

장마철 집중호우 예측을 위한 강수 영역 진단 인자 개발

김민우¹, 장은철¹, 손석우², 이규원³, 김주완¹, 김정훈²

¹공주대학교 대기과학과

²서울대학교 지구환경과학부

³경북대학교 대기원격탐사연구소

본 연구는 여름철 집중호우가 주로 북태평양 고기압 가장자리의 경계면 상에서 발생하는 강한 상승에 의한 것임을 파악하고, 해당 대기 구조를 설명할 수 있는 인자들을 활용하여 강수 발생 확률이 높은 구역을 특정하는 것으로 집중 호우 영역을 진단하는 방법을 제안한다. 주요 인자로 1) 북서태평양 고기압의 북서쪽 가장자리에서 합류로 인한 정체전선 형성을 설명하는 변수인 변형(deformation)장의 종관 규모 성분, 2) 수분 수송 강도를 나타내는 IVT(Integrated water Vapor Transport)와 3) 유체 이동 방향에 따른 불안정도를 설명하는 3차원 CSI(Conditional Symmetric Instability)를 사용했다. 집중 호우 발생 가능 영역은 정체전선의 환경이 형성된 구역에서 수증기 수송이 원활할 때, 상승촉발 원인인 CSI가 높은 구역을 중첩하여 진단하였다.

개발된 집중호우 영역 진단 기술의 검증은 현업 초단기예보모델인 KLAPS의 2018년부터 2023년까지의 분석장 및 예측장을 사용하여 수행하였다. 또한, 장기간 분석을 위해 2000년에서 2023년 기간의 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) 자료를 사용하여 적용하였다. 이를 통해 집중호우 영역의 진단 및 예측 가능성을 종합적으로 평가하고, 예보 시스템에서의 활용 가능성을 분석하였다.

특히, 변형장은 북태평양 고기압의 북서쪽 가장자리에서 형성되는 정체전선을 설명하는 중요한 변수로, 과거 23년 동안 여름철(6,7,8월) 강수량의 40~50% 정도 연관이 있는 것으로 분석되었다. 변형장은 직접적인 강수 발생에 기여하지 않지만, 상승 운동이 발생할 수 있는 환경을 제공하여 강수 발생 가능성을 높이는 역할을 한다. 이는 변형장을 모니터링함으로써 강수 형성 가능 구역을 보다 구체화할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서 개발한 강수 영역 진단 인자를 KLAPS와 ERA5에 적용하고 검증한 결과, 2018-2022년 6~8월기간에서 해당 기술이 효과적으로 강수 구역을 진단해 낼 수 있음을 확인했고, 예측장에 적용한 결과 탐지확률(Probability of Detection, POD)이 유의미하게 높아져 모델 강수와 같이 예보관에게 제공되면 집중호우 발생 가능 구역의 정보를 효과적으로 전달할 수 있음을 제시하였다.

Key words: 동아시아 여름 몬순, 북서태평양 아열대 고기압, 변형장, IVT, CSI, 집중 호우

※ 이 연구는 “위험기상에 대한 분석, 예보의 융합기술 고도화”(KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었습니다.

