

Particulate Matter Impacts on Solar Power Capacity Factor across Administrative Regions in Korea

Sungmin O¹ and Javier Lopez Prol²

¹Department of Electronic and AI System Engineering, Kangwon National University

²Yonsei University, Mirae Campus

The impact of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) on solar power generation has attracted increasing attention as air pollution and renewable energy expansion proceed simultaneously in South Korea. While previous studies have examined the relationship between aerosols and photovoltaic (PV) performance at the national scale or at specific locations, little is known about regional heterogeneity. In this study, we quantify the effects of particulate matter on solar power capacity factor across administrative regions (provinces and major cities) of South Korea using open-source observations. To do this, we employ multiple regression and tree-based machine learning models, incorporating both meteorological factors (solar radiation, temperature, humidity, wind) and air quality data. The models achieved high explanatory power (R^2 exceeding 0.7), ensuring robust estimation of factor importance. Preliminary analysis revealed that Seoul, with high particulate matter concentrations but limited PV installations, showed relatively small sensitivity in capacity factor, whereas Jeollanam-do, characterized by abundant solar resources and extensive PV deployment, exhibited stronger PM-related impacts. These results emphasize the importance of accounting for local climatological and socio-energetic contexts, rather than relying on nationwide averages, when assessing aerosol effects on renewable energy output. Our findings provide scientific basis for improving solar energy forecasting and developing region-specific energy management strategies under varying air quality conditions.

Keywords: Particulate matter, Solar power, Capacity factor, Machine learning, Energy meteorology

※ This work is supported by the International Joint Research Promotion Program of Kangwon National University

특별세션 10 / 기상기후 특성화 대학원 2

GIS데이터와 머신러닝을 이용한 침수가능지역 지도 작성

하성철¹, 최승철², 김병식³

¹강원대학교 방재전문대학원 도시환경재난관리전공

²강원대학교 AI기후재난기술융합연구소

³강원대학교 전자AI시스템공학과/방재전문대학원

기후변화에 따른 극한 강우사상의 빈발화와 강도 증가는 도시지역의 침수 피해를 가중시키고 있으며, 기상-수문 재해에 취약한 지역의 선제적 관리가 중요한 과제로 대두되고 있다. 전통적인 수치 모의 기반의 침수 예측 모형은 기상 입력자료의 불확실성과 과대산정 경향, 그리고 계산 시간의 한계로 인해 실시간 재해 대응에 제약이 있다. 이에 반해 머신러닝 기법은 복잡한 기상-지형-침수 관계를 효과적으로 학습하여 신속한 침수 위험도 평가가 가능하며, 다양한 지형 및 기상 조건을 종합적으로 반영한 예측 모델 개발이 가능하다. 본 연구에서는 부산광역시와 군산시를 대상으로 지형 기반 머신러닝 침수 예측 모델을 개발하고, 서로 다른 기후-지형 특성을 가진 지역 간 모델 이전 가능성을 검증하였다. 연구대상지역은 산지가 주변부에 위치하고 시가지가 저지대에 집중된 부산광역시(15,453개 격자)를 학습지역으로, 서해안 평야지대에 위치하여 배수 불량 특성을 나타내는 군산시(10,892개 격자)를 검증지역으로 설정하여 250m×250m 공간 단위로 분석하였다. 독립변수로는 DEM, 경사도, 곡률도, 흐름방향, 지형인자, 토양도, 토지피복도, 식생지수 등 8개의 지형 및 환경 인자를 사용하였으며, 종속변수는 행정안전부 침수흔적도를 활용하여 침수 발생 및 미발생 격자로 분류하였다. Decision Tree, Random Forest, XGBoost, CatBoost 등 4가지 머신러닝 알고리즘을 적용하여 성능을 비교 평가하였으며, 각 모델의 침수 발생 확률을 5개 위험도 등급(보통, 관심, 주의, 경계, 심각)으로 분류하여 침수위험도 지도를 작성하였다. 모델 성능 검증 결과, CatBoost 모델이 ROC-AUC 0.872로 가장 우수한 성능을 보였으며, 부산 데이터로 학습된 모델의 군산 적용 시에도 ROC-AUC 0.745로 약 85% 수준의 성능을 유지하여 기후-지형 특성이 상이한 지역 간 모델 이전 가능성을 확인하였다. Transfer Learning 기법을 통해 군산 지역의 소량 데이터를 추가 학습한 결과 ROC-AUC가 0.745에서 0.801로 향상되어 현지 기후-수문 특성을 반영한 효과적인 성능 개선이 가능함을 입증하였다. 변수 중요도 분석 결과, 서로 다른 기후-지형 환경의 두 지역에서도 DEM, 경사도, 흐름방향이 공통적으로 주요한 예측 변수로 작용하여 강우-지형 연계 침수 발생 메커니즘의 보편적 특성을 확인하였다. 본 연구는 기후변화 시대의 극한 강우에 따른 도시 침수 위험도 평가에 머신러닝 기술의 적용 가능성을 실증적으로 검증한 연구로서, 향후 전국 단위 기상-수문 재해 조기경보 시스템 구축 및 지자체 기후적응 정책 수립에 중요한 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

