

인공지능을 통한 기후변화 대응 연구

홍윤기⁺, 이상철, 조한얼, 김찬수*

한국과학기술연구원 인공지능·정보·추론 연구실, 과학기술연합대학원대학교 AI로봇
orange4381@kist.re.kr, eau@ust.ac.kr*

A Review of Research on Climate Change Response through Artificial Intelligence

Yoongi Hong⁺, Sangcheol Lee, Haneol Cho, Chansoo Kim*

KIST (Korea Institute of Science and Tech.) and UST (Univ. of Sci. and Tech.)

요약

본 논문은 기후변화 대응을 위해 인공지능(AI) 및 머신러닝(ML) 기술이 온실가스(GHG) 배출을 최소화하는 데 어떻게 활용될 수 있는지에 대한 다양한 연구들을 종합적으로 검토하였다. 강화학습, 딥러닝, 클러스터링 분석, 동적 게임 이론과 같은 AI 및 ML 접근법이 산업 활동, 에너지 소비, 경제 지표, 기상 데이터 등을 독립 변수로 활용하여 GHG 배출을 줄이기 위한 전략을 제시하는 방법들을 탐구하였다. 각 기술의 응용 사례를 바탕으로 기후변화 대응 전략 수립에 기여할 수 있는 가능성을 검토하였으며, 이들 기술이 실질적으로 어떻게 적용될 수 있는지를 다루었다.

I. 서론

기후 변화는 전 세계적으로 심각한 문제로 인식되고 있으며, 이에 효과적으로 대응하기 위해서는 온실가스 배출을 줄이는 것이 필수적이다. 최근 AI(인공지능)와 ML(머신러닝) 기술은 이러한 목표를 달성하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 이 기술들은 에너지 소비, 산업 활동, 경제 지표 등 다양한 독립 변수를 활용하여 온실가스 배출을 예측하고 최적화하는 데 기여하고 있다. 본 논문은 AI 및 ML 방법론을 종합적으로 검토하고, 각 접근법이 기후변화 대응 전략 수립에 어떻게 활용될 수 있는지를 살핀다.

II. 본론

AI 및 ML 방법론을 통해 온실가스 배출을 예측하고 최적화하는 주요 방법론으로는 강화학습, 앙상블 머신러닝, 딥러닝, 클러스터링 분석, 동적 게임 이론 등이 있다. 이들 방법론은 다양한 산업 분야에서 적용되어 기후변화에 대응하기 위한 중요한 전략을 제공하며, 에너지 소비 절감, 탄소 배출 예측 및 최적화, 그리고 정책 영향 평가와 같은 문제들을 해결하는 것을 목표로 사용될 수 있다

1. 기후변화 대응을 위한 에너지 분배

· **에너지 소비 절감** 계층적 군집화(Hierarchical Clustering) 기법을 활용하여 에너지 소비를 분석하고, 탄소 배출 강도(coefficient)와 전력 사용 효율성(PUE)를 독립 변수로 고려하여 이산화탄소(CO2) 배출량을 최소화하는 방안을 도출한다. 이 접근법은 다양한 에너지 소비 패턴을 이해하고, 이를 기반으로 최적의 에너지 사용 계획을 수립하는 데 기여한다 [1].

· **에너지 수요 예측을 통한 최적 공급** Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL)을 전력 가격, 가스 가격, 전력 수요, 가스 수요 등을 독립 변수로 사용하여 전기 및 가스 통합 시스템의 에너지 수요를 예측하고 최적의 공급 전략을 개발한다. 이를 통해 에너지 공급의 효율성을 극대화하고 이산화탄소(CO2) 배출량을 줄인다[2].

2. 산업분야별 탄소배출 관계 해석

· **농업** Random Forest (RF), K-최근접 이웃(KNN), Gradient Boosting Regression (GBR) 등의 앙상블 머신러닝 기법을 통해 농업 분야에서 발생하는 온실가스 배출량을 모델링한다. 기상 데이터, 관개 관리 방법, 토양 유기 탄소, 토양 산도, 비료 사용량 등을 독립 변수로 활용하여 메탄(CH4) 및 아산화질소(N2O) 배출량을 예측한다[3].

