

2024 인재양성 프로그램
연구자 최종 결과보고서

배출권거래제도 리스크 규명 및 탄소가격 예측을 통한 배출권거래제 이행 지원

Promoting the Implementation of Emissions Trading Scheme (ETS) by
Risk Identification and Carbon Price Forecasting

2025.01

세사리 데시
(특정주제 연구자)

제 출 문

재단법인 숲과나눔 이사장 귀하

본 보고서를 “배출권거래제도 리스크 규명 및 탄소가격 예측을 통한 배출권거래제 이행 지원”의 최종 연구 결과보고서로 제출합니다.

2025년 01월 30일

연구 원 : 세사리 데시(특정주제연구자)

※ 본 보고서의 내용은 연구자의 의견이며, (재)숲과나눔의 공식적인 견해와는 다를 수 있습니다.

결과보고서 초록

연구원	세사리 데시	구분	특정주제연구자
연구제목	한글	배출권거래제도 리스크 규명 및 탄소가격 예측을 통한 배출권거래제 이행 지원	
	영문	Promoting the Implementation of Emissions Trading Scheme (ETS) by Risk Identification and Carbon Price Forecasting	
연구기간	2024.3.1 ~ 2024.12.31		
색인어	한글	배출권거래제도, 리스크 규명, 탄소가격 예측, 텍스트 분석, 기계학습	
	영문	Emissions Trading Scheme (ETS), risk identification, carbon price forecasting, text analysis, machine learning	

탄소 시장은 온실가스 배출 감축을 위한 주요 경로 중 하나로, 탄소세와 배출권 거래제(ETS)의 두 가지 주요 틀로 구성된다. ETS는 그 메커니즘의 유연성 덕분에 중요한 역할을 하지만, 초기 시행 단계에서 발생할 수 있는 불확실성으로 인해 잠재적 위험을 식별하고 해결하는 것이 중요하다. 본 연구는 ETS의 초기 시행을 강화하고 시장과 관련된 위험을 완화하는 것을 목표로 하며, 이를 달성하기 위해 두 가지 구체적인 연구 과업을 수행한다. 첫째, ETS 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출 및 제도 개선을 제안한다. 둘째, 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성변수별 배출권가격에 대한 영향을 평가한다. 첫 번째 과업의 이행을 위해, 본 연구는 텍스트 분석 및 동적 토픽 모델링(Dynamic Topic Modeling, DTM)을 학술 문헌에 적용하여 ETS와 관련된 주요 주제와 동향을 분석한다. 분석 결과, “mechanism“, “design“, “allocation“, “price“이 핵심 용어로 나타나, ETS 설계와 시장 메커니즘이 주요 관심 영역임을 시사한다. 두 번째 목표를 위해, 본 연구는 ETS 가격을 예측하고 다양한 입력 변수의 중요도를 평가하기 위해 CatBoost 모델을 활용한다. 이 연구의 독특한 특징은 배출량 할당 상한(allowance cap), 할당 방식(allocation type), 이월 및 차입(banking and borrowing), 상쇄 크레딧(offset credit)과 같은 ETS 메커니즘 변수를 입력 요소로 포함한 것이다. CatBoost 모델은 EU, 스위스, 퀘벡 데이터를 사용해 훈련되었으며, 높은 예측 성능을 달성하였다. 훈련된 모델은 전이 학습(transfer learning)을 통해 다른 지역의 ETS 가격 평가에 적용되었으며, 여기에서는 한국 데이터를 평가 대상으로 사용하였다. 특성 중요도 분석 결과, ETS 가격에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 누적 주차(cumulative weeks)와 ETS 메커니즘 변수와의 상호작용(interactions)으로 나타났다. 이는 ETS의 시간적 발전과 성숙도가 가격 동향에 크게 영향을 미친다는 것을 의미한다. 본 연구는 텍스트 분석을 통해 ETS의 잠재적 위험을 분석하고, 머신러닝 모델을 활용하여 ETS 가격의 평가와 변수 중요도를 탐구함으로써 ETS 설계와 주요 변수 간 상호작용에 대한 이해를 증진하고 효율적인 정책 설계 개발에 기여한다.

Abstract

The carbon market is one of the key pathways for reducing greenhouse gas emissions and is composed of two main frameworks: carbon taxes and emissions trading schemes (ETS). While ETS plays a critical role owing to the flexibility of its mechanisms, it is essential to identify and address potential risks during its initial implementation phase. This study aims to enhance early ETS implementation and mitigate risks associated with the market. To achieve this goal, two specific research objectives are performed: (1) identifying potential risks and proposing improvements through a comparative analysis of the existing ETS cases, and (2) predicting ETS prices and evaluating the impact of key variables using machine learning. For the first objective, the study analyzes key topics and trends related to ETS using text analysis and Dynamic Topic Modeling (DTM) applied to academic literature. The analysis indicates “mechanism,” “design,” “allocation,” and “price” as core terms, suggesting that ETS design and market mechanisms are primary areas of interest. For the second objective, the study employs the CatBoost model to predict ETS prices and evaluate the importance of various input variables. A distinguishing feature of this study is the inclusion of ETS mechanism variables as input factors, such as allowance cap, allocation type, banking and borrowing, and offset credit. The model is trained using data from EU, Switzerland, and Quebec, achieving high predictive performance. The trained model is then applied to evaluate ETS price in another region through transfer learning, here for Korean data. Furthermore, the feature importance analysis reveals that the most influential variable affecting ETS prices is cumulative weeks and its interaction with ETS mechanism features, indicating that temporal progression and the maturity of the ETS significantly impact price dynamics. This study contributes by analyzing potential risks in ETS through text analysis, and examining the evaluation and feature importance of ETS price through machine learning model. The findings supports the development of efficient policy design by enhancing understanding of ETS design and the interactions among key variables.

요약문

I. 제목

배출권거래제도 리스크 규명 및 탄소가격 예측을 통한 배출권거래제 이행 지원

II. 연구의 목적 및 필요성

온실가스 감축 경로 중 하나는 탄소 시장이다. 탄소 시장 프레임워크는 크게 탄소세와 배출권 거래제(emissions trading scheme, ETS)로 구분된다. 탄소세는 기존 세금 시스템을 활용하기 때문에 시행이 더 간단하지만, ETS는 ETS 메커니즘을 통해 더 큰 유연성을 제공한다는 점에서 중요한 역할을 한다. ETS 시행 과정에서 발생할 수 있는 잠재적 위험을 조사하는 것이 중요하다. 본 연구는 ETS 이행 초기 제고 및 시장의 리스크 규명 및 해소 목표로 한다. 연구 목적을 달성하기 위해 두 가지 세부 과업을 수행한다.

(1) ETS 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출 및 제도개선 제언

(2) 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성변수별 배출권가격 영향 평가

연구의 필요성 및 기대효과는 다음과 같다: 1) 배출권거래제 시장 초기, 참여자들의 거래에 장애가 되는 가격 불확실성 해소를 위한 배출권가격 예측 및 가격 영향요인 규명이 필요하다. 일반적으로 탄소 배출권의 가격은 내부 시장 메커니즘뿐 아니라 외부 영향에 의해 결정되기 때문에 배출권 거래제의 배출량 감축 효과는 탄소 가격의 변동에 영향을 받기(Ji et al., 2021; Zhang et al., 2023) 때문에 더욱 탄소 가격 변동을 설명하는 모형을 구축하는 것이 중요하다. 2) 배출권 거래제 운영 초기 제도의 정착 이전에 다수의 제도에서 정부 및 참여 기업들의 시행착오로 인한 혼란을 경험했으며 배출권거래제 초기 제도의 빠른 정착과 안정화를 위한 기존 주요국가의 배출권거래제도 운영을 통한 시사점 획득함으로써 이러한 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

III. 연구의 분석 방법 및 자료

• 배출권거래제 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출 및 제도개선 제언

첫 번째 세부 과업은 수집된 국제 학술 논문에 텍스트 분석을 적용한 후, ETS와 관련된 각 단어의 빈도나 중요성을 시각적으로 보여줄 수 있는 시각화 방법을 활용하여 bibliometric 분석을 수행하는 것이다. 텍스트 분석은 두 부분으로 나뉘어 진행된다: 1) 누적 수집된 논문의 텍스트 분석, 2) ETS와 관련된 주제의 시간적 변화를 추가적으로 분석하기 위한 동적 토픽 모델링을 활용한 텍스트 분석.

국제 논문은 “Web of Science “ 와 “OpenAlex API“ 데이터베이스에서 “emissions trading system“이라는 검색어를 사용하여 수집되었다. 텍스트 분석의 첫 번째 단계에서는 모든 논문의 키워드를 필터링한 후 WordCloud 기법을 사용하여 각 단어의 빈도를 분석한다. WordCloud는 비정형 텍스트 데이터를 분석하기 위한 대표적인 기법으로, 사전에 수작업으로 전처리된 텍스트를 활용한다(Jung et al., 2023). 두 번째 단계에서는 ETS와 관련된 주제 동향의 변화를 조사하기 위해 동적 토픽 모델링(Dynamic Topic Modeling, DTM)을 활용한 텍스트 분석을 진행한다.

분석에서는 “keywords“ 대신 “abstract“ 섹션을 사용하여 더 세부적인 인사이트를 제공한다. 허용된 단어는 고유 명사, 부사, 명사로 제한되며, 추가적으로 특정 불용어(stopwords)는 수작업으로 제외된다. 또한, 토픽 수를 테스트한 결과, 세 가지 토픽이 더 높은 설명력을 제공하는 것으로 나타났다. 긴 시간 범위를 고려하여 결과는 초반, 중반, 후반 시기를 각각 10년 단위로 나누어 제시한다. 각 토픽과 해당 연도를 WordCloud로 시각화하여 의미 있는 결과를 도출한다. 분석은 Python 라이브러리인 WordCloud (Mueller, 2024)와 Tomotopy(Lee, 2019)를 사용하여 수행된다.

- 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성변수별 배출권가격 영향 평가

여러 연구에서는 에너지 가격 및 사회경제적 변수를 기반으로 한 입력 변수를 사용하여 머신러닝 모델로 ETS 가격을 예측해왔다. 본 연구의 주요 차별점은 ETS 메커니즘 변수를 입력 변수로 포함한다는 점이다. 이러한 변수에는 배출권 할당량 상한(cap) 값, 이월(banking) 및 차입(borrowing) 비율, 할당 유형(예: 무상 할당 또는 경매 할당), 상쇄 크레딧 비율 등이 포함된다. 또한, 본 연구는 전이 학습(transfer learning) 접근법을 활용하여 훈련된 모델을 다른 지역의 ETS 가격을 예측하고 평가하는 데 사용한다.

모델 훈련을 고려할 때, 입력 변수는 두 가지 그룹으로 분류된다: 1) 지역적 요인(local factors) 과 2) 글로벌 요인(global factors). 지역적 요인에는 1인당 GDP, 환율과 같은 사회경제적 변수, 기간, 그리고 앞서 설명된 ETS 메커니즘이 포함된다. 반면, 글로벌 요인에는 원유, 석탄, 천연가스과 같은 에너지 가격이 포함된다. 단기적인 동적 패턴을 충분히 포착하면서 불필요한 시차를 포함하지 않기 위해 이전 4주 데이터를 나타내는 시차 값 4를 선택한다. 기간은 ETS 시작일 기준 누적 주차 번호(cumulative week)와 단계(ETS phase)로 표현되어 ETS 시행의 시간적 맥락과 진행 상황을 반영한다.

머신러닝 구현 워크플로우는 두 가지 단계로 나눌 수 있다: 1) 학습 과정과 2) 전이 학습 과정. 훈련 과정에서는 CatBoost 회귀 모델을 사용하여 기존 ETS(EU, 스위스, 퀘벡 데이터, 포함)의 입력 특성을 기반으로 ETS 가격을 학습한다. CatBoost 회귀를 위해 Python 라이브러리가 사용된다 (Prokhorenkova et al., 2018). 모델이 최적의 성능에 도달하면, ETS 가격에 대한 각 입력 변수의 영향을 평가하기 위해 영향 요인 분석을 실시한다. 전이 학습 과정에서는 훈련된 모델을 다른 지역, 즉 한국 ETS 데이터의 입력 변수를 사용하여 ETS 가격을 예측하는 데 적용한다. 또한, ETS 맥락에 특화된 요인을 조사하기 위해 추가적인 영향 요인 분석을 수행한다.

IV. 연구 결과

- 배출권거래제 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출 및 제도개선 제언

수집된 모든 논문의 키워드를 기반으로 누적 텍스트 분석을 실시한 결과, “정책(policy)“과 “시장(market)“이 가장 자주 등장하는 용어로 나타났다. 추가적으로, 이 두 키워드를 사용하여 논문을 필터링하고, 더 심층적인 인사이트를 얻기 위해 추가 텍스트 분석을 수행하였다. 분석 결과, “메커니즘(mechanism)“, “설계(design)“, “할당(cap)“, “가격(price)“이 가장 자주 등장하는 단어로 나타났으며, 이는 대부분의 연구가 이러한 측면에 초점을 맞추고 있음을 보여준다. 분석을 통해 ETS 리스크와 밀접하게 관련된 가장 중요한 용어들이 드러났으며, 특히 ETS 설계와 메커니즘의 구조, 그리고 ETS의 상한과 가격 결정 방식이 주요한 관심사임이 확인되었다.

자세한 분석을 위해 ETS와 관련된 각 주제의 변화를 파악하기 위해 논문 초록을 기반으로 동적 토픽 모델링(Dynamic Topic Modeling, DTM)을 활용한 추가 텍스트 분석을 수행하였다. 다양한 값을 테스트한 결과 총 토픽 수(k)=3이 가장 의미 있는 분석 결과를 제공하는 것으로 선택되었다. 시간 범위를 고려하여 분석은 초기, 중기, 최근의 세 시기로 나뉘며, 각각 10년 간격으로 구분되었다. DTM 결과를 바탕으로, 각 토픽에 해당하는 세트의 단어를 ChatGPT에 입력하여 주제 요약을 생성하였다. 도출된 주요 초점은 다음과 같다: 토픽 1은 자원 할당에 초점을 맞추고, 토픽 2는 시범(pilot) 사업과 안전성을 강조하며, 토픽 3은 시장 메커니즘과 탄소 가격을 강조한다.

- 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성변수별 배출권가격 영향 평가

훈련된 CatBoost 모델은 세 국가의 데이터를 학습하였으므로 ETS 가격 예측을 위한 “글로벌 모델”로 간주된다. 평가 지표 결과에서 작은 RMSE 값과 1에 가까운 R^2 값이 관찰되어 훈련된 모델이 ETS 가격 예측에서 우수한 성능을 보임을 해석한다. 추가적으로, 실제 ETS 가격과 예측된 ETS 가격의 비교 그래프를 통해 모델 성능을 시각적으로 확인할 수 있다.

전이 학습 결과, 실제 값과 예측 값의 비교 그래프에서, 미세 조정된 모델이 1단계에서는 실제 값과 예측 값이 유사함을 보여 우수한 성능을 나타낸다. 또한, 2단계 초기 기간 동안 두 값은 매우 유사하지만, 이후 점차 차이를 보이기 시작한다. 한국 ETS의 2단계에서는 실제 ETS 가격이 예측 값보다 높게 나타나 실제 ETS 가격이 예측 값 보다 과대 추정되었을 가능성을 시사한다. 그 후, 실제 값과 예측 값은 2단계 말기와 3단계 초기에 다시 일치하는 경향을 보인다. 그러나 2022년 초 실제 ETS 가격이 상승함에 따라 예측 값은 여전히 낮은 수준으로 나타났다. 2022년 말, 실제 ETS 가격은 하락하기 시작해 2024년까지 감소세를 이어간다. 이 추세는 예측 ETS 가격이 실제 값보다 높게 유지되면서 실제 ETS 가격이 예측 값 보다 과소 추정되었을 가능성을 나타낸다. 추가적으로, 다른 기존 ETS 시스템들은 ETS 가격이 지속적으로 증가하는 추세를 보이며, 이는 한국의 경우와는 차이를 보인다.

특성 중요도 결과에 따르면, 한국 제외한 모든 국가에서 가장 중요한 특성은 누적 주차(cumulative week)로 나타났다. 이는 ETS의 시간에 따른 변화(temporal progression)과 추가적인 발전이 ETS 가격에 영향을 미친다는 것을 시사한다. 이를 더 탐구하기 위해, 누적 주차와 다른 특성들 간의 상호작용(interaction)을 분석하였다. 분석 결과에 따르면, 누적 주차 특성은 ETS 메커니즘의 주요 변수들(배출 할당량 상한, 무상 할당, 경매 할당, 이월, 그리고 상쇄 크레딧과 상대적으로 높은 상호작용을 보이는 것으로 나타났다. 또한, ETS 메커니즘 변수들의 특성 중요도 유의미한 것으로 평가되었다.

ETS가 진행됨에 따라, 배출 할당량 상한은 일반적으로 감소하여 배출 제한을 강화하는데, 이는 ETS 가격 상승을 유도할 것으로 예상된다. 그러나, 한국의 경우에는 배출 할당량 상한이 증가하는 경향이 나타났다. 더불어, 무상 할당에서 경매 기반 할당으로의 전환은 시간적 변화에 반영되어 가격 변동에 영향을 미친다. 이러한 결과는 ETS 가격 패턴이 시간에 따라 변화할 뿐만 아니라, ETS 메커니즘과 정책 도구에 의해 크게 영향을 받는다는 점을 보여준다.