고해상도 자료동화를 통한 3차원 재분석장 생산 기술 개발

조서윤, 이지원, 민기홍

경북대학교 대학원 대기과학과, BK21 위험기상 교육연구팀

최근 기후변화에 따라 증가하고 있는 위험기상현상의 피해 경감을 위해 정확한 조기 예측 및 현상 발생의 체계적인 메커니즘 분석이 필수적이다. 이에 따라 복잡한 지리 및 지형 특성과 큰 계절 변동이 나타나는 한반도 영역의 고해상도 3차원 재분석장을 생성하는 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 본 연구에서는 제주도를 중심으로 고해상도 자료동화 체계 구축 및 적용을 통해 수치모델 기반의 재분석장을 산출하고 역학/열역학 변수 변화 분석 및 지상 강수 정확도 검증을 수행하였다. 수치모델 및 자료동화 시스템은 Weather and Research Forecasting (WRF) 모델과 WRF Data Assimilation (WRFDA)의 3차원변분법을 이용하였다. 제주도과 인근 지역의 레윈존데, 윈드프로파일러, 지상과 해상관측, 레이더 및 천리안위성 2A호 (GK-2A) 대기운동벡터와 전천복사휘도(All-Sky Radiance, ASR)를 함께 동화하였으며, 제주 지역에 강수가 많았던 저기압, 한랭전선, 장마전선의 사례를 선정하였다. 재분석장 생산 결과, 자료동화를 진행하지 않은 NoDA 대비 DA 수행에서 실제 레이더 반사도와 더 유사한 수상체 분포를 보이는 한편 전선을 따라 발달한 수분속 수렴 패턴 및 한라산 풍하측의 국지적 와도 변화와 같은 상세한 기상학적 특징이 더 잘 나타났다. 강수 예측장 검증 결과, 세 개 사례에 대해 평균적으로 Root Mean Square Error (RMSE) 및 Pattern Correlation (PC), Equitable Threat Score (ETS)가 개선되었다. 사례 평균 누적 강수에서 약 35%의 RMSE 감소 및 약 25% PC 증가가 확인되었고, 사례별 시간당 강수에서도 주요 강수 시간대에 대해 전체적인 예측을 개선이 나타났다. 저기압 사례에서는 회전 구조, 동반되는 상승기류 및 수상체 발달이 더 뚜렷하게 나타났고, 전선 사례의 경우 바람 변화, 기단 대치 등이 보다 명확한 양상을 보였다. 한편, 많은 관측자료들을 안정적으로 동화하기 위해 관측종별로 체계적인 품질관리 및 숨아내기 전략이 적용되었으며, ASR 동화의 경우 구름 영향 모수에 따른 관측오차모델을 수립 및 적용함으로써 오차의 시공간적 변동 특성을 채널별로 고려할 수 있게 하였다. 이러한 체계적인 기술적 고려가 수반될 때 신뢰성 있는 재분석장의 생산이 가능해지며, AI 모델의 학습자료로도 가치를 가지게 될 것으로 기대한다. 향후 연구에서는 ASR 동화 시 모델에서 예단하는 모든 고체 수상체를 고려하는 효과를 살펴볼 예정이며, 기존에 주로 논의되었던 여름철 일기예측에 대한 예측뿐 아니라 대설/강풍 등의 겨울철 위험기상을 위한 재분석장 생성에도 본 연구 내용을 적용함으로써 그 효용성을 확인할 계획이다.

Key words: 천리안 2A호, 자료동화, 재분석장, 위험기상, 강수 예측

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상-AI 데이터 전처리 기술 개발」 (KMA2021-00122)의 지원과 과학기술 정보통신부의 재원으로 한국연구재단 (No. 2022R1A2C1012361)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 BK21 사업의 지원을 받아 연구되었습니다.