· **운송** 반응 표면 분석(RSM)과 Random Forest (RF), 서포트 벡터 회귀(SVR)를 결합한 모델을 사용하여 에너지 소비량, 차량 소유 비율, 운송 부문에 종사하는 인구, 운송 경제성 등의 데이터를 분석해 이산화탄소(CO2) 배출량을 예측한다[4].

· **건축** ARIMA(Autoregressive Integrated Moving Average), 선형 회귀(Linear Regression), 얇은 신경망(Shallow Neural Networks), 깊은 신경망(Deep Neural Networks)을 통해 에너지 소비 패턴, 지역별 경제 지표, 인구 증가율 등을 고려하여 건물의 에너지 사용이 CO2 배출에 미치는 영향을 분석한다[5].

· **에너지 시장** ANN, ARIMA, RF, SVR, KNN, LSTM 등 다양한 머신러닝 알고리즘을 결합하여 에너지 생산량, 화석 연료 소비량, 에너지 수출입 데이터, 산업 및 운송 부문 에너지 소비 등 에너지 시장 데이터를 분석하고, 이산화탄소(CO2), 아산화질소(N2O), 메탄(CH4), 플루오로화 가스 배출량을 예측한다.

3. 정책 및 의사결정 지원

· **경제성 분석** 경제 활동 수준, 교통량, 산업 생산량 등을 입력으로 고려해 K-means 클러스터링과 복잡 네트워크 모델을 사용해 중국의 COVID-19 봉쇄 기간 동안 경제 활동의 변화가 CO2 배출에 미친 영향을 분석하거나[7], GDP, 산업 구조, 에너지 소비 패턴을 기준으로 K-means 클러스터링을 통해 도시의 에너지 소비와 탄소 배출 간의 경제적 효율성을 평가한다[8].

· **정책 영향 평가** Symbolic Regression을 활용하여 67개국의 경제 성장과 CO2 배출 간의 관계를 분석하고, 국가별 경제 특성을 반영한 각국의

탄소 배출과 경제 성장 간의 패턴을 모델링하여 정책이 경제 성과에 미치는 구체적인 영향을 분석한다[9]. 동적 게임 이론을 통해 자원 소비자와 에너지 생산자 간의 전략적 상호작용을 분석하여, 최적의 탄소세 및 에너지 가격 정책을 도출하고, 이를 통해 CO2 배출을 최소화하는 방안을 제시한다[10]. LSTM을 통해 CO2 배출량을 예측하고, 통계적 프로세스 제어(SPC)를 활용하여 정책 시행 후의 변동성을 분석함으로써, 정부의 탄소 감축 정책 효과를 평가하고 있다[11].

III. 결론

본 연구는 다양한 AI 및 ML 방법론이 온실가스 배출을 최소화하고 경제 성과를 유지하는 데 어떻게 기여할 수 있는지를 종합적으로 검토하였다. 각 방법론은 사용된 독립 변수에 따라 다양한 산업과 환경에서 활용될 수 있으며, 기후 변화 대응 전략 수립에 중요한 역할을 할 수 있다. 향후 연구는 이러한 방법론을 더욱 정교하게 발전시키고, 실질적인 적용 사례를 확대함으로써 지속 가능한 발전을 달성하는 데 기여할 수 있겠다.