V. 연구 결과의 유용성

본 연구의 결과는 여러 중요한 시사점을 제공한다. 먼저, 연구 결과는 ETS 메커니즘과 관련된 잠재적 위험에 대해 중요한 통찰을 제공하며, 이는 메커니즘의 내용적 측면과 예측 방법론 모두를 다룬다. 배출 할당 상한과 할당 방식과 같은 주요 ETS 메커니즘 특성을 식별함으로써, 정책 입안자들에게 더 적응적이고 효율적인 ETS 시스템을 설계하기 위한 명확한 틀을 제시한다. 또한, 전이 학습을 활용하여 새로운 지역의 ETS 가격을 예측한 사례는 확장 가능하고 효과적인 예측 접근법의 잠재력을 강조한다. 이는 기존 데이터와 모델을 활용하여 ETS를 처음 도입하는 지역이 직면한 고유한 과제를 해결할 수 있음을 보여주며, ETS 연구와 응용 범위를 확장한다.

특성 중요도 분석은 누적 주차(cumulative weeks)와 기타 ETS 메커니즘과의 상호작용과 같은 시간적 변수의 영향을 강조한다. 이러한 이해는 ETS 가격 패턴의 투명성을 높이고, 시장 안정성을 증진시키는 데 기여한다. 이는 ETS 시스템의 시간적 발전과 성숙도가 시장 동향을 형성하는 데 중요한 역할을 한다는 점을 시사한다. 더 나아가, 본 연구의 결과는 잠재적 위험과 ETS 가격의 주요 결정 요인을 다루면서, 잘 설계된 ETS 정책이 장기적인 탄소 감축 목표를 달성하는 데 필수적임을 강조한다. 이는 메커니즘 특성과 시장 동향의 상호작용을 면밀히 고려하는 것이 정책 개발에서 중요하다는 점을 부각시킨다.

마지막으로, 본 연구는 ETS 메커니즘 변수를 주요 입력 요소로 통합한 텍스트 분석과 머신러닝 기법을 결합함으로써 융합적 연구 접근 방식을 제시한다. 이러한 혁신적인 방법론은 환경 정책 연구에서 추가적인 탐구를 독려하며, 탄소 시장을 최적화하고 온실가스 배출 감축을 강화하기 위한 글로벌 전략을 정교화할 수 있는 견고한 토대를 제공한다.

목차

초록	3
요약문	5
목차	9
표 목차	10
그림 목차	11
I. 서론	12
1.1. 연구의 배경.....	12
1.2. 연구의 목적.....	14
1.3. 연구 구성.....	15
II. 문헌 검토	16
2.1. ETS에 대한 일반적인 설명	16
2.1.1. 기존 ETS 요약	16
2.1.2. 기존 ETS로부터의 교훈	24
2.2. ETS 가격 예측	28
III. 분석 방법 및 자료	30
3.1. 배출권거래제 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출	30
3.2. 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성 변수별 배출권가격 영향 평가	31
IV. 분석 결과	34
4.1. 배출권거래제 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출	34
4.1.1. 누적 수집된 논문의 텍스트 분석	34
4.1.2. DTM 토픽 모델링 텍스트 분석	35
4.2. 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성 변수별 배출권가격 영향 평가	40
4.2.1. 기계학습 훈련 결과	40
4.2.2. 전이 학습(transfer learning) 결과	43
4.2.3. 특성 변수별 배출권가격 영향 평가	44
V. 결론	51
부록	52
참고문헌	54

표 목차

표 2.1. 기존 ETS 메커니즘 요약	27
표 2.2. 배출권거래 가격 예측에 관한 문헌 검토	28
표 3.1. 데이터 수집 변수 및 정보	32
표 3.2. 데이터 윈도우(window).....	33
표 4.1. DTM 분석 결과 요약	35
표 4.2. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 평균값	40
표 4.3. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 - EU 데이터	41
표 4.4. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 - 스위스 데이터	41
표 4.5. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 - 퀘벡 데이터.....	41
표 4.6. 상위 10개 주요 특성 결과 - EU 및 스위스 데이터	46
표 4.7. 상위 10개 주요 특성 결과 - 퀘벡 및 한국 데이터	46
표 4.8. 누적 주차와 다른 특성들 간의 상호작용 분석 결과	47

그림 목차

그림 1.1. 1990년부터 2019년까지의 전 세계 순 온실가스(GHG) 배출량 (IPCC, 2022)	12
그림 1.2. a) 탄소세와 배출권 거래제(emissions trading scheme, ETS) 시행 현황(ICAP, 2023). b) ETS 시행 현황 세부 내용(ICAP, 2024)	13
그림 1.3. 탄소 시장의 세 가지 리스크 분류	14
그림 2.1. ETS 설명	16
그림 3.1. 세부과업 및 연구 방법 설명	30
그림 3.2. 기계학습 실행 흐름	33
그림 3.3. 데이터 분할	33
그림 4.1. 텍스트 분석 결과: a) 누적 결과 및 b) “policy” 및 “market” 키워드를 필터링한 결과	34
그림 4.2. 토픽 1에 대한 DTM 분석 결과	36
그림 4.3. 토픽 2에 대한 DTM 분석 결과	37
그림 4.4. 토픽 3에 대한 DTM 분석 결과	38
그림 4.4. 토픽 3에 대한 DTM 분석 결과	39
그림 4.5. 실제 ETS 가격과 예측된 ETS 가격의 비교 그래프: a) EU, b) 스위스 및 c) 퀘벡 데이터	42
그림 4.6. 한국 사례에서 전이 학습(transfer learning) 방법을 활용한 ETS 가격의 실제 값과 예측 값 비교 분석	43
그림 4.7. EU 데이터의 특성 중요도 결과	44
그림 4.8. 스위스 데이터의 특성 중요도 결과	44
그림 4.9. 퀘벡 데이터의 특성 중요도 결과	45
그림 4.10. 한국 데이터의 특성 중요도 결과	45
그림 4.11. 각 국가의 배출 할당량 상한: a) EU, b) 스위스, c) 퀘벡 및 d) 한국	47
그림 4.12. 각 국가의 ETS 가격 및 글로벌 석탄 가격	48
그림 4.13. 각 국가의 1인당 GDP 데이터: a) EU, b) 스위스, c) 퀘벡 및 d) 한국	48

I. 서론

1.1 연구의 배경

온실가스(greenhouse gases, GHG) 배출량은 지속적으로 증가하고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 보고서(IPCC, 2022)에 따르면, 2019년 배출량은 1990년 대비 54%, 2010년 대비 12% 증가한 것으로 나타났다(그림 1.1). 탄소 배출을 줄이는 것은 여러 사회경제적 부문과 국가의 경제 발전에 직접적으로 연관되어 있기 때문에 매우 중요하다(He et al., 2019; Jung & Song, 2023; Wang & Zhang, 2020). 정책 결정자들은 경제 성장을 이루면서도 탄소 배출량을 줄이는 방식을 통해 지속 가능한 발전을 달성하려고 노력하고 있다. 최근 몇 년간 기후 변화에 대응하고 지속 가능한 완화 경로를 모색하는 것은 전 세계 기후 변화 담론의 중심 주제가 되었다(Uddin and Holtedahl, 2013).

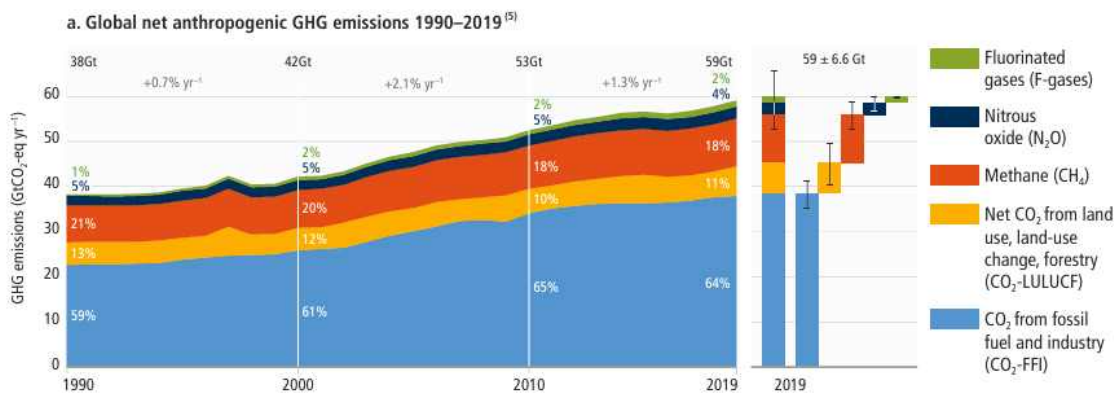


그림 1.1. 1990년부터 2019년까지의 전 세계 순 온실가스(GHG) 배출량(IPCC, 2022).

온실가스 감축 수단 중 하나는 1990년대에 등장한 탄소 시장이다. 이는 유엔기후변화협약(UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)의 “공동 이행(Joint Implementation)” 규정을 통해 여러 국가가 협력하여 GHG 배출을 줄이는 메커니즘을 마련한 데서 시작되었다(Michaelowa et al., 2019). 이 초기 시도는 유럽 및 북미 여러 국가에서 시장 기반 메커니즘을 개발하는 계기가 되었다. 이후 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol, KP)가 채택되어, 38개 선진국과 전환경제국에 대해 GHG 배출 감축 목표를 설정하였다. 연구자들은 1990년대 후반과 2000년대 초반에 KP 메커니즘에서 상당한 이점을 확인하였다.

탄소 시장 프레임워크는 크게 탄소세와 배출권 거래제(emissions trading scheme, ETS)로 구분된다. ETS는 GHG 배출을 줄이기 위한 시장 기반 도구이다. 이 제도에서 정부는 특정 부문에 대해 총 배출 할당량 상한(cap)를 설정하고 이에 따라 배출권을 발급한다. 해당 부문에 속한 기업은 배출량 1톤당 1개의 배출권을 보유해야 한다. 배출권은 정부로부터 무상으로 제공되거나 경매를 통해 구매할 수 있다. 반면, 탄소세는 배출량 1톤당 고정된 세율을 부과하여 기업이 해당 금액을 납부하도록 한다. 탄소세는 기존 세금 시스템을 활용하기 때문에 시행이 더 간단하지만, ETS는 상쇄 크레딧(offset credit), 이월 및 차입(banking and borrowing)과 같은 메커니즘을 통해 더 큰 유연성을 제공한다. 또한 ETS는 다른 시스템과의 국제적 연계를 통해 확장 가능성이 있는 반면, 탄소세는 그러한 연계가 어렵다. 현재 많은 국가에서 탄소세와 ETS를 모두 시행하고 있다(그림 1.2.a). ETS)는 36개가 시행 중이며, 14개가 개발 중이고, 8개 프로젝트가 검토 중이다(그림 1.2.b).



(a)



ETS 시행 현황	전체 지역*
시행 중 (in force)	36
개발 중 (under development)	14
고려 중 (under consideration)	8

* 국가 및 지역 ETS

(b)

그림 1.2. a) 탄소세와 배출권 거래제(emissions trading scheme, ETS) 시행 현황(ICAP, 2023). b) ETS 시행 현황 세부 내용(ICAP, 2024)

2005년에 시작된 EU ETS는 최초의 배출권 거래제로, 현재까지 운영되고 있다. 도입 이후 EU ETS는 심각한 시장 실패를 겪었으며, 여러 차례의 가격 변동으로 인해 기업들이 저탄소 기술을 채택하려는 인센티브에 영향을 미쳤다(Deng and Zhang, 2019). 이와 마찬가지로, 중국의 ETS는 비교적 초기 단계의 발전으로 인해 운영상의 위험과 감독 시스템의 부족과 같은 문제를 겪고 있다(Deng and Zhang, 2019). 따라서, ETS 시행 과정에서 발생할 수 있는 잠재적 위험을 조사하는 것이 중요하다. 탄소 시장의 이러한 리스크는 크게 세 가지 측면으로 분류할 수 있다(Deng & Zhang, 2019; 그림 1.3): 1) 시장 운영 리스크는 가격의 급격한 변동과 관련된 리스크를 의미하며, 이는 기업의 탄소 시장 참여에 영향을 미친다. 2) 정책 불확실성 리스크는 정책의 급격한 변동 가능성으로 인한 리스크를 의미하며, 시장 참여자에게 잠재적 손실을 초래할 수 있다. 3) 메커니즘 설계의 불확실성에는 상한 설정, 총 탄소배출허용량 할당, 법적 고려 사항 및 탄소 누출 가능성과 관련된 리스크가 포함된다.

탄소 시장 리스크와 관련하여 연구자들은 탄소 가격과 관련된 리스크를 평가하고 관리하는 것이 매우 중요하다고 평가한다(Deng & Zhang, 2019; Wang et al., 2022). 미래 탄소 가격 예측은 가격 변동성과 정책 기대의 불확실성으로 인한 운영 리스크와 같은 문제를 완화할 수 있다. 탄소 가격 예측 시 리스크 분석을 강화하기 위해 외부 영향 지표로 추가 변수를 고려할 수 있다. 여기에는 에너지 가격, 경제 상황, 환경 여건 및 정책 등의 요인이 포함된다(Cao et al., 2023). 특히, 에너지 가격에는 석탄 가격, 원유 가격, 가스 가격, 전기 가격 등 다양한 구성 요소가 포함된다. 경제 상황과 관련된 요소에는 환율, 주식 시장 가격 및 기타 관련 경제 지표가 포함된다. 환경 조건에는 대기질과 기온이, 정책과 관련된 불확실성을 설명하기 위해 경제 정책 불확실성 지수

(economic policy uncertainty index) 및 지정학적 리스크 지수(geopolitical risk index)와 같은 지표가 유용할 수 있다.

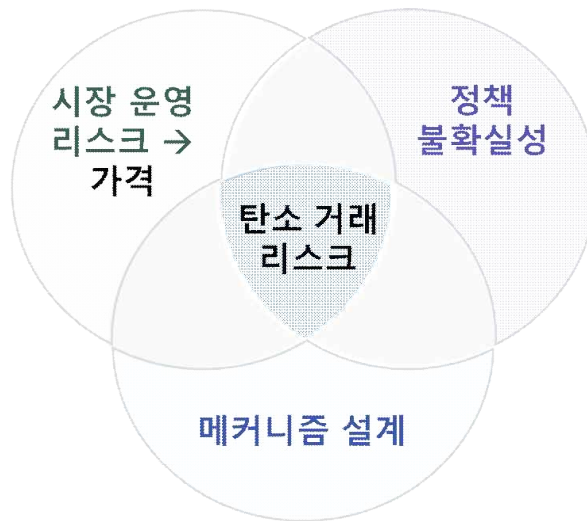


그림 1.3. 탄소 시장의 세 가지 리스크 분류.

탄소 가격의 시계열 예측 방법은 크게 기존 계량경제학(conventional econometric) 방법, 기계학습(machine learning) 및 인공지능(artificial intelligence) 방법, 혼합 모델(mixed model) 등 세 가지 유형으로 분류된다(Wang et al., 2022). 기존 계량경제학 모델은 선형 회귀(linear regression) 모델, 단순 이동 평균(simple average model) 모델, 통합 이동 평균(integrated moving average, ARIMA) 모델, Holt-Winters 방법, Kalman 필터 등이 포함된다. 이러한 모델은 적용이 간단하고 기술적으로 성숙되어 있지만, 학습의 자유도가 제한적이며 일반적으로 선형성과 안정성을 보여줄 수 있는 데이터가 필요하다. 또한, 혼합 모델은 유형의 모델은 다양한 접근 방식의 요소를 결합하여 개별 모델의 한계를 효과적으로 해결하고 높은 예측 정확도를 제공한다. 그러나 이러한 모델은 구조가 복잡하고 상당한 계산 요구 사항을 수반하는 경향이 있다. 기계학습 및 인공지능 방법은 결정 트리(decision tree, DT), 서포트 벡터 머신(support vector machine, SVM), 부스팅(boosting), 랜덤 포레스트(random forest, RF), 인공신경망(artificial neural network, ANN) 모델 등이 포함된다. 이러한 모델은 비선형 시계열을 예측하는 데 탁월하며 높은 예측 정확도와 견고성을 제공한다.

1.2. 연구의 목적

본 연구는 배출권거래제도 이행 초기 제고 및 시장의 리스크 규명 및 해소 목표로 한다. 연구 목적을 달성하기 위해 두 가지 세부 과업을 수행한다.

- (1) 배출권거래제 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출
- (2) 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성변수별 배출권가격 영향 평가

연구의 필요성 및 기대효과는 다음과 같다: 1) 배출권거래제 시장 초기, 참여자들의 거래에 장애가 되는 가격 불확실성 해소를 위한 배출권가격 예측 및 가격 영향요인 규명이 필요하다. 일반적으로 탄소 배출권의 가격은 내부 시장 메커니즘뿐 아니라 외부 영향에 의해 결정되기 때문에 배출권 거래제의 배출량 감축 효과는 탄소 가격의 변동에 영향을 받기(Ji et al., 2021; Zhang et al., 2023) 때문에 더욱 탄소 가격 변동을 설명하는 모형을 구축하는 것이 중요하다. 2) 배출권 거래제

운영 초기 제도의 정착 이전에 다수의 제도에서 정부 및 참여 기업들의 시행착오로 인한 혼란을 경험했으며 배출권거래제 초기 제도의 빠른 정착과 안정화를 위한 기존 주요국가의 배출권거래제도 운영을 통한 시사점 획득함으로써 이러한 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

1.3. 연구 구성

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 ETS에 대한 일반적인 설명 및 ETS 가격에 대한 문헌을 검토하며, 기준 ETS 사례를 포함한다. 3장에서는 분석 방법 및 자료수집을 소개한다. 4장에서는 결과 대해 논의한다. 또한 연구의 시사점 및 한계를 살펴본다. 3장 및 4장 내용은 각 세부 과제로 구성하는 것으로 분리한다. 5장 본 연구의 결론 내용이다.