딥러닝 기반 폭염 단기 예측 모형

장아현, 민기홍

경북대학교 대학원 대기과학과, BK21 위험기상 교육연구팀

인공지능(Artificial Intelligence; AI)은 4차 산업혁명과 과학기술의 발달로 컴퓨터의 정보처리능력이 크게 발달하면서 큰 주목을 받는 핵심 기술로, 방대한 자료를 바탕으로 최적의 결과를 단기간 내에 도출할 수 있는 장점이 있어 많은 기상 선진국 및 연구기관에서 AI 기술 바탕의 예보 연구를 활발히 수행하고 있다. 높은 기온으로 다방면의 분야에 큰 피해를 야기하는 여름철 폭염은 대표적인 재해 기상 현상 중 하나로, 극한 기상현상의 심화와 도시화의 영향으로 그 빈도와 강도가 증가하면서 정확한 폭염 예보의 필요성이 대두되고 있다. 기상청에서 운영하는 지역앙상블예측시스템(Local Ensemble Prediction System; LENS)은 13개 앙상블 멤버를 바탕으로 최대 72시간까지 예측장을 생산하며 여름철 주간 기온을 과소모의하여 정확한 폭염 예측에 한계가 존재한다. 따라서 본 연구는 AI를 활용한 딥러닝 기법을 통해 지상관측자료와 LENS 예측장을 바탕으로 최고기온을 도출하고 이를 바탕으로 폭염의 발생지역과 강도를 예측할 수 있는 딥러닝 모형을 구축하여 차세대 폭염 예보에 기여하고자 한다. 모형 구축에는 핵심 특징을 압축하는 encoder와 원래 격자 구조로 확장하는 decoder 구조 기반의 U-Net 구조에 고차원적인 연산을 수행하는 inception module이 추가된 Simpler yet Video Prediction (SimVP) 구조를 사용하였고, 학습자료로는 3년(2019~2021년) 동안의 LENS의 기온 예측장을 포함한 12개 기상변수와 무인자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)의 관측 기온과 습도를 사용하였다. 이후 2022년 여름철 기간을 검증자료로 설정하여 기온 예측 성능을 검증하였다. 검증자료의 하루 뒤 최고기온 예측 성능 검증에서 폭염 예측 모형은 LENS의 과소모의를 해소하면서 bias 통계치는 LENS의 -1.33°C 보다 우수한 -0.001°C 로 나타났고, RMSE 및 결정계수(R^2) 또한 1.73°C 및 0.80로 나타나면서 LENS의 2.45°C 및 0.60보다 높은 통계치와 Model Output Statistics (MOS)의 1.72°C 및 0.79와 근접한 통계치를 보였다. 33°C 극값 예측 성능을 향상하여 보다 정확한 폭염 예측을 모형에서 수행할 수 있도록 LENS의 기온을 통계적인 방법을 통해 편차보정 한 뒤 학습 및 입력자료로 사용할 수 있는 방안을 제시할 계획이다.

Key words: 폭염, 딥러닝, 지역앙상블예측시스템

※ 본 연구는 기상청 『기상·지진 See-At 기술개발연구』 KMI2017-02410의 지원으로 수행되었습니다. 또한 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 BK21 FOUR 사업의 지원을 받아 연구되었습니다.

항공관측을 통한 서해상 탄소 에어로졸 특성

유나기¹, 최시영¹, 이은아¹, 임세희^{1,2}

¹충남대학교 환경IT융합공학과

²충남대학교 환경공학과

블랙카본(black carbon, BC)은 다양한 불완전 연소 과정에서 생성되고 가시광선을 강하게 흡수하는 단기체류 기후변화 유발 물질(Short-Lived Climate Forcer)이다. 따라서 지역적 뿐 아니라 전 지구적인 기후 온난화에 영향을 미친다. 블랙카본은 대기 중에서 다른 기체 및 입자들과 내부혼합되어 코팅을 형성하며 본래보다 광흡수도가 증가할 수 있다. 본 연구에서는 국립기상과학원이 2021년 2월 8일 부터 2022년 5월 2일까지 서해상에서 진행한 총 23회의 항공관측에서 Single particle soot photometer(SP2)를 사용하여 측정된 내화성 블랙카본의 질량농도, 입경분포, 혼합상태를 분석하였다. HYSPLIT 모델의 역궤적 분석을 활용해 공기의 발원지를 추적하고자 대표지역을 설정하였다(한국, 북한, 일본, 중국, 몽골, 러시아, LRT, 해양). 평균 rBC 질량농도(M_{rBC})는 고농도 미세먼지 사례가 보고된 2022년 2월 10일 비행에서 $528.5 \pm 422.4 \text{ ng m}^{-3}$ 로 가장 높았으며, 2021년과 2022년 모두 겨울(2-3 월)이 봄(4-5 월)보다 높은 수치를 보였다. $1,000 \text{ ng m}^{-3}$ 이상의 고농도 rBC는 중국 기원의 공기에서만 관측되었으며 평균 MrBC 또한 $274.4 \pm 246.9 \text{ ng m}^{-3}$ 로 가장 높았다. rBC의 질량중앙입경(MMD)는 겨울에 높게 측정되었으며 식생연소와 난방을 위한 화석연료의 연소에 의한 것으로 보인다. 중국 기원의 공기에서 가장 높은 BC/CO (1.82 $\text{ng m}^{-3} \text{ ppbv}^{-1}$)와 큰 MMD(194 nm)가 관측되어 뚜렷한 식생연소의 영향을 확인하였다. 러시아 기원의 공기에서는 장거리 수송과 식생연소의 영향으로 큰 MMD(197.8 nm)가 관측되었으며, 많은 누적강수(APT)의 영향으로 낮은 rBC의 수송효율(BC/CO)이 나타났다. rBC의 코팅(F_{thick} , $R_{shell/core}$)은 높은 고도에서 감소하였다. PBL 내에서 평균 F_{thick} 과 $R_{shell/core}$ 가 각각 0.68 ± 0.13 , 1.45 ± 0.10 로 FT 에서의 평균보다 27%와 7% 높았다. 이러한 경향은 강수에 의한 습식세정 가능성에 기인한다. 높은 APT는 rBC의 코팅 제거를 촉진하며 rBC의 운송 효율(BC/CO)을 감소시킬 수 있다. 장거리 수송된(LRT 기원의) 공기는 높은 APT에 의한 습식침전 영향으로 평균 M_{rBC} , F_{thick} , $R_{shell/core}$ 가 가장 낮게 관측되었다. 본 연구는 장거리 수송된 에어로졸과 습식세정이 rBC의 물리적 변화에 기여를 하는지 관측함으로써, 블랙카본의 특성과 기후에 미치는 영향을 보다 정밀하게 평가할 수 있다. 또한, 대기 중 블랙카본의 이동 경로와 기후 모델 개선에 중요한 자료로 활용될 것이다.