분야	방법	독립/조절변수	기후변화지표변수	Refs.
기후변화 대응을 위한 에너지 분배	계층적 군집화(Hierarchical Clustering)	탄소 배출 강도(coefficient), 전력 사용 효율성(PUE)	이산화탄소(CO2) 배출량	[1]
	MADRL	전력 가격, 가스 가격, 전력 수요, 가스 수요 등	이산화탄소(CO2) 배출량	[2]
산업분야별 탄소배출 관계 해석	농업	RF, KNN, GBR	메탄(CH4), 아산화질소(N2O) 배출량	[3]
	운송	반응표면분석(RSM), RF, SVR 등	에너지 소비량, 차량 소유 비율, 운송 부문에 종사하는 인구, 운송 경제성 등	[4]
	건축	ARIMA, 선형 회귀 및 DNN 등	에너지 소비 패턴, 지역별 경제 지표, 인구 증가율 등	[5]
	에너지 시장	ANN, AR, ARIMA, SARIMA, SARIMAX, RF, SVR, KNN, LSTM	에너지 생산량, 화석 연료 소비량, 에너지 수출입 데이터, 산업 및 운송 부문 에너지 소비 등	[6]
정책 및 의사결정 지원	경제성 분석	K-means, Complex Network Model 등	이산화탄소(CO2) 배출량	[7], [8]
	영향 평가	Symbolic Regression, Dynamic Game Theory, LSTM, SPC 등	이산화탄소(CO2) 농도/배출량	[9], [10], [11]

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the grant Nos. 2021-0-02076, 2024-00460980, 2024-00339583 and 2023-00262155 (IITP) funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT).

참 고 문 헌

[1] S.A. Budenny, V.D. Lazarev, N.N. Zakharenko et al. "eco2AI: Carbon Emissions Tracking of Machine Learning Models as the First Step Towards Sustainable AI," *Doklady Mathematics*, vol. 106, Suppl 1, pp. S118 - S128, 2022.

[2] Feng W, Deng B, Zhang Z, Jiang H, Zheng Y, Peng Y. "Low-carbon economic dispatch strategy for integrated electrical and gas system with GCCP based on multi-agent deep reinforcement learning," *Energy Consumption*, 2024.

[3] Zewei Jiang, Shihong Yang, Pete Smith, Qingqing Pang. "Ensemble machine learning for modeling greenhouse gas emissions at different time scales from irrigated paddy fields," *Field Crops Research*, Volume 292, 2023.

[4] Hamed Khajavi, Amir Rastgoo. "Predicting the carbon dioxide emission caused by road transport using a Random Forest (RF) model combined by Meta-Heuristic Algorithms," *Sustainable Cities and Society*, Volume 93, 2023.

[5] Spyros Giannelos, Federica Bellizio, Goran Strbac. "Machine learning approaches for predictions of CO2 emissions in the building sector," *Industrial Activity Indicators*, 2024.

[6] Majid Emami Javanmard, S.F. Ghaderi. "A Hybrid Model with Applying Machine Learning Algorithms and Optimization Model to Forecast Greenhouse Gas Emissions with Energy Market Data," *Sustainable Cities and Society*, Volume 82, 2022.

[7] Ruikun An, Guohua Zhu. "Clustering of economic efficiency of urban energy carbon emissions based on decoupling theory," *Energy Reports*, Volume 8, 2022.

[8] Hu J, Chen J, Zhu P, Hao S, Wang M, Li H, Liu N. "Difference and Cluster Analysis on the Carbon Dioxide Emissions in China During COVID-19 Lockdown via a Complex Network Model," *Frontiers in Psychology*, 2022.

[9] Zhang, XB. "A Dynamic Game of Strategic Carbon Taxation and Energy Pricing with Green Technology Innovation," *Industrial Activity Indicators*, 2023.

[10] Ezenkwu, C.P., Cannon, S., Ibeke, E. "Monitoring carbon emissions using deep learning and statistical process control: a strategy for impact assessment of governments' carbon reduction policies," *Policy Data*, 2024.

[11] Wenli Li, Guangfei Yang, Xianneng Li, Tao Sun, Jianliang Wang. "Cluster analysis of the relationship between carbon dioxide emissions and economic growth," *Journal of Cleaner Production*, Volume 225, 2019.