II. 문헌 검토

2.1. ETS에 대한 일반적인 설명

배출권 거래제(emissions trading system, ETS) 중 총량제한거래제(cap-and-trade)는 총 온실가스 배출량에 할당량 상한(cap)에 해당하는 배출 가능 허용총량을 설정하고, 각 참여기업에 배출량을 할당한다(World Bank, n.d.; 그림 3.1). 따라서 ETS는 환경적 결과에 대한 확실성을 제공하는 양적 정책이며, 탄소의 가격은 시장에 맞기게 된다. ETS의 주요 구성 요소에는 배출 할당량 상한과 참여 기관의 범위가 포함된다. 이 맥락에서 할당량 상한선을 초과한 기관은 초과 배출을 하게 되며, 반면 할당량 상한선 이하로 배출을 줄이거나 유지할 수 있는 기관은 사용하지 않은 할당량을 보유하게 된다. 또한 이러한 두 기관 간에는 거래가 가능하며, 할당량 상한선을 초과한 기관은 사용하지 않은 할당량을 가진 기관으로부터 할당량을 구매할 수 있다. 그뿐만 아니라 할당량 상한선을 초과한 기관은 ETS 범위 밖의 배출 감축 프로젝트(예: 재생 에너지 프로젝트)로부터 상쇄 크레딧을 구매할 수 있는 선택권도 가진다. 기관에 할당량을 배분하는 세 가지 방법이 있다: 과거 배출량에 의존하는 grandfathering(GF) 방식, 산업 또는 부문의 배출계수 기준에 따른 벤치마킹(BM), 그리고 기관이 추정 요구량에 따라 할당량을 구매할 수 있는 경매 방식이 있다. Grandfathering 할당과 벤치마킹 할당 방식은 모두 무상 할당(free allocation) 방법으로 간주된다. 가격을 결정할 때, 에너지 가격(가스, 석탄, 석유 및 전기), 재생 에너지 공급, 그리고 배출권 बैं킹 능력과 같은 경제 활동 및 성장은 배출권 가격에 긍정적인 영향을 미치는 것이다.

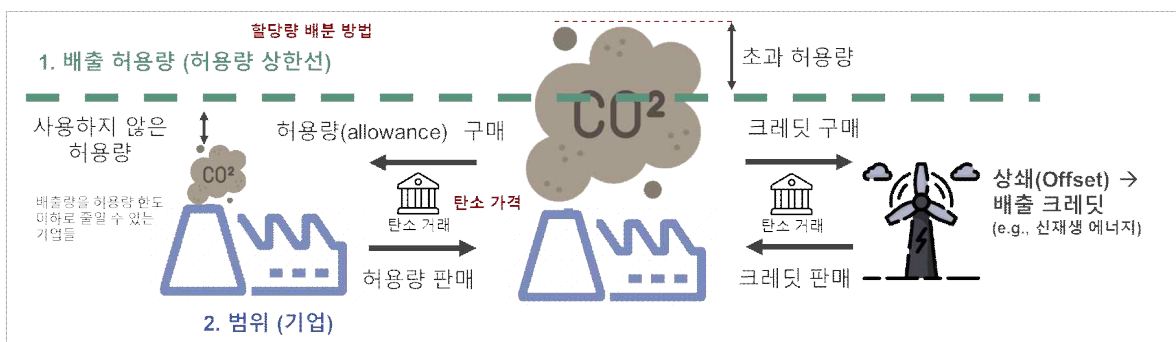


그림 2.1. ETS 설명.

2.1.1. 기존 ETS 요약

- EU(유럽연합)의 ETS(EU Climate Action (n.d), Zhao et al., 2018)

2005년에 설립된 EU ETS는 세계 최초의 국제 배출권 거래 시스템으로 자리 잡고 있다. 현재 2021년부터 2030년에 걸쳐 4단계 내에서 운영되고 있다. 1997년 교토의정서는 37개 선진국에 법적 구속력이 있는 배출권 감축 목표, 일명 상한선을 도입하여 중요한 이정표를 세웠다. 결과적으로 이러한 목표를 달성하기 위한 정책 도구의 필요성이 대두되었다. 2000년 3월, 유럽연합 집행위원회는 EU ETS의 구조에 대한 초기 개념을 설명하는 Green paper를 발표했다. 이 문서는 시스템 구축에 중요한 역할을 한 다양한 이해 관계자들과의 일련의 협의를 위한 기반을 마련했다. 이후 2003년에 EU ETS 지침이 비준되었고, 2005년에 시스템이 공식적으로 출범했다. 할당량 배분은 국가 할당 계획(national allocation plans; NAPs)의 시행을 통해 국가 차원에서 결정되었다.

EU ETS는 배출 목표를 달성하기 위해 세 단계를 설정했다. 1단계(2005-2007): 교토의정서

(Kyoto Protocol; KP)에 따른 EU 공약 목표의 45% 달성. 2단계(2008-2012): 각 EU 회원국은 2005년 수준을 기준으로 평균 6.5%의 배출량을 감축한다. 2단계의 총 목표는 KP의 1차 공약 기간(2008-2012)의 목표와 일치하며, 2012년까지 15개 유럽 국가의 총 배출량은 1990년 배출 수준 대비 8% 감소할 것이다. 3단계(2012-2020): 유럽의 “20/20/20” 목표에 따라 2020년까지 유럽의 온실가스 배출량을 1990년 수준 대비 20% 감축할 예정이다. 2014년 유럽 이사회는 2030년까지 온실가스 배출량을 1990년 수준 대비 최소 40% 감축하는 더 엄격한 배출 감축 목표를 승인했다.

- EU: 1단계(2005-2007)

1단계는 KP에 따른 EU 공약 목표(Kyoto target: 이하 교토 목표) 달성을 위해 EU ETS가 효과적으로 운영되어야 하는 2단계를 대비하기 위한, 3년간의 'learning by doing' 시험 단계였다. 1단계는 전력 생산업체와 에너지 집약적인 산업에서 발생하는 이산화탄소 배출에만 초점을 맞추었으며, 대부분의 배출권이 기업에 무료로 배분되었다. 이를 지키지 않을 경우의 벌금은 톤당 40 유로로 책정되었다.

유럽 연합 위원회의 지침에 따라, 2004년에 EU에 가입한 10개국은 2004년 3월 31일 또는 2004년 5월 1일까지 국가 할당 계획(이하 NAPs)을 발표해야 했다. 위원회는 2004년부터 2005년 사이에 NAPs에 대한 결정을 내렸다. 일부 계획은 위원회의 결정 이전에 수정되었고, 특정 국가들에게 수정 사항을 요청했다. 위원회가 가장 일반적으로 제기한 이의 사항은 국가의 교토 목표를 위협할 수 있는 과도한 할당량과 교토 목표 달성 진행도 사이의 불일치, 그리고 NAPs에 대한 '사후 조정' 계획이었다. 사후 조정은 할당 이후 시장 개입을 통해 할당권을 참여 기업들 사이에서 재분배하는 것을 의미한다.

1단계는 탄소 가격을 성공적으로 책정하고, EU 전역에서 배출권의 자유로운 거래를 용이하게 하였으며, 적용 대상 기업들의 배출을 모니터링, 보고 및 검증할 수 있는 필수적인 인프라를 개발한다. 신뢰할 수 있는 배출량 데이터가 부족했기 때문에, 1단계의 배출 한도는 추정치에 근거하여 설정되었으며, 실제 배출량보다 더 많은 배출량이 배출되었다. 이러한 공급 과잉으로 인해 1단계의 할당권을 2단계에서 사용할 수 없었고, 1단계의 할당량 가격이 2007년에는 0으로 떨어지게 되었다. 세계은행의 연례 탄소 시장 보고서에 따르면 1단계 동안의 배출권 거래량은 2005년에는 3.21억 개, 2006년에는 11억 개, 2007년에는 21억 개로 증가했다.

- EU: 2단계(2008 - 2012)

2단계는 KP의 초기 공약 기간과 일치하며, EU ETS에 참여하는 국가들은 배출 감축을 위한 구체적인 목표를 달성해야 했다. 1단계 계획을 개발하는 과정은 매우 많은 시간이 소요되었으며, 많은 계획들이 지나치게 복잡했다. 하지만 이 경험에서 배운 교훈들은 2단계를 위한 과정 개선에 중요한 역할을 했다. 위원회는 지침 문서에서 국가들이 초기 계획에서 확립된 행정 규칙을 검토하고 주요 정보를 요약하는 표준화된 표를 작성함으로써 계획을 단순화하고 투명성을 높이는 것이 중요하다고 강조했다.

2006년 6월 30일까지 각국은 NAPs를 발표해야 했다. 위원회는 2006년과 2007년 사이에 대부분의 NAPs에 대해 검토하고 결정을 내렸다. 그러나 폴란드와 에스토니아의 NAPs는 이전에 제안된 계획이 거부되었기 때문에 각각 2010년과 2011년까지 승인되지 않았다. EFTA 감시국은 또한 2007

년에 리히텐슈타인의 계획과 2009년에 노르웨이의 계획에 대해 결정을 내렸다. 한편 아이슬란드에는 EU ETS가 적용하는 제한된 수의 시설이 탈퇴하기로 결정하였기 때문에 NAPs가 없었다. 2단계 기간 동안, 제안된 배출 한도 중 많은 부분이 이후에 축소되었다. 또한 회원국들은 NAPs에 대한 위원회의 몇 가지 결정에 이의를 제기했다. 이러한 법적 불확실성을 방지하기 위해 3단계에서는 EU 전체에 한도를 적용하기로 결정하였다.

2단계에서는 EU ETS에 여러 가지 중요한 변화가 도입되었다. 첫째, 2005년 대비 약 6.5%의 할당량 상한액의 감소가 있었다. 또한 아이슬란드, 리히텐슈타인, 노르웨이 세 국가가 신규 가입했다. 더불어, 여러 국가에서 질산 생산의 아산화질소 배출이 포함되었다. 무료 할당의 비율은 소폭 감소하여 90% 내외로 안착했다. 몇몇 국가가 경매를 실시했으며, 위반에 대한 벌금은 톤당 €100로 인상되었다. 국제 크레딧의 경우, 기업들은 총 약 14억 톤의 CO₂에 해당하는 크레딧을 구매할 수 있도록 할당되었다. 국가 기재(National registry)를 노동조합 기재(The union registry)로 대체했으며, 공동체 독립 거래 기록부(CITL)를 유럽연합 거래 기록부(EUTL)로 대체했다. 또한, 항공 부문은 2012년 1월 1일에 EU ETS에 포함되었으나, 해당 연도 비유럽 국가를 오가는 항공편에 대한 적용은 보류되었다. 시범 단계에서 확인된 연간 배출량 데이터의 가용성을 통해 실제 배출량을 기준으로 2단계에서는 할당량의 한도를 줄일 수 있었다. 그러나 2008년 경제 위기로 인해 예상보다 큰 배출량의 감소가 발생했다. 그 결과, 상당한 배출권과 크레딧의 과잉이 발생하여 2단계 전반에 걸쳐 탄소 가격에 상당한 하향 압력을 가했다.

거래량은 2008년 31억개에서 2009년 63억개로 눈에 띄게 증가했다. 2012년에는 총 79억개의 배출권이 거래되어 €560억의 가치를 기록했다. EU ETS는 2단계 동안 국제 탄소 시장의 주요 동력으로서의 위치를 유지했다. 예를 들어, 2010년 EU 할당권은 전 세계 탄소 시장 가치의 84%를 차지했다.

- EU: 3단계(2013 - 2020)

EU ETS의 3단계(2013-2020) 개정은 1단계와 2단계와 비교해 상당한 변화를 가져왔다. 주요 변경 사항은 이전의 국가별 탄소 배출 제한 시스템을 대체하기 위해 EU 전체에 걸쳐 통합된 배출량 한도를 시행하는 것이다. 배출권 배분을 위한 기본 접근 방식으로서 경매 방식의 도입(무료 할당 대신), 여전히 무료로 배분되는 배출권을 위한 표준화된 할당 규정의 시행, 더 많은 부문과 가스의 포함, 그리고 NER 300 발의를 통해, 혁신적인 재생 가능 에너지 기술과 탄소 포집 및 저장의 발전을 지원할 목표로 NER에 3억 개의 배출권 할당하는 것 등이 있다. 3단계 EU ETS의 범위는 화학, 합성 암모니아, 비철금속 용융 및 알루미늄 부문으로 확대되었다. 전해 알루미늄에서 발생하는 PFC와 화학, 암모니아, 알루미늄, 질산, 아디프산 및 글리옥실산에서 발생하는 N₂O가 포함되었다.

- 중국의 ETS(Deng & Zhang, 2019; Wang et al., 2022)

2013년 중국은 심천, 베이징, 텐진, 상하이, 충칭, 광둥, 후베이의 7개 지역에 탄소 배출권 거래 시범 사업을 시작했다. 이들 시범 ETS는 범위, 할당 한도, 할당 메커니즘, 상쇄, 모니터링 및 보고, MRV(모니터링, 보고, 검증), 규정 준수 메커니즘, 탄소 시장 등을 포함하는 사업 뼈대를 공통적으로 공유한다. 각 지역의 경제 조건, 에너지원, 산업 발전 계획, 기술 역량의 차이로 인해 각 시범 ETS는 고유한 특징을 갖고 있다. 지리적으로 7개 시범 ETS는 중국의 동부, 중부, 서부 지역에 위치해 있다. 이들 지역은 두 가지의 행정 수준(성 및 도시)이 있어 경제력과 배출 수준에서 차이가

나며, 시범 ETS 전반에 걸쳐 할당 한도에 상당한 차이가 발생한다. 후베이와 광둥은 ‘성’ 단위, 심천, 베이징, 톈진, 상하이, 충칭은 ‘도시’ 단위이다.

▪ 후베이 ETS

후베이성은 현재 빠른 산업화 시기를 겪고 있으며, 산업 부문이 주요 배출원이다. 대규모 기업의 막대한 배출량과 이 부문에서의 CO₂ 배출량 집중을 효과적으로 다루기 위해, 후베이 시범 ETS는 연간 60,000톤 이상의 CO₂를 배출하는 기업들을 포함하도록 설계되었다. 후베이 시범 ETS의 총 할당량은 324백만톤 CO₂이다. 후베이 시범 ETS의 주요 할당 분배 방법은 grandfathering과 벤치마킹 방식이다. 배경 원칙은 기업의 과거 배출량을 기반으로 배출 할당량을 할당하며, 벤치마크는 출력당 CO₂ 배출량의 기준을 기준선을 설정한다. 전력 부문에서는 두 원칙이 각각 다른 유형의 발전기에 적용된다.

▪ 광둥 ETS

광둥성은 중국 본토의 최남단에 위치하며, 179,700 평방킬로미터의 넓은 지역을 차지하고 있다. 현재 광둥성은 산업화의 중급에서 고급 단계에 있으며, GDP 7조 2,800억 위안으로 중국에서 가장 부유한 성이다. 2015년 광둥성의 최종 에너지 소비량은 2억 5,662만 톤 표준석탄(tce)이었다. 2011년부터 2014년까지의 연간 CO₂ 배출량이 10,000톤 이상이거나 종합 에너지 소비량이 5,000 tce 이상인 기업은 “reporting firm(보고 기업)”으로 분류된다. 이들 보고 기업은 CO₂ 배출량이 ETS의 적용을 받지 않으나, 연간 배출량을 정부에 보고해야 한다. 또한 2011년부터 2014년까지의 연간 CO₂ 배출량이 20,000톤 이상이거나 종합 에너지 소비량이 10,000 tce 이상인 기업은 “covered Company(이하 포함 기업)”으로 분류되며, ETS에 의해 관리된다. 이 범주에는 전력, 시멘트, 철강, 세라믹, 석유화학, 섬유, 플라스틱, 종이 등의 산업이 포함된다. 광둥 ETS의 할당량 분배는 주로 grandfathering과 벤치마킹 방식을 통해 수행된다. 벤치마크 방식에 따라 포함 기업은 생산과 벤치마크 단위 배출 기준을 기반으로 사전 할당량을 받는다. 이 방법은 생산 변동을 고려할 수 있도록 조정 창을 제공하며, 변동이 발생할 경우 정부는 할당량 차이를 보상하거나 과다 발급된 할당량을 회수한다.

▪ 베이징 ETS

베이징 ETS 운영 기간 동안 두 가지 유형의 기업이 존재했다: 포함 기업과 보고 기업. 포함 기업은 연간 CO₂ 배출량(화석연료 직간접 모두)이 10,000톤 이상인 주요 배출원으로, ETS 규정에 따라 CO₂ 배출 통제 조치를 준수해야 한다. 반면 보고 기업은 연간 종합 에너지 소비량이 표준 석탄에 해당하는 2,000톤 이상으로, 자발적으로 ETS 규제를 선택할 수 있으나, ETS 시험 기간 동안 연간 배출 보고서를 정부에 제출해야 한다.