Key words: YES-AQ, 항공관측, 황해, 블랙카본, 혼합상태

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA 2018-00521)”의 지원으로 수행되었습니다.

탄소 에어로졸의 질량흡수단면 산출기법 구축

이은아¹, 최시영¹, 유나기¹, 윤원진¹, 임세희^{1,2}

¹충남대학교 환경IT융합공학과

²충남대학교 환경공학과

블랙카본(Black Carbon, BC)은 화석연료 및 바이오연료 등의 불완전 연소로 발생하는 탄소 에어로졸로, 넓은 파장 범위에 걸쳐 태양 복사를 흡수해 지구 온난화에 영향을 준다. 질량흡수단면(Mass Absorption Cross-Section, MAC)은 어떤 물질의 단위 질량 당 흡수단면으로, 빛의 파장, 입자의 굴절률과 형태에 영향을 받기 때문에 광학 특성을 이해하기 위한 중요한 인자이다. BC 입자의 질량흡수단면은 배출원별로 상이할 수 있고 대기 중에서 다양한 과정으로 인해 변화될 수 있기 때문에, 해당 지역에 대한 고유한 질량흡수단면을 산출하는 것이 중요하다. 안면도 기후변화감시소는 세계기상기구에서 수행하는 지구대기감시 프로그램(Global Atmosphere Watch, GAW) 산하 지역급(regional) 관측소로, 국지적인 오염의 영향이 적고 장거리 이동 영향을 파악할 수 있어 동아시아 배경대기 분석에 적합한 곳이다. 이에 따라 본 연구에서는 안면도 기후변화감시소에서 광흡수계수측정기(Aethalometer)와 준-실시간 OCEC 분석기로 장기측정한 2017년부터 2023년까지의 자료를 사용하여, 질량흡수단면을 산출하기 위한 과정을 수행하였다. 광흡수계수측정기에서 발생하는 편향을 보정하기 위해 적절한 Cref 값(매질효과 보정을 위한 상수)과 f 값(로딩효과를 보정하기 위한 ATN의 함수)을 결정하여 광흡수계수를 다시 산정하였다. 이후 이차 유기탄소(Secundary Organic Carbon, SOC)와 흡수옹스트롬 지수(Absorption Angstrom exponent, AAE)를 산출하여 안면도에서 관측되는 에어로졸의 배출원을 파악하였다. 안면도 AAE_{470/950}의 연평균은 1.2로, 같은 배경대기인 제주도 고산(평균 1.4)보다 낮았다. 또한 AAE 값으로 산출한 식생연소 배출 기여도(Wood Burning, WB)와 자동차 배기가스 배출 기여도(Traffic emission, TR)는 각 30%와 70%였고, 장기적으로 TR이 1.046/year 감소하는 추세를 보였다. 여름에 자동차 배출기원의 SOC의 비율이 증가하고 겨울에는 식생연소 기원의 일차 유기탄소의 영향이 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구는 배경대기에서 다년간 관측된 자료를 활용하여 에어로졸의 복합적인 정보를 분석하고 제공할 수 있다. 이를 통해 정확한 광흡수계수와 원소탄소를 산정하고, 질량흡수단면을 산출할 예정이다. 산출된 질량흡수단면은 아시아 블랙카본 기후효과 진단에 중요한 입력자료로 활용이 가능하다.