Keywords: 기후변화, 극한강우, 머신러닝, 침수예측, 기상기후데이터

※ 이 논문은 기상청 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

특별세션 10 / 기상기후 특성화 대학원 3

기상데이터와 AI 기반 출력제한 예측을 통한
실시간 저비용 그린수소 생산

이상훈, 엄수빈

이화여자대학교 기후에너지시스템공학과

재생에너지 보급이 확대되면서 출력제한(curtailment) 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이에 따라 저비용 그린수소 생산을 위해 출력제한을 활용하는 방안이 검토되고 있다. 본 연구는 기상데이터를 기반으로 재생에너지 출력제한과 전력가격(지역한계가격, local marginal price, LMP)을 인공지능(AI)으로 예측하여 실시간 수소 생산에 적용하는 방안을 제안하였다. 과거의 출력제한, 전력가격, 기상자료를 활용하여 시간별 출력제한과 LMP를 예측하기 위해 세 가지 기계학습 모델, Long short-term memory(LSTM), Bidirectional LSTM(BiLSTM), Extreme Gradient Boosting(XGBoost)을 활용하였다. 예측값은 현실적인 운전 제약하의 2 GW 알칼라인 전해조에 대하여, 시간별 균등화수소비용(Levelized Cost of Hydrogen, LCOH)을 계산하는 데 활용되었다. 결과에 따르면 태양광 출력제한 예측에서는 LSTM이 가장 정확하며, 풍력 출력제한과 LMP 예측에서는 BiLSTM이 우수함을 확인하였다. 분석 결과에 따르면 출력제한이 높고 전력가격이 낮은 기간에는 LCOH가 유의하게 감소하였다. 전해조 용량과 최소 출력제한 임계값에 대한 민감도 분석에서는 가정된 조건 하에서 LCOH 중앙값을 3 \$/kg 이하로 유지할 수 있음을 보인다. 본 연구는 기상데이터, AI 기반 예측과 수소 생산의 기술경제적 분석을 연계하여 저비용으로 그린수소를 생산할 수 있는 가능성을 제시하였다.

Keywords: 기상데이터, 인공지능, 그린수소, 출력제한, 기술경제성 분석

※ 이 논문은 정부(기상청)의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 이 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업입니다.(2018R1A6A1A08025520)

6-hour Photovoltaic Power Forecasting Using AI-based Cloud Motion Vector and GK2A Imagery over South Korea

Yoon-Kyoung Lee¹, JungHae Her², Yong-Sang Choi^{1,2}, Hwayon Choi², and Jaemin Song³

¹Center for Climate/Environmental Change Prediction Research, Ewha Womans University

²Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University

³National Electric Power Control Center, Korea Power eXchange

In the face of increasing renewable energy demand, accurate forecasting of photovoltaic (PV) power is crucial for grid stability. This study presents a hybrid AI model that improves 6-hour PV power forecasting accuracy over South Korea. Our approach utilizes GK2A satellite imagery and employs a convolutional neural network (CNN) for AI-based cloud motion tracking to forecast cloud motion vectors (CMV) up to six hours ahead. The effective cloud fraction (ECF) is then derived from the AI-predicted cloud motion vectors (CMV) to quantify the impact of clouds. This ECF, along with other meteorological data, is fed into a multiple linear regression (MLR) model to predict the final PV power output. Validation results show a normalized mean absolute error (nMAE) below 2% during daytime hours. Our framework, which effectively combines high-resolution satellite imagery and AI-based cloud motion tracking, provides a robust and generalizable solution applicable to various geographical and meteorological conditions. This research offers a practical pathway to enhance grid management and accelerate renewable energy integration by leveraging the power of satellite data for superior forecasting.

Keywords: GK2A, Effective Cloud Fraction, Photovoltaic Power Forecasting, Optical Flow, Solar Power Generation

특별세션 10 / 기상기후 특성화 대학원 5

관측자료 기반 기계학습을 이용한 시정 및 안개 예측 가능성 평가

한지혜¹, 서명석^{1,2}, 김찬수²¹국립공주대학교 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업단²국립공주대학교 대기과학과