베이징 ETS는 기존 기업에 대해 grandfathering 방식을 적용하고, 신규 진입 기업에 대해서는 단위 생산당 CO₂ 배출 최저치를 기준으로 한 벤치마크 방식을 적용했다. 기존 기업이 할당량을 수정하고자 할 경우, 제3자 기관의 실험실 검증을 거쳐 배출량이 승인되어야 한다. 정부는 실험실 보고서를 고려하여 할당량 조정 여부를 결정한다. 또한 베이징 ETS의 할당량 공식에는 산업별 연간 할당량 감소 계수가 포함되며, 이는 94%에서 100%까지 다양하다.

▪ 텐진 ETS

텐진 ETS는 철강, 화학, 전력 및 열, 석유화학, 석유 및 가스 회수 등 5개 주요 산업 부문과 연간 배출량이 20,000 tCO₂를 초과하는 민간 건설 회사를 포함한다. 총 114개의 기업이 텐진 ETS의 관할하에 있으며, 이는 텐진 전체 배출량의 50%~60%를 차지한다. 텐진 ETS의 CO₂ 배출 할당량은 grandfathering과 벤치마킹 방식을 기반으로 할당되며, 산업의 배출 감소 잠재력, 경쟁력 영향, 에너지 효율성, 이전 감소 노력, 산업 기준 배출량 등을 고려한다.

▪ 심천 ETS

심천 시의 주요 CO₂ 배출원은 산업, 건설 및 운송 부문이다. 이러한 배출을 규제하기 위해, 심천 ETS는 635개의 산업 기업과 194개의 공공 건물을 포함한다. 이들 기관은 2010년에 총 31.73 MtCO₂e를 배출했으며, 이는 심천 전체 배출량의 38%를 차지한다. 심천 ETS에 포함되기 위한 선택 기준은 다음과 같다: (1) 연간 배출량이 5,000 tCO₂e를 초과하는 상업 회사 및 공공 기관, (2) 연면적이 20,000 m²를 초과하는 대형 공공 건물 또는 연면적이 10,000 m²를 초과하는 관공서 건물, (3) 자발적으로 ETS에 참여하기로 선택한 기타 회사, 공공 기관 또는 건물.

심천 ETS는 할당 방법론 측면에서 벤치마킹 원칙에 따라 할당량을 분배한다. 단일 제품 부문에서는 대상 기업의 탄소 집약도 배출 감소량 및 예상 생산량에 대한 예측을 기반으로 사전 할당 방법을 사용한다. 반면 여러 제품이 있는 부문의 경우 예상 생산량 대신 산업 부가가치가 사용된다. 심천은 반복 게임 이론에 기반한 제한된 합리성 이론을 바탕으로 각 기업의 탄소 집약도 목표를 설정하는 할당량 분배 메커니즘을 제안한다.

▪ 상하이 ETS

상하이 ETS는 철강, 석유화학, 화학, 비철금속, 전력, 건축 자재, 섬유, 종이, 고무 및 화학 섬유와 같은 산업 부문뿐만 아니라 항공, 항구, 공항, 상업, 호텔 및 금융과 같은 비산업 부문에서도 CO₂ 배출을 규제했다. 대상 기업은 2010년 또는 2011년에 연간 총 CO₂ 배출량이 10,000톤 이상인 주요 배출원이었다. 전체 시범 단계의 할당량 한도는 약 1억 6천만 톤 CO₂로 설정되었다. 모든 할당량은 2013년에 한 차례 배분되었으며, 할당량은 할당 연도에 따라 SHEA13, SHEA14 및 SHEA15로 표시되었다.

상하이 ETS는 전력, 공항, 항공 및 항만 산업을 규제하기 위해 벤치마크 방식을 사용했으며, 나머지 부문은 배경 원칙을 따랐다. 상하이 ETS의 대부분의 할당량은 무상으로 분배되었으나, 기업의 준수 촉진이나 시장의 비정상적 상황을 해결하기 위해 정부가 경매를 통해 일부 할당량을 할당했다.

▪ 충칭 ETS

중국 중서부의 유명한 중공업 도시인 충칭은 초석으로 제조업에 크게 의존하고 있다. 그러나 이 산업은 1990년대부터 도시의 주요 CO₂ 배출원이기도 했다. 통계 자료에 따르면 충칭의 전체 온실가스 배출량의 약 70%가 제조업체에 기인한다. 충칭 ETS는 2008년부터 2012년 사이에 연간 GHG(온실가스) 배출량이 20,000 tCO₂e를 초과하는 산업 기업을 포함한다. 이 기업들은 주로 전력, 금속, 화학 및 건축 자재 부문에서 운영된다. 충칭은 6가지 유형의 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs,

PFCs, SF₆)가 규제 대상이며, 6가지 유형의 온실가스를 포함하는 유일한 시범 ETS이다.

충칭 ETS는 다목적 결정 원칙을 기반으로 한 할당량 할당 방법을 구현하며, 최저 비용, 환경 시너지 효과 극대화, 생산성 안정성 및 할당 공정성 등의 요소를 고려한다. 모든 할당량은 무상으로 배분되었다. 또한 충칭 ETS는 연간 거래 가능한 할당량에 대한 제한을 두어, 적용 대상 기업이 연간 무료 할당량의 50% 이상을 판매하지 못하도록 하고 있다.

○ 한국의 ETS(기획재정부-환경부, 2017; 2019)

▪ 한국: 1차(2015년~2017년)

배출권총수량 설정 방식의 변화가 있다. 제도 안착을 위해 「2020 온실가스 감축 로드맵」 상의 연도별 감축률보다 감축부담을 완화(로드맵 직접배출 감축률의 90% 수준, 간접배출 감축률의 20% 수준)하여 배출 할당 총량을 설정(1,673백만톤)하였다. 「2030 온실가스 감축 로드맵(16.12)」을 고려하여 '17년 배출할당총량 재산정되었으며(1,673->1,691백만톤), 배출 전망치의 77% 수준인 1,691백만톤이 할당되었다. '17년말까지 배출량은 1,669백만톤 수준이었다. 벤치마킹 할당 대상 업종은 일부 시설(정유, 시멘트, 국내 민간항공)에만 적용되었으며, 배출권 거래량과 가격이 점진적으로 증가, 배출권 거래를 규제로 인식하여 거래 시장의 안정을 위해 제한 조치가 취해졌다.

▪ 한국: 2차(2018년~2020년)

2030 온실가스 감축 로드맵(18.7)」의 연도별 목표배출량에 따라 배출 할당 총량 설정하였다. 배출 전망치의 76% 수준인 배출 할당 총량(1,777백만톤) 중 1,643백만톤을 사전 할당하였다. 벤치마킹 방식 적용 업종 확대하여 총 7개 업종(기존 + 발전, 집단에너지, 산업단지, 폐기물)에 대해 할당하였다. 원칙적으로 6개 부문(전환, 산업, 건물, 수송, 폐기물, 공공기타)으로 구분하여 할당, 신·증설되는 시설은 사전 할당 대신 가동개시 이후 추가 할당하였다. 배출권 거래량이 증가하였으며, 장내 및 장외 거래가 있었음. 배출권 가격은 점진적으로 상승하였고, 배출권 잉여업체의 보유량을 해소하기 위해 이월 가능량이 제한되었다.

▪ 한국: 3차(2021년~)

2030 온실가스 감축 로드맵의 연도별 목표배출량에 따라 배출 할당 총량 설정하고, 업체별 배출 특성 및 국내 산업구조 등을 고려하여 할당량 배분단위를 개편한다.

○ 스위스의 ETS(EDF, 2013; ICAP, 2024; Vöhringer, 2012)

스위스 환경 정책의 기초는 1985년 환경보호법(Protection of the Environment Act, PE Act) 제정으로 마련되었으며, 이후 1995년과 2003년에 개정되었다. 1999년에는 이산화탄소 배출 감축에 초점을 맞춘 보완 정책으로 CO₂ 배출 감축법(CO₂ Act)을 채택했다. 이러한 법안들은 2008-2012년 기간 동안 1990년 대비 8%의 온실가스 감축 목표를 달성하기 위한 교토의정서 약속을 이행하는데 기여하도록 설계되었다. PE법은 폐기물 처리(CH₄), 합성 가스(HFC, PFC, SF₆), GHG 전구체 등 CO₂ 이외의 온실가스 감축 조치를 명시하였다. CO₂법은 스위스 온실가스 배출량의 80%를 포괄하며, 2011년 12월 개정된 CO₂법은 2020년까지 1990년 대비 20% 감축(52.5 MtCO₂)을 목표로 설정했다. 2009년 기준, 스위스의 배출량은 약 51.95 MtCO₂e로 집계되었다. 개정된 CO₂법은 2013년 1월 1일부터 발효되었다. 스위스는 2008년 1월 1일에 ETS를 도입했으며, 이는 난방, 산업 공정 및 운

송 연료에 적용되는 국가 CO₂ 부담금을 대체할 수 있는 준수 메커니즘으로 설계되었다.

- 스위스: 1차(2008년~2012년)

2008-2012년 기간 동안 CO₂ 부담금 적용 대상 기업들은 두 가지 선택권을 가졌다: 1. CO₂ 부담금(levy)을 납부하거나, 2) 검증된 절대 배출 목표를 자발적으로 설정하고 해당 배출 할당량을 할당받아 스위스 ETS에 참여하여 CO₂ 부담금을 면제받는 방법이다. 2008년과 2009년에는 CO₂ 부담금이 CHF 12/tCO₂였으며, 2010년부터는 CHF 36/tCO₂로 인상되었다.

CO₂ 부담금과 자발적 ETS는 1999년 CO₂법의 목표, 즉 2010년까지 1990년 대비 CO₂ 배출량을 10% 감축하는 목표를 지원하기 위해 설계되었다. CO₂법은 2008-2012년 기간 동안 1990년 대비 총 온실가스 배출량을 8% 감축하겠다는 스위스의 교토의정서 약속을 달성하기 위한 주요 도구로 작용했다. 또한, 첫 번째 이행 기간(2008-2012년) 동안 배출 할당량의 이월과 차입이 허용되었다.

- 스위스: 2차(2013년~2020년)

2013-2020년 기간 동안, 스위스는 1990년 대비 2020년까지 온실가스 배출량을 20% 감축하는 것을 목표로 했다. 이 목표는 1990년 배출량인 52.7 MtCO₂e에서 약 10.5 MtCO₂e를 절대적으로 감축하는 것을 의미한다. 추정치에 따르면 CO₂법을 통해 연간 8.5 MtCO₂e의 감축이 가능하며, 이 중 ETS는 연간 0.8 MtCO₂e, CO₂ 부담금은 연간 2 MtCO₂e의 감축 효과를 차지하는 것으로 나타났다. 연방평의회(Federal Council)는 국제 협정이 체결될 경우 이 20% 감축 목표를 최대 30%까지 상향할 가능성을 열어 두었다.

2011년 12월, 스위스 ETS에 대한 개정은 EU ETS와의 정합성을 높여 스위스와 EU 산업 간 유사한 시장 조건을 조성하고, 두 시스템을 연결할 가능성을 강화했다. 스위스 ETS는 2020년 1월부터 공식적으로 EU ETS와 연결되었으며, 스위스 시스템에 포함된 기업들은 EU ETS와 동일한 벤치마크가 적용된다.

- 스위스: 3차(2021년~2030년)

2022년 기준, 스위스 ETS는 EU ETS와 동일한 할당 기준을 적용하고 있다. 무상 할당 수준은 생산량이 2014-2018년 기준 연도 대비 최소 15% 이상 변동될 경우 매년 조정될 수 있다. 스위스 ETS에 포함된 기업들은 EU ETS의 배출권을 준수 목적으로 사용할 수 있으며, 반대로 EU ETS 기업들도 스위스 ETS의 배출권을 사용할 수 있다. 그러나 두 시스템은 별도의 경매를 통해 운영된다.

- 퀘벡의 ETS(EDF, 2015, Hanoteau and Talbot, 2019, ICAP, 2024)

퀘벡주는 북미에서 가장 낮은 탄소 발자국을 가진 지역 중 하나로, 이는 주로 재생 가능 에너지, 특히 수력 발전과 풍력 발전에 대한 초기 투자 덕분이다. 퀘벡은 캐나다 전체 배출량의 11.4%를 차지하며, 온실가스 감축 전략을 가장 배출량이 많은 부문에 집중해왔습니다. 2011년 기준, 운송 부문은 전체 온실가스 배출량의 44.7%를 차지했으며, 산업 부문은 31.6%를 차지했다.

2006년, 퀘벡은 기후 변화 행동 계획(Climate Change Action Plan, CCAP)을 도입하여 2006-

2012년 기간을 포괄하는 정책을 시행했다. 2008년 4월, 퀘벡은 캐나다와 미국의 일부 지역(브리티시 컬럼비아, 매니토바, 온타리오, 퀘벡, 캘리포니아)으로 구성된 서부 기후 이니셔티브(Western Climate Initiative, WCI)에 가입해 지역 GHG 배출량 감축을 위한 협력을 시작했습니다.

2012년 12월, 퀘벡은 2014년 다른 시스템과의 연계를 준비하기 위해 배출거래제 프로그램 규칙을 개정했다. 퀘벡의 ETS는 2013년 1월 1일에 첫 번째 이행 기간을 공식적으로 시작했다. 2013년 9월, 퀘벡은 캘리포니아 항공자원위원회(Air Resources Board, ARB)와 시스템 연계를 위한 협정을 체결했다. 2014년 1월 1일, 퀘벡은 공식적으로 캘리포니아의 ETS와 시스템을 연계했다. 이 공동 프로그램은 북미에서 가장 큰 탄소 시장을 형성했으며, 서로 다른 국가의 지역 간 협력을 기반으로 운영되는 최초의 ETS로 평가받고 있다.

- 퀘벡: 1차(2013년~2014년)

첫 번째 이행 기간의 초기 배출 할당량 상한은 연간 23.20 MtCO₂e로 설정되었다. 2013년, 퀘벡의 배출량은 82.6 MtCO₂e로, 캐나다 총 배출량의 11.3%를 차지했다. 2014년 말까지 퀘벡의 ETS 프로그램은 산업 부문의 72개 시설과 에너지 생산자 및 수입업자를 포함했다. 수입업자는 획득한 전기에 귀속되는 배출량이 배출 임계값을 초과하거나, 해당 전기가 퀘벡이 배출권 거래 시스템을 통합하기로 합의한 협력 관할권 내에서 생산되지 않은 경우도 포함되었다.

첫 번째 단계부터 세 번째 단계까지, 무상 할당량은 다음 기준에 따라 결정되었다. 최근 생산량 또는 원자재 소비량(부문별 기준 단위에 따라 다름), 과거 평균과 배출 유형을 기준으로 한 감소하는 강도(intensity) 목표, 그리고 지원 계수(assistance factor)를 종합적으로 고려하였다. 2020년까지 모든 배출 집약적이고 무역에 민감한(emissions-intensive and trade-exposed, EITE) 부문의 지원 계수는 100%로 설정되었다. 배출권 경매는 첫 번째 단계부터 허용되었다.

- 퀘벡: 2차(2015년~2017년)

2015년, 프로그램의 적용 범위 확장을 수용하기 위해 배출 상한이 65.30백만 tCO₂e로 증가했다. 2015년 이후, 퀘벡이 2020년 GHG 배출 감축 목표를 달성할 수 있도록 배출 상한은 매년 평균 약 4%의 비율로 감소하도록 설정되었다. 프로그램의 적용 범위는 연료 소비, 특히 운송, 건물, 소규모 사업 부문을 포함하도록 확대되었다. 또한, 천연가스 배급자 및 공급업체도 프로그램의 확대된 적용 범위에 포함되었다.

- 퀘벡: 3차(2018년~2020년)

배출 할당량 상한은 59.0 MtCO₂e로 시작하여 연평균 약 3.5%의 비율로 감소하여 2020년에는 54.7 MtCO₂e에 도달했다. 새로운 상한을 준수하기 위해 배출자들은 GHG 배출량을 줄이거나 이를 보상해야 한다. 보상 옵션에는 1. 배출권 구매: 경매를 통해 또는 장관과의 상호 합의를 통해 배출권을 구매, 2) 조기 감축 크레딧 사용: 2008년부터 2011년 사이에 이루어진 조기 감축을 통해 획득한 크레딧 사용, 3) 상쇄 크레딧 사용: 규제 대상이 아닌 부문의 GHG 감축 프로젝트를 통해 획득한 상쇄 크레딧 사용 것으로 포함된다.

- 퀘벡: 4차(2018년~2020년)

2021년, 다양한 온실가스의 지구온난화잠재력(global warming potential) 조정으로 인해 배출 할당 상한이 55.3 MtCO₂e로 소폭 명목상 증가한 후, 상한은 2030년까지 연평균 약 2.2%씩 감소할 예정이다. 이 감소는 2030년까지 44.1 MtCO₂e의 상한으로 이어질 것이다. 네 번째 단계에서는 지원 계수(assistance factors)가 무역 노출도와 배출 강도를 기준으로 결정되었다. 이 기준은 산업 부문의 탄소 누출 위험을 세 가지 수준으로: 낮음(low): 지원 계수 90%, 중간(medium): 지원 계수 95%, 높음(high): 지원 계수 100%으로 분류했다.