Key words: 블랙카본, 질량흡수단면, 흡수옹스트롬지수, 이차 유기탄소, 배출원

※ 이 자료는 기상청 국립환경과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA2018-00521)”의 지원으로 생산되었습니다.

CPM을 이용한 2022년 8월 남한 극한 강수 사례에 대한 인위적 온난화의 영향 및 민감도 분석

권다운¹, 민승기¹, 이민규², 서가영¹, 손석우³

¹포항공과대학교 환경공학부

²에너지기술연구원 신재생에너지 데이터센터

³서울대학교 지구환경과학부

인위적 온난화에 대한 극한 강수 사례의 반응을 정량화하는 것은 신뢰할 수 있는 미래 기후 예측과 관련된 영향 평가를 위해 필요하다. 본 연구에서는 해상도 3km의 WRF (Weather Research and Forecast) 모델을 사용한 CPM (Convection Permitting Model) 앙상블 실험을 수행하여 인위적인 온난화에 대한 시간별 극한 강수량의 반응을 연구하였다. 분석의 대상으로 선정된 극한 강수 사례는 2022년 8월 8일부터 11일 사이 남한에서 발생한 호우 사례이다. 인위적 온난화에 대한 사례의 반응을 분석하기 위해 우선 재현 실험에 해당하는 ALL 실험을 수행하였다. 그리고 PGW (Pseudo Global Warming) 방법을 적용하여 재분석자료로부터 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)에서 도출된 인위적 온난화를 제거한 후, 동일 사례를 모의한 유사 온난화 제거 실험, NAT 실험을 수행하였다. 특히 현재 기후 대비 자연 강제력만이 고려된 기후에서 대류권 상층 냉각이 상대적으로 강하고 약한 두 가지 유형의 NAT 실험을 비교하여 인위적 온난화의 연직 구조에 따른 대기 불안 정도의 변화가 주는 영향을 분석했다. NAT 실험에서는 9개 GCM (Global Climate Model)의 다중 모델 평균값으로 인위적 온난화를 추정하였고, NATW 실험에서는 대류권 상층의 인위적 온난화가 상대적으로 약한 3개 GCM을 선정하여 사용했다. 본 연구에서는 사례의 열역학적 변화 영향에 초점을 맞추기 위해 해수면 온도와 대기 온도 및 상대습도 변수에서 인위적 온난화를 제거하였다. 그 결과 인위적 온난화가 제거되면서 NAT 실험에서 대기 중 수분이 전반적으로 감소하는 결과를 보였다. 그러나 인위적 온난화 제거로 인한 대류권 상층의 냉각이 국지적인 대류 불안정성 증가에 기여했고, 이는 수분 감소 효과를 상쇄하였다. 따라서 가강수량의 감소보다 총 강수량의 감소가 적게 나타났으며, 강수 사례의 시간 당 극한 역시 NAT 실험에서 유지되는 결과를 보였다. 이러한 대류 불안정성 증가의 상쇄 효과는 대류권 상층에서 더 강한 냉각이 주어진 NAT 실험에서 NATW 실험보다 상대적으로 크게 나타났다. 해당 연구는 PGW 방법을 적용하여 동아시아 몬순 지역의 극한 강수 사례의 인위적 온난화 영향을 평가할 때, 공간 분포로 추정된 인위적 온난화의 대류권 상층 온난화 정도가 대기의 대류 불안 정도에 영향을 줄 수 있으므로 대상이 되는 극한 사례의 민감도를 고려해야 함을 시사한다.

Key words: 극한 강수, 대류허용모델, 유사 온난화 제거, 인위적 강제력 영향 분석