시정은 육안으로 물체를 구분할 수 있는 수평거리를 의미하며, 시정의 저하는 지상, 해상, 항공 교통에 직접적인 영향을 미친다. 특히, 대기 중의 수적으로 인해 시정이 1 km 미만인 안개는 교통사고를 유발할 뿐만 아니라 대기 오염 악화, 농작물 및 에너지 수지에도 직간접적인 피해를 끼친다. 그러나 시정은 지역적 특성과 다양한 요소들의 복합적인 영향으로 결정되기 때문에, 그 예측은 매우 어려운 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 시정에 영향을 주는 요소들이 알려져 있다는 이상적인 조건에서 지리적 위치(5개 지점), 입력자료(4개 실험), 기계학습 기법(3개 모형)이 시정 예측에 미치는 영향을 분석하고 시정 예측 가능성을 평가하였다. 시정 예측을 위해 사용한 자료는 기상청에서 제공하는 AWS/ASOS, 운고계, 시정계와 한국환경공단에서 제공하는 미세먼지 측정 자료를 이용하였다. 안개를 포함한 시정에 영향을 미치는 요인들이 지리적 위치에 따라 달라질 수 있음을 고려하여 5개의 지상관측지점을 선정하였다. 시정에 영향을 미치는 다양한 요인들을 고려하기 위해, 기상관측자료만 사용한 실험(MO), 미세먼지 측정 자료를 추가한 실험(MP), 시정 자료를 추가한 실험(MV), 사용 가능한 모든 지상관측 자료를 활용한 실험(MVP)을 수행하였다. 기계학습 모형은 트리 기반 앙상블 기법인 Extreme Gradient Boosting(XGB)과 Random Forest(RF), 신경망 기반의 Gated Recurrent Unit(GRU)을 적용하였다. 분석 결과, 입력 데이터가 지리적 위치 또는 기계학습 모형과 관계없이 예측 성능에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 특히 이전 시간의 시정 변수가 가장 기여도가 높았다. 또한 기계학습 모형에 관계없이 지리적 위치에 따라 상이한 시정 예측 성능을 보였다. 기계학습 모형 중에서는 XGB가 지리적 위치 및 입력자료의 종류와 무관하게 안정적이고 우수한 성능을 보였다. 특히, 대관령, 금산 등 일부 지점에서는 안개를 의미하는 저시정에 대한 예측 성능이 2~3시간까지도 우수하게 나타나고 있다. 하지만 현실적으로 미래의 기상장 및 미세먼지 농도를 정확히 예측할 수 없는 점, 시정 관측지점이 매우 한정된 점 등을 고려할 때, 이상적인 조건에서 최신의 기계학습법을 사용하더라도 정확한 시정을 예측하는 것은 한계가 있었다. 본 발표에서는 입력 자료, 지리적 위치, 기계학습 모형에 따른 시정 및 안개 예측 성능을 정량적으로 비교하고, 예측 시간에 따른 예측 성능을 상세히 제시할 것이다.

Keywords: 안개, 시정, 기계학습, 예측가능성

※ 이 논문은 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

특별세션 10 / 기상기후 특성화 대학원 6

최근 동아시아 황사 발생의 시공간 변화 특성 분석

김슬아, 이상현

공주대학교 대기과학과
중부권 미세먼지연구관리센터

동아시아 황사 발원지는 기후 변화의 영향으로 황사 발생 특성이 복잡하게 변화하고 있다. 기존 연구들은 이러한 황사 활동의 변화를 분석하였으나, 분석 기간과 공간 범위, 고려된 영향 인자 등 분석 기준의 차이로 인해 황사 발생의 장기적 추세에 대해 일관된 결론을 제시하지 못하였다. 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 1998년부터 2025년까지의 지상 관측(SYNOP) 및 위성 자료와 WRF-Chem 모델을 통합하여 동아시아 발원지 지역에서의 황사 발생의 시공간적 변화 특성을 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 동아시아 전역의 황사 발생 빈도는 2011년을 기점으로 감소세로 전환된 것으로 나타났다. 하지만, 동아시아 황사의 주요 발원지인 고비 사막과 타클라마칸 사막에서는 장기적 증가 추세를 보였으며, 두 지역은 서로 다른 변화 패턴을 보였다. 고비 사막은 약 8년의 뚜렷한 변동 주기를 보인 반면, 타클라마칸 사막은 2010년대 후반 먼지 발생 일수가 연평균 2일 수준까지 급감했다가 2020년 이후 다시 급격히 증가하여 2023년에는 7일을 초과하는 최고치를 기록하는 추세 변화를 보였다. 따라서, 동아시아 황사는 전반적인 감소 경향을 보인 반면 주요 발원지의 황사 발생은 오히려 증가하는 결과를 보였다. 이는 황사 발생 양상이 기후·환경 변화에 따라 지역적으로 매우 상이할 수 있음을 보여준다.

Keywords: 황사, 발원지, 동아시아, 기후·환경 요인, 먼지 배출 모형

※ 이 연구는 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원과 환경부의 재원으로 국립환경과학원(NIER-2021-03-03-007)의 지원을 받아 수행되었습니다.