2.1.2. 기존 ETS로부터의 교훈

○ EU의 ETS(De Perthuis & Trotignon, 2014; Hintermann et al., 2016; Vollebergh & Brink, 2020)

1단계(2005-2007)의 '학습을 통한 경험 쌓기' 시범 단계 이후, EU의 상한선 설정의 핵심 단계는 국가 할당 계획에서 3단계(2013-2020)에서 매년 약 3,800만 개의 허용 한도가 감소하도록 EU 법률이 보장하는 공동의 전반적인 접근 방식으로 점진적으로 변경된 것이다. 시간이 지남에 따라 상한선과 그 발전 수준을 설정하는 것은 단연코 배출권 거래 정책의 가장 중요한 요소이다. 또한, 탄소 시장도 2008년 위기 당시 예상치 못한 산업 활동의 감소로 인해 영향을 받았다.

매우 중요한 진전은 2단계 이후부터 시작되는 배출권 가치의 고정된 기간을 유연한 기간으로 변경한 것이다. 결과적으로 기업은 다음 거래 기간 동안 사용할 수 있도록 배출권 할당량을 예치할 수 있었다. बैं킹은 미래의 예상 배출량에 맞추어 거래할 수 있는 가능성을 제공하고 기업은 전체 계획 기간에 걸쳐 개별적으로 규정 준수를 최적화할 수 있기 때문에 시장의 유동성을 크게 증가시킨다. 기업들은 저축된 배출권에서 차입할 수 있지만, 그 다음 단계에서 차입하는 것은 허용되지 않는다. 단계 간 बैं킹의 부재는 가격 기본 요인의 변동이 거래 단계 종료 시점에서 배출권 가격의 강한 변동으로 이어진다.

EU ETS는 EU 내에서 화석 연료 사용으로 인한 탄소 가격을 결정하는 중요한 교차 도구이다. 탄소 가격 '기본'은 전력 부문과 에너지 집약적 산업 내의 대부분의 배출량을 포괄한다. 실제로 이 아이디어는 원래 EU ETS를 총 정격 열 입력이 20MW를 초과하는 설비와 같은 대규모 연소 설비로만 제한하는 것이었다. 부문별 적용 범위에 대한 교훈은 대규모 설비에 초점을 맞추는 선택이 전반적인 복지 관점에서 볼 때 매우 의미가 있다는 것이다.

EU ETS의 상한선은 시간이 지남에 따라 EU 내에서 탄소 예산을 확정함에 따라 장기적으로 탄소 배출량 감소를 보장한다. 실제로 지난 10년 동안 EU 내 탄소 배출량의 전반적인 추세는 감소하고 있다. EU ETS가 이러한 하향 추세에 어느 정도 기여했는지는 아직 불분명하다. 재생 에너지 기술의 배치 증가가 이 분야의 배출량 감소의 주요 원동력이었을 가능성이 크다. 그러나 EU ETS는 탄소 집약적 생산의 비용을 높이고, 단기적으로는 석탄에서 천연 가스로의 연료 전환 및 탄소 집약적 프로젝트에 대한 투자 수익의 장기적인 기대치 변화에 기여했을 수 있다.

탄소 누출은 기후 변화 정책이 부족하거나 덜 엄격한 국가들의 배출량 증가로 인해 지역 배출량 감소가 일정 부분 상쇄되는 상황을 말하며, 이는 내재된 탄소를 수입하는 것을 의미한다. 이러한 탄소 누출은 EU뿐만 아니라 다른 선진국들의 비조율된 기후 정책에도 심각한 위협이 되고 있다. 최근 EU의 그린 딜(Green Deal) 계획은 2050년 전 세계 탄소 순 배출량 제로를 목표로 EU의 탄소 배출량에 더 엄격한 조치를 가하는 것에 힘을 실어주었다. 이러한 노력을 더욱 강화하기 위

해 기존의 EU 정책을 넘어서는 추가 조치는 국제 탄소 가격 정책의 조정이 크게 도움이 될 것이다. 특정 부문에 대한 탄소 국경 조정 메커니즘을 개발할 것을 제안한다. 이 메커니즘은 수입 제품의 가격이 탄소 함량을 정확하게 반영하도록 보장함으로써 탄소 누출 위험을 줄일 것이다.

○ 중국의 ETS(Zhuang et al., 2023)

프로그램 시작 시와 비교하여, 베이징, 상하이, 후베이, 광둥, 심천의 탄소 배출권 거래 시범 사업은 더 많은 부문과 기업을 포함하도록 확장되었다. 베이징은 도로 교통 부문을 추가했으며, 광둥은 종이 산업과 항공 부문을 추가했다. 이러한 적용 범위 확장은 다양한 주체의 참여를 증가시켜 탄소 시장의 활력을 증대시키고 유동성을 높이며, 총 온실가스 배출을 효과적으로 통제하는 데 기여했다.

베이징은 잉여 할당량 문제를 해결하기 위해 지난 3년 동안 지속적으로 배출 한도를 초과한 주체의 할당량을 줄이는 전략을 시행했다. 그러나 전체 할당량 한도는 2017년 총 탄소 배출량과 같거나 그 이상으로 유지했다. 이러한 접근 방식은 전체 탄소 배출 할당량을 효과적으로 감소시키고, 공급과 수요의 역학 관계를 재조정하는 데 도움을 주었다.

톈진에서는 주요 배출 기업이 해당 연도의 배출 감축 목표를 달성하도록 지원하기 위해 200만 tCO₂-eq의 할당량을 경매를 통해 제공했다. 이러한 할당량의 시작 가격은 2018년 1월 1일부터 2019년 6월 26일까지의 평균 가격에 1.2를 곱한 값으로 결정되었다. 경매 수익은 시 정부의 재정 예비비로 사용되었다. 이렇게 구매된 할당량은 2018년에만 규정 준수 목적으로만 사용할 수 있으며, 할당량의 거래는 엄격히 금지되었다.

광둥에서는 2018년에 할당량 배분의 실효성을 높이기 위해 몇 가지 조정이 이루어졌다. 할당량 배분의 기준선을 재조정하고, 산정 방법이 업데이트하고 정교하게 하였다. 전통적인 제지 산업과 특수 연료를 사용하는 발전 산업에 대한 할당량은 과거 배출량 집약도를 기준으로 할당되었다. 반면 특수 제지 및 제지 제품 제조업체의 할당량 배분에는 벤치마크 방식을 적용했다. 나아가 같은 해에 할당량 매입과 추가의 기준 및 산정 방법에 대한 수정이 이루어졌다. 이러한 조치는 광둥의 할당량 배분의 정확성과 공정성을 향상시키기 위한 것이다.

자발적 프로그램은 4년 이상 운영되어 왔다. 이 프로그램을 통해 발생하는 중국 탄소 배출 감축량(China Certified Emission Reduction, CCER)은 초기 탄소 시장의 배출 할당량보다 더 자주 거래되며, 주로 규제 요구 사항을 충족시키기 위한 배출 상쇄에 사용된다. 자발적 프로그램은 프로젝트별 탄소 배출 감축을 촉진하고 지속 가능한 저탄소 생산 및 생활 방식을 육성하는 데 크게 기여했다.

○ 한국의 ETS(기획재정부-환경부, 2019)

국가 온실가스 감축 로드맵에 연동하여 배출 할당 총량을 엄격히 할당할 필요. 배출 할당 총량을 「2030 온실가스 감축 로드맵」의 연도별 목표배출량에 따라 설정하여 실질적인 감축 유도. 배출권거래제 할당 업체의 배출량 증가에 대한 분석 및 평가가 미흡함. 한국의 벤치마킹 기준은 EU에 비해 낮다. EU는 동일 공정 상위 10% 수준의 배출효율을 기준으로 벤치마킹 계수를 설정하는 반면, 우리나라는 주로 중간값을 적용하고 있다. 2019년부터 유상할당을 3%로 시행하였으나, 이는

미흡한 수준으로 비율 확대 및 무상할당 업종 선정 기준의 개선이 필요하다. 유상할당 비중 확대를 통해 오염원 책임을 강화하고, 국제경쟁력을 고려하여 무상할당 대상 선정 기준을 개선.

시장 기능 활성화를 달성하기 위해 제3자의 참여를 인정하고, 시장 유동성 확보를 위한 조치를 취해야 한다. 또한 장내 선물거래 제도를 도입(on-exchange futures trading system)하고 거래 인센티브를 제공함으로써 배출권 거래를 활성화할 필요가 있다. 선물 거래는 시장 참가자들이 추후 안 내되고 지불될 할당량의 가격에 대해 미리 합의할 수 있게 한다. 이는 본질적으로 사전에 거래를 하는 것으로, 지금 거래에 합의하지만 실제 할당량의 교환과 지불은 나중에 이루어진다.

감축기술 정보의 공유에 대한 검증기관의 책임과 능력을 강화하여 배출량 보고 및 검증의 신뢰성을 높여야 한다. 또한, 주요 업종별 감축기술 보고서를 발간하고 배포함으로써 기술 개발과 감축 투자를 지원. 배출권 유연성 기제를 내실화하기 위해 국내 외부사업 감축실적의 상쇄배출권 전환에 대한 객관적 평가 및 제도 운영이 필요합니다. 또한, 파리협정 체제에서 인정되는 해외 감축 실적을 상쇄배출권으로 인정.

○ 스위스의 ETS(Narassimhan et al 2018; Vöhringer, 2012)

스위스 ETS 프로그램은 주로 시장 규모가 작아 유동성 부족이라는 문제에 직면해 왔다. 2016년 1월, 스위스 정부는 스위스 ETS를 EU ETS 시장과 연계하기로 합의했다. 두 번째 거래 기간 동안 스위스 ETS는 EU ETS와 동일한 준수 수단을 채택하며 정합성을 강화했다. 스위스 ETS는 배출 상한이 5.3 MMTCO_{2e}에 불과한 작은 시장으로, EU ETS와의 연계로부터 상당한 혜택을 받을 것으로 기대됩니다. 이러한 통합은 기존의 유동성 문제를 완화하는 데 기여할 것으로 보인다. 또한, 스위스 기업들의 탄소 누출(carbon leakage) 및 경쟁력 우려도 줄어들 것으로 예상된다. 이는 스위스 수출의 60%, 수입의 78%가 EU 지역과 연관되어 있기 때문이다.

○ 퀘벡의 ETS(EDF, 2015; Narassimhan et al 2018; Hanoteau and Talbot, 2019)

퀘벡 탄소 시장 설계는 EU ETS에서 관찰된 문제점들에 크게 영향을 받았다. 탈세, 가격 폭락, 시장 조작과 같은 문제를 방지하기 위해 감독 메커니즘이 시스템에 통합되었다. 주요 조치 중 하나는 경매에서 판매되는 배출권에 최소 가격을 부과한 것이다. 2013년 12월, 이 가격 하한선은 CAD \$10.75로 설정되었으며 매년 5%씩 증가하도록 설계되었다. 이 메커니즘은 탄소 가격 변동성을 줄이고 시장의 안정성을 보장한다. 잠재적인 시장 조작을 최소화하기 위해 퀘벡의 규정은 구매하거나 보유할 수 있는 배출권의 수량을 제한한다. 예를 들어, 어떤 배출자도 경매에서 사용할 수 있는 배출권의 25% 이상을 획득할 수 없다.

퀘벡의 전력과 제조업 부문에서는 감축 기회가 제한적이다. 이는 퀘벡 전력의 약 96%가 재생 가능 에너지, 특히 수력 발전에 의해 공급되기 때문이다. 따라서 온실가스 감축 노력은 주로 운송 부문에 집중되고 있다. 캘리포니아-퀘벡 연계 시스템은 운송 부문을 포함한 주요 배출 부문을 거의 완전히 포괄하며, 매년 3%씩 강화되는 상한 설정으로 강력한 환경적 효과를 보여준다. 게임 조작 및 이중 계상(double counting)을 방지하기 위해 캘리포니아와 퀘벡은 공동 전자 배출권 등록부를 구축했다. 배출권 및 상쇄 배출권의 신뢰성을 보장하기 위해 검증과 데이터 정확성을 위한 강력한 안전장치도 구현되었다. 가격 안정성을 유지하기 위해 최소 가격은 두 지역 중 더 높은 가격(미국 달러로 환산)을 기준으로 설정된다.

캘리포니아 시스템과의 연계는 배출권 접근성을 높임으로써 퀘벡의 상한-거래(cap-and-trade) 시장의 유동성을 크게 개선했다. 퀘벡 상한-거래 시스템의 향후 발전은 새로운 연계 파트너십을 구축하려는 정부의 능력에 달려 있다.

표. 2.1. 기존 ETS 메커니즘 요약.

국가	운영 시작 및 단계	부문 적용 범위	할당 방식	배출 할당량 상한(MtCO ₂)
EU	2005 • 1차: 2005 - 2007 • 2차: 2008 - 2012 • 3차: 2012 - 2020 • 4차: 2021 -	해운, 국내 항공, 산업, 전력	무상 할당(벤치마킹); 경매 할당	2,096 (2005) 1,386 (2024)
후베이, 중국	2014	산업	무상 할당(Grandfathering, 벤치마킹); 경매 할당	324 (2014) 180 (2022)
광둥, 중국	2013 • 1차: 2013 - 2015 • 2차: 2016 - 2020 • 3차: 2021 -	국내 항공 산업	무상 할당(Grandfathering, 벤치마킹); 경매 할당	388 (2013) 297 (2023)
베이징, 중국	2013	운송, 건물, 산업, 전력		~44 (2022)
텐진, 중국	2013	산업		74 (2022)
심천, 중국	2013	운송 건물 산업		28 (2023)
상하이, 중국이	2013 • 1차: 2013 - 2015 • 2차: 2016 -	해운, 국내 항공, 운송, 건물, 산업, 전력		100 (2022)
충칭, 중국	2013	산업		78.39 (2020)
한국	2013 • 1차: 2013 - 2014 • 2차: 2015 - 2017 • 3차: 2018 - 2020	해운, 폐기물, 국내 항공, 운송, 건물, 산업, 전력	무상 할당 (Grandfathering, 벤치마킹); 경매 할당	540.1 (2015) 567.1 (2024)
스위스	2008 • 1차: 2008 - 2013 • 2차: 2013 - 2020 • 3차: 2021 - 2030	국내 항공, 산업, 전력	무상 할당(벤치마킹); 경매 할당	5.6 (2013) 4.4 (2024)
퀘벡, 캐나다	2013 • 1차: 2013 - 2014 • 2차: 2015 - 2017 • 3차: 2018 - 2020 • 4차: 2021 - 2023	운송, 건물, 산업, 전력	무상 할당(벤치마킹); 경매 할당	23.2 (2013) 51.6 (2024)

2.2. ETS 가격 예측

탄소 가격의 시계열 예측 방법은 크게 기존 계량경제학(conventional econometric) 방법, 기계학습(machine learning) 및 인공지능(artificial intelligence) 방법, 혼합 모델(mixed model) 등 세 가지 유형으로 분류된다(Wang et al., 2022). 기존 계량경제학 모델은 선형 회귀(linear regression) 모델, 단순 이동 평균(simple average model) 모델, 통합 이동 평균(integrated moving average, ARIMA) 모델, Holt-Winters 방법, Kalman 필터 등이 포함된다. 이러한 모델은 적용이 간단하고 기술적으로 성숙되어 있지만, 학습의 자유도가 제한적이며 일반적으로 선형성과 안정성을 보여줄 수 있는 데이터가 필요하다.

혼합 모델은 유형의 모델은 다양한 접근 방식의 요소를 결합하여 개별 모델의 한계를 효과적으로 해결하고 높은 예측 정확도를 제공한다. 그러나 이러한 모델은 구조가 복잡하고 상당한 계산 요구 사항을 수반하는 경향이 있다. 기계학습 및 인공지능 방법은 결정 트리(decision tree, DT), 서포트 벡터 머신(support vector machine, SVM), 부스팅(boosting), 랜덤 포레스트(random forest, RF), 인공신경망(artificial neural network, ANN) 모델 등이 포함된다. 이러한 모델은 비선형 시계열을 예측하는 데 탁월하며 높은 예측 정확도와 견고성을 제공한다.

한국을 제외하고, ET와 중국의 사례에 대한 많은 연구에서는 기존의 방법(ARIMA 등) 대신 머신러닝의 고급 방법을 사용하여 ETS의 가격을 예측하고 있다(표. 4.1). 많은 연구에서는 에너지 가격, 경제 변수, 금융 지수, 불확실성 지수 등의 입력 feature을 포함하였다. 가격 변수의 경우, 해당 국가(현지)의 가격 뿐만 아니라 국제 가격도 포함되었다.

