상도 저고도 난류 예측 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 국제민간항공기구의 표준 난류 척도인 에디소산율(Eddy Dissipation Rate, 이하 EDR)과 수치모델의 난류진단지수(이하 난류지수)가 로그정규분포를 따른다는 특성을 이용하는 로그정규매핑 기법(Lognormal Mapping Technique, 이하 LMT)을 기반으로 한다. LMT 방법론은 다음과 같다. 먼저, 장기간의 수치모델 자료로부터 다양한 난류지수와 그 확률밀도함수를 계산하고, 이를 관측 기반 EDR의 통계적 특성과 매핑하여 EDR 규모의 난류 강도로 변환한다. 이후, 변환된 지수들을 앙상블 기법으로 통합하여 최종적인 난류 예보를 생산한다. 특히, 본 연구에서는 UAM 운항 고도 내 난류의 통계적 특성을 반영하기 위하여, 보성 표준기상관측소의 307-m 높이의 타워에 설치된 3차원 초음파 풍속계로 EDR을 계산하고 이를 관측 기반 EDR의 통계적 특성으로 이용하였다. 본 연구에서 개발된 난류 예측 시스템은 저기압과 동반된 하층 전선 및 복잡 지형에서 강한 난류강도를 보이며, 다양한 발생원의 난류를 효과적으로 진단하였다. 또한, 난류 강도의 공간적 분포를 고해상도로 상세히 표현하였다. 기상항공기 관측 EDR을 이용한 검증 결과, 난류 예측 시스템에서 예측된 난류 강도는 관측에 비해 다소 과대모의되는 경향을 보였다. 한편, 수신자 조작 특성 곡선을 통한 정량적 성능 평가에서는 다중 난류지수를 복합적으로 사용한 경우가 단일 지수보다 일관되게 우수한 성능을 나타냈다. 향후 기상항공기 자료, 국제항공운송협회 자료 등 추가적인 EDR 관측 자료를 확보하여 관측 EDR의 통계적 특성값을 개선하고, 추가적인 난류지수의 도입 및 개별 난류지수의 검증을 통한 최적화를 수행하여, 본 시스템의 예측 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 항공난류, 저고도 난류, 난류 예보, 로그정규매핑, 에디소산율

※ 이 연구는 기상청 「수요자 맞춤형 기상정보 산출기술 개발연구」 (KMA2018-00622)의 지원으로 수행되었습니다.