표. 2.2. 배출권거래 가격 예측에 관한 문헌 검토

No	국가	활용 변수 또는 feature	활용 모델	비고
1	유럽	단변량 방식(ETS의 과거 데이터)	<ul style="list-style-type: none"> ARIMA LSSVM(Least Squares Support Vector Machine) ARIMA+LSSVM 	Zhu and Wei 2013
2	유럽	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 가격: Brent 원유, 천연가스, 전력, 석탄 DAX 지수: 독일 프랑크푸르트 증권 거래소에 상장된 30개 주요 독일 기업의 주가 지수 S&P 클린 에너지 지수: 세계적으로 청정 에너지 관련 사업에 참여하는 30개 기업으로 구성된 지수 	<ul style="list-style-type: none"> FFNN (Feedforward Neural Network, ANN) DT(Decision Tree) RF(Random Forest) 	Yahsi, et al., 2019
3	유럽	환경지수(Financial Index) 에너지 가격: 천연가스, 원유, 석탄	<ul style="list-style-type: none"> ARIMA Random Forest(RF) XGBoost SVR(Support Vector Regression) 	Zhang and Wen 2022

			<ul style="list-style-type: none"> LSTM TCN-Seq2Seq 	
4	중국 후베이	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 가격(석탄, 천연가스, 석유) 경제 지표(환율, 주가지수) 국제 탄소 시장(EU 탄소 가격, 뉴질랜드 탄소 가격) 환경 조건(최고 기온, AQI) 대중의 감정불확실한 요인(경제 정책 불확실성, 지정학적 리스크) 	<ul style="list-style-type: none"> Naive QTCN(Quasi Temporal Convolutional Network) DeepAR QLSTM LSSVM BPNNRF 	Cao et al., 2023
5	중국: 후베이(Hubei), 광둥(Guangdong)	에너지 가격 데이터 : 원유, 천연가스, 석탄	<ul style="list-style-type: none"> SVR(Support Vector Regression) MLP (Multi-Layer Perceptron) RNN (Recurrent Neural Network) LSTM (Long Short-Term Memory) 	Li et al., 2022
6	중국 후베이, 상하이(Shanghai), 광저우(Guangzhou)	단변량 방식(ETS의 과거 데이터)	<ul style="list-style-type: none"> ARIMA(초기 모델) CEEMDAN-CNN-LSTM Multi-CNN-LSTM Lp-CNN-LSTM 	Dong et al., 2023
7	<ul style="list-style-type: none"> EU 베이징(Beijing) 상하이(Shanghai) 광둥(Guangdong) 심천(Shenzhen) 후베이(Hubei) 	<ul style="list-style-type: none"> GDP 성장률 에너지 가격: oil, coal Term spread(만기 스프레드) CSI300Re(CSI 300 지수로그 수익률) COVID_CN(중국의 새로운 확진자 수) COVID_EU(유럽 연합의 새로운 확진자 수) 	<ul style="list-style-type: none"> SSA(Singular Spectrum Analysis) SVR LSSVR RF XGBoost LSTM RNN(Recurrent Neural Network) 	Zhang et al., 2023b
8	탄소 배출 가격(Carbon Emission Futures, CEF)	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 가격: 원유 (Crude Oil WTI Futures, COWTIF), 천연가스 (Natural Gas Futures, NGF) Dow Jones 에너지 상품지수(DGCE) Dow Jones 난방유 상품지수 (DGCHO) 	<ul style="list-style-type: none"> MLR(Multiple Linear Regression) SVR ANN LSTM 	Shahzad et al., 2023
9	한국	한국 배출권 단위	<ul style="list-style-type: none"> MLR(Multiple Linear Regression Model) ARIMA(Auto Regressive Integrated Moving Average) 	Kim et al., 2022
10	한국	<ul style="list-style-type: none"> 이산화탄소 농도 경제 성장률 PRTP(순시간선호율) 	<ul style="list-style-type: none"> Nordhaus의 탄소 배출 가격 모델 ARIMA 	Kim et al., 2014

III. 분석 방법 및 자료

첫 번째 세부 과업은 수집된 국제 학술 논문에 텍스트 분석을 적용한 후, ETS와 관련된 각 단어의 빈도나 중요성을 시각적으로 보여줄 수 있는 시각화 방법을 활용하여 bibliometric 분석을 수행하는 것이다. 한편, 두 번째 세부 과업은 선택된 입력 변수에 기반하여 ETS 가격 패턴을 이해하기 위해 머신러닝 모델을 적용한다. 이 모델은 ETS 가격을 평가할 뿐만 아니라 각 변수의 중요성을 분석하는 데에도 활용된다.



*Bibliometric 분석(계량 서지학적 분석): 논문 및 책과 같은 저작물에 대한 통계적 분석

그림 3.1. 세부과업 및 연구 방법 설명.

3.1. 배출권거래제 제도 및 운영 사례 비교 분석을 통한 잠재적 리스크 도출

텍스트 분석은 두 부분으로 나뉘어 진행된다: 1) 누적 수집된 논문의 텍스트 분석, 2) ETS와 관련된 주제의 시간적 변화를 추가적으로 분석하기 위한 동적 토픽 모델링을 활용한 텍스트 분석. 국제 논문은 “Web of Science“ 와 “OpenAlex API“ 데이터베이스에서 “emissions trading system“ 이라는 검색어를 사용하여 수집된다. 검색 결과가 위험 관련 용어로 편향되지 않도록 일반적인 검색어를 사용한다. 또한, 텍스트 분석 결과는 ETS와 관련된 위험 요소와 연관하여 검토될 예정이다.

11,000편 이상의 논문이 수집되었으며, “title“, “keywords“ 및 “abstract“ 섹션이 추출되었다. 텍스트 분석의 첫 번째 단계에서는 모든 논문의 키워드를 필터링한 후 WordCloud 기법을 사용하여 각 단어의 빈도를 분석한다. 추가적으로, 키워드에 “policy“와 “market“이 포함된 논문들로 필터링한 후 다시 WordCloud 결과를 생성한다. WordCloud는 비정형 텍스트 데이터를 분석하기 위한 대표적인 기법으로, 사전에 수작업으로 전처리된 텍스트를 활용한다(Jung et al., 2023). 출현 빈도가 높은 단어는 더 큰 글씨로 표시되며, 각 단어는 서로 다른 색상으로 표현된다. 이때, 출현 빈도가 높은 단어는 높은 중요도 또는 높은 관심도를 나타내는 것으로 간주된다. 분석에 앞서 전치사와 같은 특정 단어는 수작업으로 제외된다.

두 번째 단계에서는 ETS와 관련된 주제 동향의 변화를 조사하기 위해 동적 토픽 모델링(Dynamic Topic Modeling, DTM)을 활용한 텍스트 분석을 진행한다. 토픽 모델은 대규모 텍스트 컬렉션을 분석하고 표현할 수 있는 기법으로, 가장 중요한 기술 중 하나는 잠재 디리클레 할당

(Latent Dirichlet Allocation, LDA)이다(Guillén-Pacho et al., 2024). LDA는 디리클레 분포와 다항 분포를 적용하는 확률 생성 접근법을 따른다. LDA 알고리즘은 다양한 방식으로 확장되었으며, 그 중 하나가 DTM이다(Blei & Lafferty, 2006). DTM은 각 시간 단위별로 문서에 LDA를 적용하여 주제의 변화를 시간에 따라 포착한다.

이번 분석에서는 “keywords“ 대신 “abstract“ 섹션을 사용하여 더 세부적인 인사이트를 제공한다. 허용된 단어는 고유 명사, 부사, 명사로 제한되며, 추가적으로 특정 불용어(stopwords)는 수작업으로 제외된다. 또한, 토픽 수를 테스트한 결과, 세 가지 토픽이 더 높은 설명력을 제공하는 것으로 나타났다. 시간 범위는 2007년 이후에 발표된 논문으로 제한하며, 시간 간격은 1년 단위로 설정한다. 그러나 긴 시간 범위를 고려하여 결과는 초반, 중반, 후반 시기를 각각 10년 단위로 나누어 제시한다. 각 토픽과 해당 연도를 WordCloud로 시각화하여 의미 있는 결과를 도출한다.

분석은 Python 라이브러리인 WordCloud (Mueller, 2024)와 Tomotopy(Lee, 2019)를 사용하여 수행된다.

3.2. 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성 변수별 배출권가격 영향 평가

여러 연구에서는 에너지 가격 및 사회경제적 변수를 기반으로 한 입력 변수를 사용하여 머신러닝 모델로 ETS 가격을 예측해왔다. 본 연구의 주요 차별점은 ETS 메커니즘 변수를 입력 변수로 포함한다는 점이다. 이러한 변수에는 배출권 할당량 상한 값, 이월 및 차입 비율, 할당 유형(예: 무상 할당 또는 경매 할당), 상쇄 크레딧 비율 등이 포함된다. 또한, 본 연구는 전이 학습(transfer learning) 접근법을 활용하여 훈련된 모델을 다른 지역의 ETS 가격을 예측하고 평가하는 데 사용한다.

모델 훈련을 고려할 때, 입력 변수는 두 가지 그룹으로 분류된다(표 3.1): 1) 지역적 요인(local factors)과 2) 글로벌 요인(global factors). 지역적 요인은 각 ETS 지역의 특정 조건을 나타내며, 글로벌 요인은 서로 다른 지역의 ETS 시스템을 연결하는 변수로 사용된다. 지역적 요인에는 1인당 GDP, 환율과 같은 사회경제적 변수, 기간, 그리고 앞서 설명된 ETS 메커니즘이 포함된다. 반면, 글로벌 요인에는 원유, 석탄, 천연가스과 같은 에너지 가격이 포함된다. 주간 데이터를 사용하므로, 입력 변수의 현재 ETS 가격 예측에 대한 과거 또는 이전 시계열 데이터의 영향을 고려하기 위해 시차(lag) 특성 분석이 필요하다. 단기적인 동적 패턴을 충분히 포착하면서 불필요한 시차를 포함하지 않기 위해 이전 4주 데이터를 나타내는 시차 값 4를 선택한다(표 3.2). 기간은 ETS 시작일 기준 누적 주차 번호(cumulative week)와 단계(ETS phase)로 표현되어 ETS 시행의 시간적 맥락과 진행 상황을 반영한다.

머신러닝 구현 워크플로우는 두 가지 단계로 나눌 수 있다(그림 3.2): 1) 학습 과정과 2) 전이 학습 과정. 훈련 과정에서는 CatBoost 회귀 모델을 사용하여 기존 ETS: EU, 스위스, 퀘벡 데이터, 포함의 입력 특성을 기반으로 ETS 가격을 학습한다. CatBoost는 견고성, 일반화 능력, 다양한 유형의 데이터를 처리할 수 있는 능력으로 잘 알려진 향상된 그래디언트 부스팅 의사결정 트리 알고리즘이다(Friedman, 2001; Bhati & Khari, 2021; Dorogush et al., 2018). CatBoost는 광범위한 전처리 없이 범주형 데이터를 직접 처리할 수 있는 능력 때문에 선택되었다(Abdullah & Said, 2023). CatBoost 회귀를 위해 Python 라이브러리가 사용된다(Prokhorenkova et al., 2018). 시계열 데이터

는 훈련(train), 검증(validation), 테스트(test) 데이터 세트로 70:20:10 비율로 분할한다. 이는 학습 과정에서 과적합(overfitting) 및 과소적합(underfitting)의 가능성을 줄이기 위해 수행한다(그림 3.3).

학습 과정에서는 최적의 성능을 내는 모델을 구축하기 위해 하이퍼파라미터 튜닝을 수행한다. 모델이 최적의 성능에 도달하면, ETS 가격에 대한 각 입력 변수의 영향을 평가하기 위해 영향 요인 분석을 실시한다. 전이 학습 과정에서는 훈련된 모델을 다른 지역, 즉 한국 ETS 데이터의 입력 변수를 사용하여 ETS 가격을 예측하는 데 적용한다. 초기 ETS 기간 동안의 불확실성을 고려하기 위해 초기 ETS 시간 프레임에 대한 모델 튜닝이 수행된다. 이후, ETS 가격을 예측하고 수집된 실제 ETS 가격과 비교한다. 또한, ETS 맥락에 특화된 요인을 조사하기 위해 추가적인 영향 요인 분석을 수행한다.

표. 3.1. 데이터 수집 변수 및 정보.

변수				Unit	EU, Switzerland, Quebec	한국	비고
입력 (feature)	에너지 가격	석탄: Brent UK crude oil		USD2024/ton	Investing.com		주 (Weekly) 단위 데이터 국제가격 (글로벌 요인, global factor)
		원유: Rotterdam coal price		USD2024/bbl	Investing.com		
		천연 가스: UK NBP		USD2024/ton	Investing.com		
	경제 상황과 관련된 변수	환율		USD2024	Investing.com		주 (Weekly) 단위 데이터 국가별로 (지역적 요인, local factor)
	1인당 GDP	-	-	USD2024	World Bank; IMF		주 (Weekly) 단위 데이터
	ETS 기간	단계(phase)		값	International Carbon Action Partnership (ICAP)		
		시작일 기준 누적 주차 번호(cumulative week)		값	-		
	ETS 메커니즘	강화	할당량 상한		MtCO ₂ -eq	International Carbon Action Partnership (ICAP)	
			할당 방식		Free allocation (%), Auction (%)		
		유연성	이월 (Banking)		%		
차입 (Borrowing)			%				

			상쇄 크레딧	%		
타겟	ETS 가격			USD2024/ tCO ₂ -eq	EU: tradingeconomics.com/commodity/carbon Switzerland and Quebec: ICAP	KRX (배출권시 장 정보플랫폼)

표. 3.2. 데이터 윈도우(window).

입력 변수와 lag 시간		타겟
<ul style="list-style-type: none"> 에너지가격 1인당 GDP 환율 	$X_{W-4}, X_{W-3}, X_{W-2}, X_{W-1}$	ETS _{W=0}
기간	$X_{W=0}$	
ETS메커니즘	$X_{W=0}$	

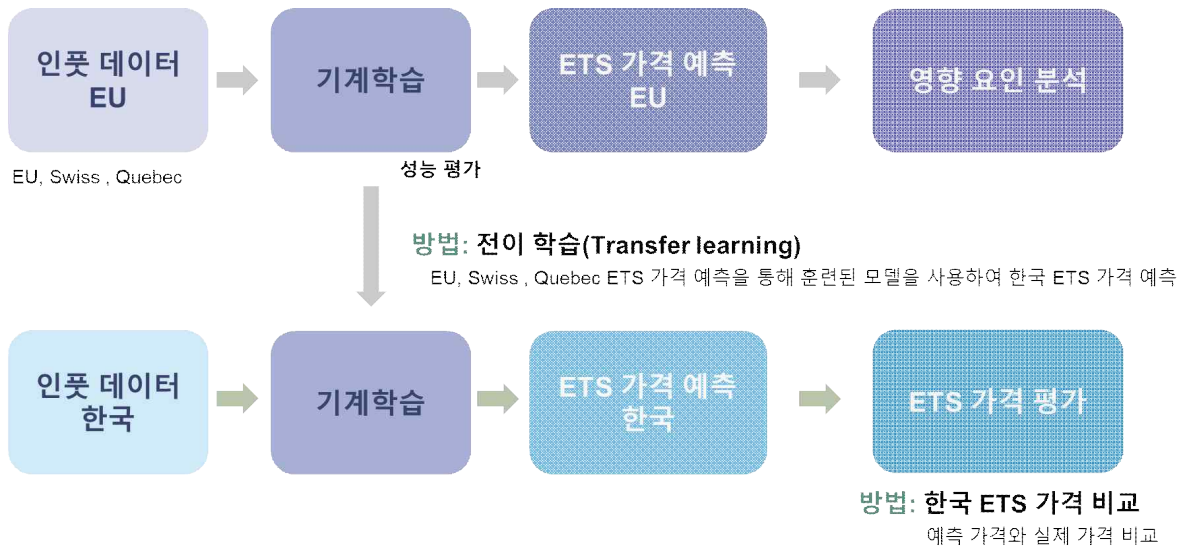


그림 3.2. 기계학습 실행 흐름.



그림 3.3. 데이터 분할.

4.1.2. DTM 토픽 모델링 텍스트 분석

자세한 분석을 위해 ETS와 관련된 각 주제의 변화를 파악하기 위해 논문 초록을 기반으로 DTM을 활용한 추가 텍스트 분석을 수행하였다. 총 토픽 수(k)는 사용자에게 의해 결정되며, 다양한 값을 테스트한 결과 $k=3$ 이 가장 의미 있는 분석 결과를 제공하는 것으로 선택되었다. 또한, 각 토픽에 대한 텍스트 분석은 시간대를 기준으로 수행되었다. 분석은 2005년 EU ETS 도입 이후와 일치하도록 2007년 이후에 발표된 논문으로 제한되었다. 긴 시간 범위를 고려하여 분석은 초기, 중기, 최근의 세 시기로 나뉘며, 각각 10년 간격으로 구분되었다. DTM 결과를 바탕으로, 각 토픽에 해당하는 세트의 단어를 ChatGPT에 입력하여 주제 요약 생성하였다. 도출된 주요 초점은 다음과 같다: 토픽 1은 자원 할당에 초점을 맞추고, 토픽 2는 시범(pilot) 사업과 안전성을 강조하며, 토픽 3은 시장 메커니즘과 탄소 가격을 강조한다(표 4.1; 그림 4.2 - 4.4).

표. 4.1. DTM 분석 결과 요약.

	토픽 1	토픽 2	토픽 3	비고
핵심 초점	할당 전략	시범 프로젝트 및 리스크 완화	시장 메커니즘 및 탄소 가격 책정	-
초기	할당량 배분 및 국제 체제(교토의정서) 하에서 부문별 정책	전력 생산, 연료 사용, 교통에서 발생하는 배출량과 국제 협정(교토의정서)과의 연관성	EU 내에서 거래 메커니즘 및 정책 수단의 수립	토픽 1과 토픽 3은 ETS 메커니즘 및 정책과 연관되며, 토픽 2는 배출원과 국제 협정을 강조하는 점에서 차별화
중기	ETS 내에서, 특히 EU를 중심으로 한 배출 감축 정책, 토지 이용, 및 기술 발전	ETS 메커니즘을 시험하고 온실가스 배출에 미치는 영향을 평가하기 위해 설계된 시범 사업, 및 보다 광범위한 환경적 고려사항	탄소 가격 책정 및 에너지 시장과 같은 경제적 측면, ETS로의 전력 시스템 통합의 확대	세 가지 토픽은 모두 실행 단계로 전환을 나타내며, 토픽 2는 시험 사업에, 토픽 1과 3은 배출 감축과 경제적 메커니즘에 집중
최근기	전력망 관리로의 전환, “프로슈머”(생산자-소비자) “prosumers” (producers-consumers)의 통합, 및 ETS 프레임워크에서의 지역사회 수준 해결책 도입	안전 조치의 발전, 탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술, 및 온실가스 배출과 관련된 리스크 완화를 위한 광범위한 전략	배출 감축 목표 달성, ETS 신뢰성 구축, 및 탄소 완화 전략을 안내하기 위한 모델 활용	세 가지 토픽은 모두 ETS 성숙도를 보여주며, 토픽 1은 전력망 및 지역사회 통합, 토픽 2는 리스크 완화와 CCUS 발전, 토픽 3은 배출 감축과 신뢰성 구축에 초점

Topic 1 – early period



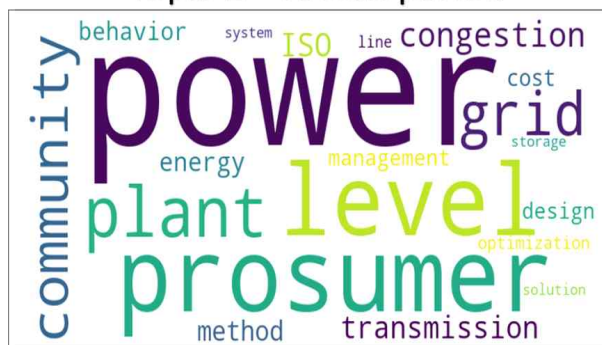
(a)

Topic 1 – middle period



(b)

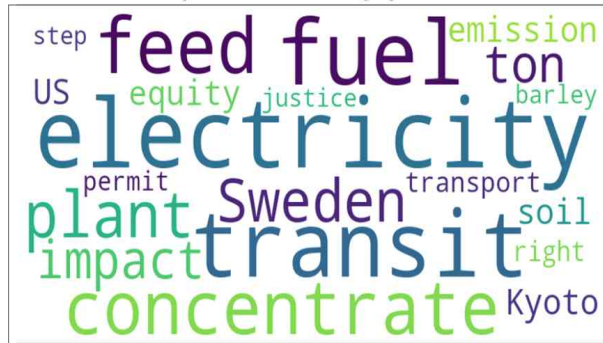
Topic 1 – recent period



(c)

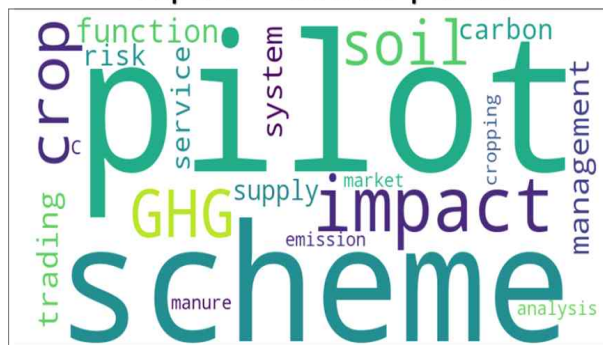
그림 4.2. 토픽 1에 대한 DTM 분석 결과.

Topic 2 – early period



(a)

Topic 2 – middle period



(b)

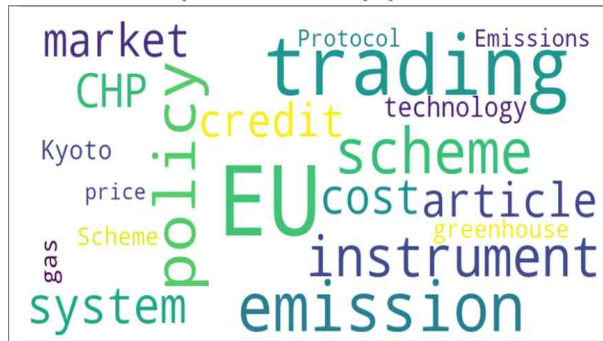
Topic 2 – recent period



(c)

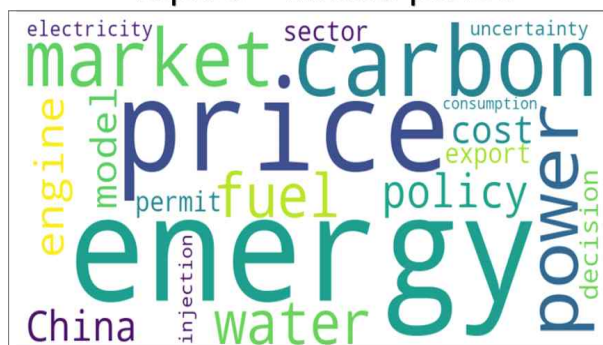
그림 4.3. 토픽 2에 대한 DTM 분석 결과.

Topic 3 – early period



(a)

Topic 3 – middle period



(b)

Topic 3 – recent period



(c)

그림 4.4. 토픽 3에 대한 DTM 분석 결과.

○ 각 토픽에 대한 분석 결과

토픽 1의 주요 초점은 자원 할당입니다. 초기 시기에는 “allocation(할당)”, “allowance(할당량)”, “sector(부문)”, “CDM(clean development mechanism, 청정개발체제)”, “Kyoto(교토)”, “aviation(항공)”과 같은 주요 단어들이 ETS 내에서의 할당량 배분 및 부문별 정책에 대한 강한 강조를 반영한다. 청정개발체제(CDM)와 교토의정서에 대한 언급은 국제 기후 체제에 대한 초점을 시사하며, “항공”은 ETS 내에서의 부문별 고려사항을 의미한다. 중기 시기에는 “emission(배출)”, “use(사용)”, “EU”, “technology(기술)”, “land(토지)”와 같은 단어들이 배출 중심 정책, 토지 이용 및 기술 개발로의 전환을 나타내며, 유럽연합이 배출권 거래에서 지속적으로 중요한 역할을 하고 있음을 보여준다. 최근 시기에는 “power(전력)”, “grid(전력망)”, “prosumer(프로슈머)”, “plant(발전소)”,

“community(지역사회)”와 같은 용어들이 전력망 관리로의 전환, 전력 시스템 내 “프로슈머(생산자-소비자)” “prosumer” (producers-consumers)의 역할, ETS 프레임워크 내에서의 지역사회 수준 해결책 통합을 의미한다.

토픽 2의 주요 초점은 시범 사업과 리스크 완화것이다. 초기 시기에는 “electricity(전력)”, “fuel(연료)”, “plant(발전소)”, “transit(교통)”, “Kyoto(교토)”와 같은 주요 단어들이 전력 생산, 연료 사용, 교통 관련 배출에 대한 초점을 반영한다. 교토의정서에 대한 언급은 초기 시기에 국제 협정에 대한 강조를 보여준다. 중기 시기에는 “pilot(시범)”, “scheme(개요)”, “soil(토양)”, “GHG(온실가스)”, “impact(영향)”과 같은 단어들이 ETS 메커니즘을 시험하고 온실가스 배출에 미치는 영향을 평가하기 위해 설계된 시범(pilot) 개요를 강조한다. “soil(토양)”의 포함은 탄소 격리와 같은 보다 광범위한 환경적 고려사항을 시사한다. 최근 시기에는 “safety(안전)”, “CCUS(탄소 포집·활용·저장)”, “risk(리스크)”, “land(토지)”, “GHG(온실가스)”와 같은 용어들이 안전 조치, 탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술, 그리고 온실가스 배출 관리를 위한 보다 광범위한 리스크 완화 전략에 대한 초점을 의미한다.

토픽 3의 주요 초점은 시장 메커니즘과 탄소 가격 책정이다. 초기 시기에는 “trading(거래)”, “policy(정책)”, “EU”, “scheme(개요)”, “emission(배출)”과 같은 단어들이 거래 사업 및 정책, 특히 EU 내에서의 강한 초점을 나타내며, 배출 시장과 정책 수단의 구축에 대한 논의를 시사한다. 중기 시기에는 “price(가격)”, “market(시장)”, “energy(에너지)”, “carbon(탄소)”, “power(전력)”과 같은 용어들이 ETS의 경제적 측면, 특히 탄소 가격 책정과 에너지 시장을 강조하며, 전력 시스템을 탄소 가격 메커니즘에 통합하려는 노력을 나타낸다. 최근 시기에는 “carbon(탄소)”, “model(모델)”, “target(목표)”, “credibility(신뢰성)”, “reduction(감축)”과 같은 단어들이 배출 감축 목표 달성, ETS의 신뢰성 구축, 그리고 탄소 완화 전략을 안내하기 위한 모델 개발에 초점을 맞추고 있음을 보여준다.

○ 모든 토픽에 대한 시기별 분석

초기에는 세 가지 토픽 모두 ETS의 기초적인 측면에 초점을 맞추고 있다. 토픽 1은 교토의정서와 같은 국제 체제 하에서 할당량 배분 및 부문별 정책에 강한 초점을 반영한다. 이와 유사하게, 토픽 2는 전력 생산, 연료 사용, 교통 관련 배출에 초점을 맞추고 있으며, 교토의정서와 같은 국제 협정과의 연관성을 보여준다. 반면에, 토픽 3은 특히 EU 내에서 거래 메커니즘과 정책 수단의 구축에 주된 초점을 나타낸다. 토픽 1과 토픽 3은 ETS 메커니즘 및 정책과 일치하는 반면, 토픽 2는 배출원과 국제 협정을 강조한다는 점에서 차별화된다.

중기에는 ETS 프레임워크에 새로운 요소를 통합하고 메커니즘을 시험하는 데 초점이 이동한다. 토픽 1은 ETS 내에서 배출 감축 정책, 토지 이용, 기술 발전, 특히 EU를 중심으로 한 논의에 초점을 맞춘다. 토픽 2는 ETS 메커니즘을 시험하고 온실가스 배출에 미치는 영향을 평가하기 위해 설계된 시범 사업을 강조하고, 토양 탄소 격리와 같은 보다 광범위한 환경적 고려사항을 포함한다. 한편, 토픽 3은 ETS에 전력 시스템 통합이 확대됨에 따라 탄소 가격 책정과 에너지 시장 등 경제적 측면에 초점을 맞춘다. 중기 시기는 세 가지 토픽 모두에서 실행 단계로의 전환을 나타내며, 토픽 2는 시험 사업에 초점을 맞추는 반면, 토픽 1과 토픽 3은 배출 감축 및 경제적 메커니즘에 집중한다.

최근에는 각 토픽의 초점이 더욱 발전된 프레임워크와 광범위한 통합으로 진화한다. 토픽 1은 전력망 관리로의 전환, “프로슈머(생산자-소비자)”의 통합, 그리고 ETS 프레임워크 내 지역사회 수준 해결책 채택을 강조한다. 토픽 2는 안전 조치의 발전, 탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술, 그리고 온실가스 배출 관리와 관련된 리스크 완화를 위한 광범위한 전략을 반영한다. 토픽 3은 배출 감축 목표 달성, ETS 신뢰성 구축, 그리고 탄소 완화 전략을 안내하기 위한 모델 활용을 강조한다. 최근 시기에는 세 가지 토픽 모두 ETS 발전의 성숙도를 보여주며, 토픽 1은 전력망 및 지역사회 수준 통합에 초점을 맞추고, 토픽 2는 리스크 완화 및 CCUS 기술의 발전을, 토픽 3은 배출 감축 및 신뢰성 구축을 우선시한다.

4.2 기계학습을 활용한 배출권가격 예측 및 특성 변수별 배출권가격 영향 평가

4.2.1. 기계학습 훈련 결과

앞서 설명한 바와 같이, 훈련 과정에서는 기존 ETS 시스템(EU, 스위스, 퀘벡 데이터를 포함)의 입력 특성을 기반으로 ETS 가격을 예측하기 위해 CatBoost 회귀 모델을 사용한다. 훈련된 모델은 세 국가의 데이터를 학습하였으므로 ETS 가격 예측을 위한 “글로벌 모델”로 간주된다. 평가 지표로는 실제 ETS 가격과 예측된 ETS 가격 간의 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 결정 계수 (coefficient of determination, R^2) 값이 사용되며, 이러한 지표는 모든 지역에 대한 평균값과(표 4.2) 각 국가별(표 4.3 - 표 4.5) 개별 값으로 보여준다. 평가 지표 결과에서 작은 RMSE 값과 1에 가까운 R^2 값이 관찰되어 훈련된 모델이 ETS 가격 예측에서 우수한 성능을 보임을 해석한다. 추가적으로, 실제 ETS 가격과 예측된 ETS 가격의 비교 그래프를 통해 모델 성능을 시각적으로 확인할 수 있다(그림 4.4). 스위스의 이용 가능한 데이터는 2단계(Phase 2)부터 시작된다.

ETS 그래프에서 ETS 가격이 초기에는 증가하는 추세를 보이다가(그림 4.5), 2023년 이후에는 비교적 감소하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있다. 입력 변수들이 ETS 가격에 미치는 영향에 대한 분석은 다음 섹션에서 제공된다.

표. 4.2. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 평균값.

데이터 형	RMSE	R^2
훈련(Train)	1.1358	0.9980
검증(Validation)	1.7556	0.9948
테스트(Test)	1.5195	0.9965

표. 4.3. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 - EU 데이터.

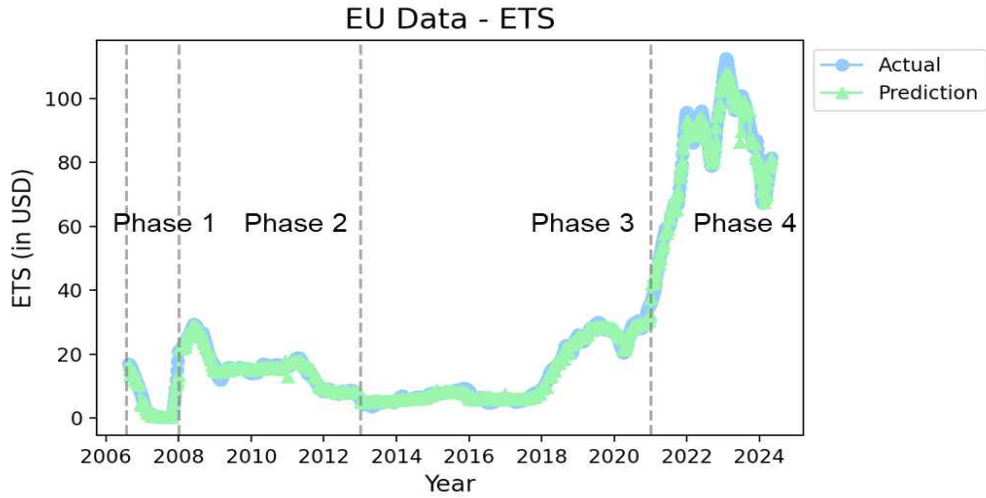
데이터 형	RMSE	R ²
훈련(Train)	1.240	0.9982
검증(Validation)	2.135	0.9944
테스트(Test)	1.598	0.9969

표. 4.4. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 - 스위스 데이터.

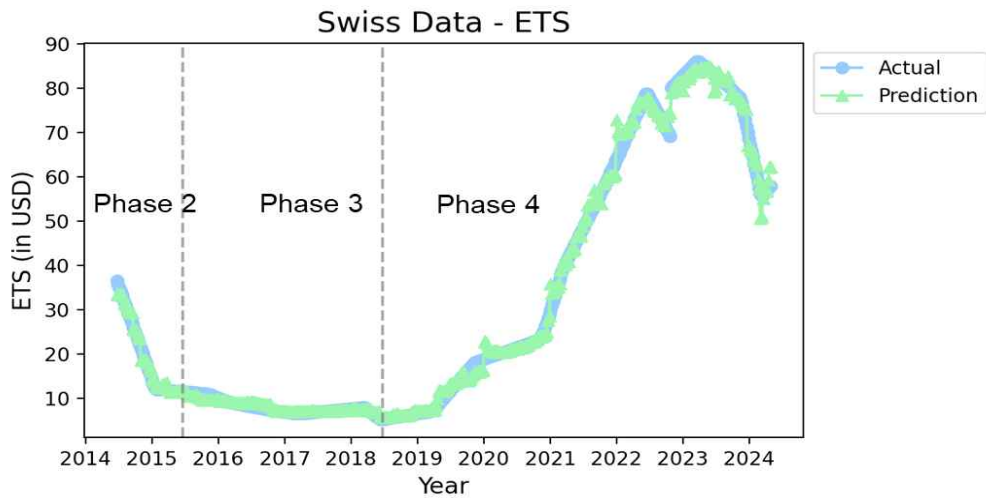
데이터 형	RMSE	R ²
훈련(Train)	1.2187	0.9981
검증(Validation)	1.6810	0.9961
테스트(Test)	1.7856	0.9964

표. 4.5. 훈련 CatBoost 회귀 모델의 평가 지표 - 퀘벡 데이터.

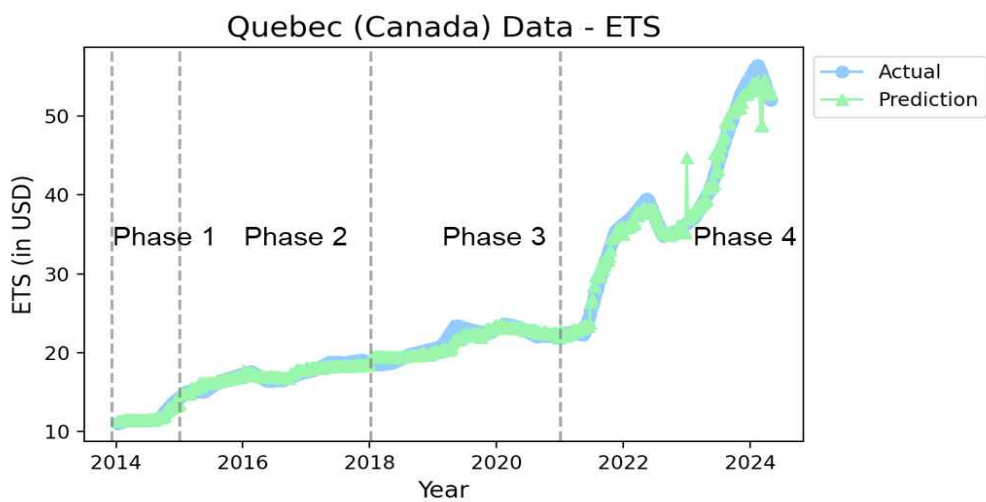
데이터 형	RMSE	R ²
훈련(Train)	0.8233	0.9949
검증(Validation)	0.9017	0.9922
테스트(Test)	1.0229	0.9915



(a)



(b)



(c)

그림 4.5 실제 ETS 가격과 예측된 ETS 가격의 비교 그래프: a) EU, b) 스위스 및 c) 퀘벡 데이터.

4.2.2. 전이 학습(transfer learning) 결과

전이 학습은 이전에 훈련된 모델을 사용하여 다른 지역의 ETS 가격을 평가하는 데 적용된다. 이 경우, 한국 데이터를 평가 데이터셋으로 사용한다. 예측을 수행하기 전에, 훈련된 모델은 ETS 초기 기간(특히 1단계 데이터)의 한국 입력 데이터를 사용하여 훈련 모델을 미세 조정(model fine-tuning)된다. 초기 단계 데이터는 새로운 시스템에 적응하는 참여자들의 행동과 독특한 변동성을 보이는 경향이 있기 때문이다. 이때 입력 특성은 훈련된 모델의 입력 특성과 동일한 순서를 유지해야 한다.

초기 단계 데이터를 사용하여 훈련된 모델을 fine-tuning한 후, 나머지 사용 가능한 기간 동안 ETS 가격이 추정된다. 실제 값과 예측 값의 비교 그래프에서(그림 4.6), 미세 조정된 모델이 1단계에서는 실제 값과 예측 값이 유사함을 보여 우수한 성능을 나타낸다. 또한, 2단계 초기 기간 동안 두 값은 매우 유사하지만, 이후 점차 차이를 보이기 시작한다. 2단계에서는 실제 ETS 가격이 예측 값보다 높게 나타나 실제 ETS 가격이 과대 평가되었을 가능성을 시사한다.

그 후, 실제 값과 예측 값은 2단계 말기와 3단계 초기에 다시 일치하는 경향을 보인다. 그러나 2022년 초 실제 ETS 가격이 상승함에 따라 예측 값은 여전히 낮게 추정되었다. 2022년 말, 실제 ETS 가격은 하락하기 시작해 2024년까지 감소세를 이어간다. 이 추세는 예측 ETS 가격이 실제 값보다 높게 유지되면서 실제 ETS 가격이 과소 평가되었을 가능성을 나타낸다. 추가적으로, 다른 기존 ETS 시스템들은 ETS 가격이 지속적으로 증가하는 추세를 보이며, 이는 한국의 경우와는 차이를 보인다.

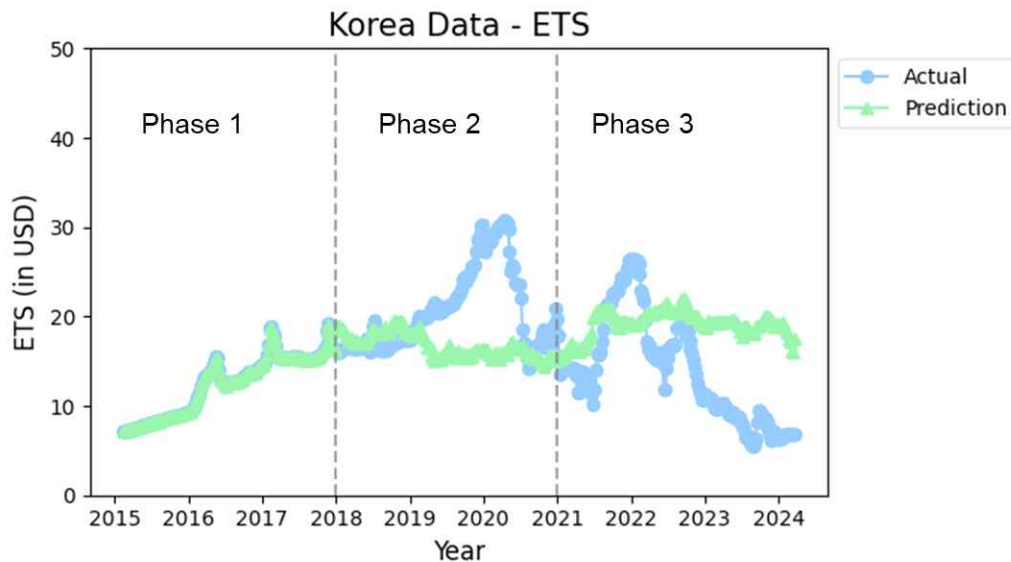


그림 4.6. 한국 사례에서 전이 학습(transfer learning) 방법을 활용한 ETS 가격의 실제 값과 예측 값 비교 분석.

4.2.3. 특성 변수별 배출권가격 영향 평가

특성 중요도(feature importance)는 CatBoost 모델에 내장된 도구를 사용하여 계산되며, “예측값 변화(prediction value change)”라는 방법이 적용된다. 이 방법은 특정 특성 값이 변경될 때 예측값이 평균적으로 얼마나 변하는지를 측정한다 (Prokhorenkova et al., 2018). 중요도 값이 클수록 예측값에 미치는 평균적인 영향이 크다는 것을 의미한다. 특성 중요도 분석은 각 지역의 데이터를 별도로 분석하며, 지역마다 특성 중요도 순위가 다를 수 있음을 고려한다(그림 4.7 - 4.10). 또한, 각 지역별로 가장 중요한 상위 10개의 특성을 제시한다(표 4.6; 표 4.7).

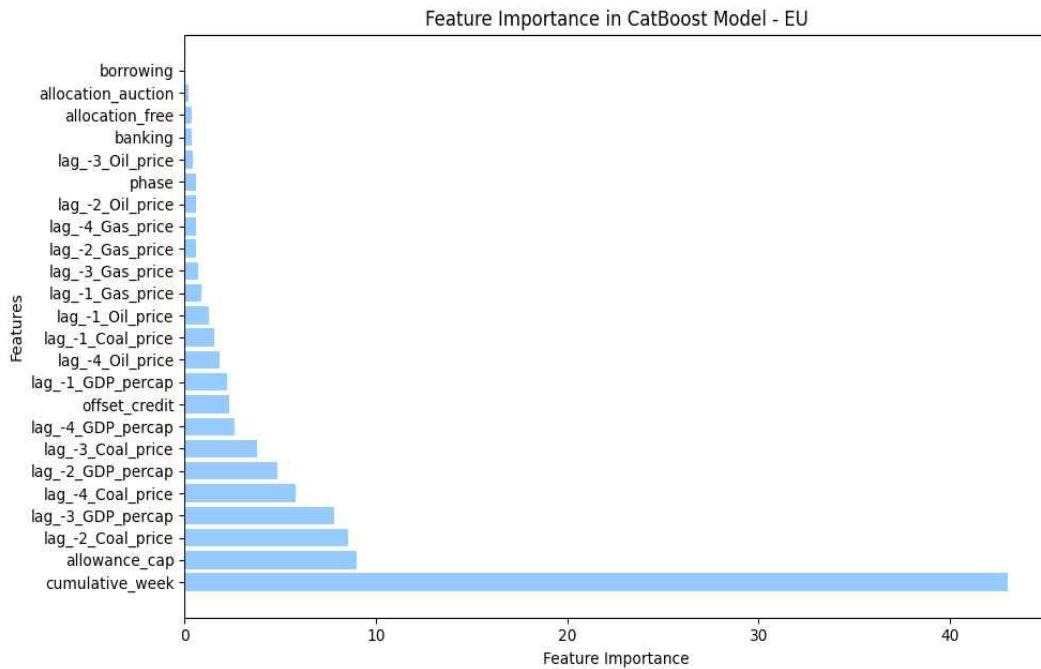


그림 4.7. EU 데이터의 특성 중요도 결과.

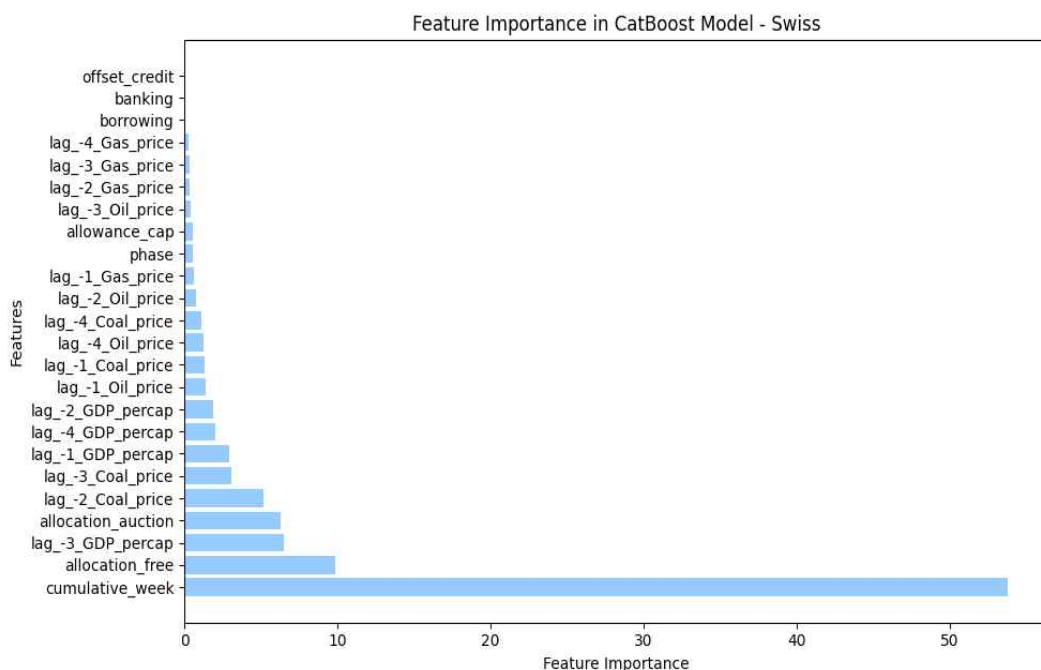


그림 4.8. 스위스 데이터의 특성 중요도 결과.

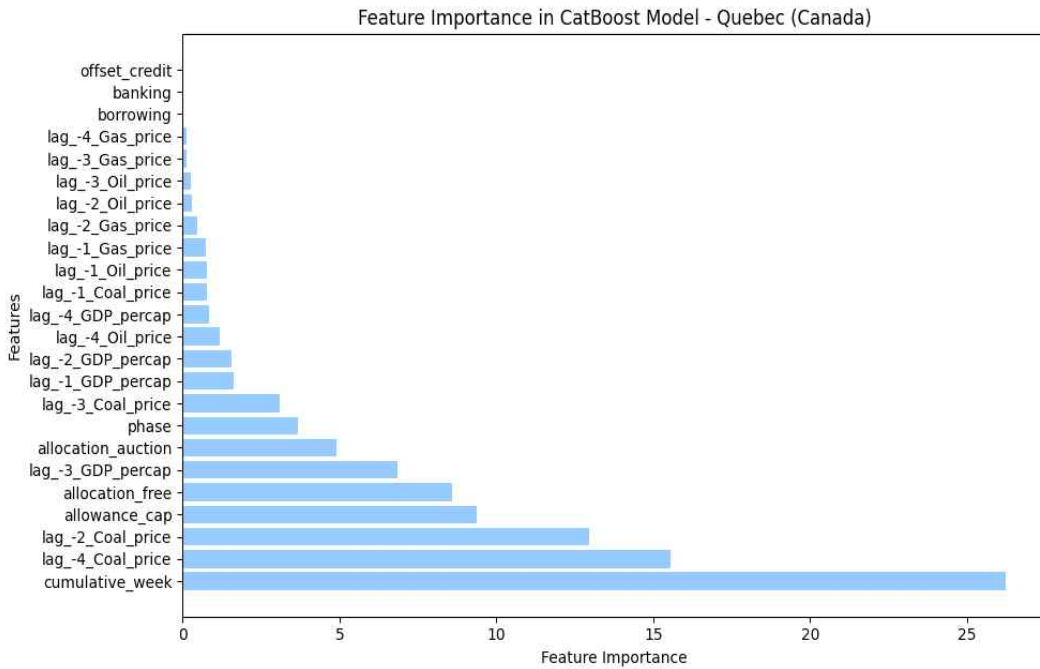


그림 4.9. 퀘벡 데이터의 특성 중요도 결과.

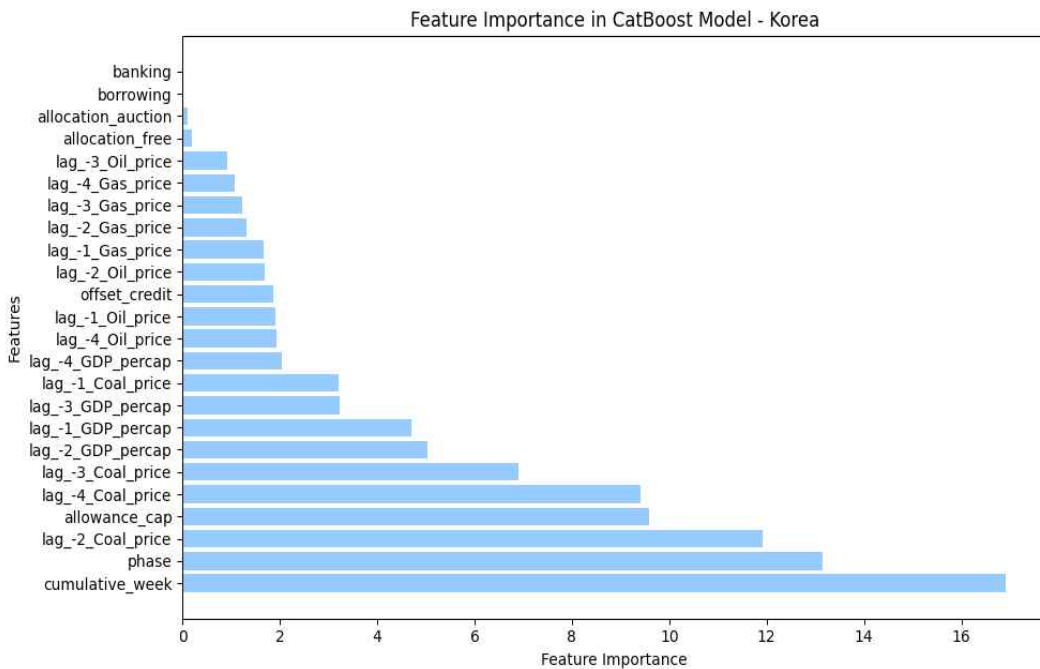


그림 4.10. 한국 데이터의 특성 중요도 결과.

표. 4.6. 상위 10개 주요 특성 결과 - EU 및 스위스 데이터.

No	EU		Swiss	
	Feature	Importance value	Feature	Importance value
1	cumulative_week	42.992	cumulative_week	53.751
2	allowance_cap	8.978	allocation_free	9.842
3	lag_-2_Coal_price	8.568	lag_-3_GDP_percap	6.481
4	lag_-3_GDP_percap	7.808	allocation_auction	6.307
5	lag_-4_Coal_price	5.802	lag_-2_Coal_price	5.151
6	lag_-2_GDP_percap	4.854	lag_-3_Coal_price	3.056
7	lag_-3_Coal_price	3.775	lag_-1_GDP_percap	2.908
8	lag_-4_GDP_percap	2.624	lag_-4_GDP_percap	1.981
9	offset_credit	2.317	lag_-2_GDP_percap	1.856
10	lag_-1_GDP_percap	2.236	lag_-1_Oil_price	1.352

표. 4.7. 훈상위 10개 주요 특성 결과 - 퀘벡 및 한국 데이터.

No	Quebec (Canada)		Korea	
	Feature	Importance value	Feature	Importance value
1	cumulative_week	26.214	lag_-2_Coal_price	18.717
2	lag_-4_Coal_price	15.540	phase	14.262
3	lag_-2_Coal_price	12.942	cumulative_week	12.476
4	allowance_cap	9.376	lag_-4_Coal_price	8.429
5	allocation_free	8.592	lag_-3_Coal_price	6.464
6	lag_-3_GDP_percap	6.856	lag_-1_Coal_price	5.740
7	allocation_auction	4.905	lag_-2_GDP_percap	4.591
8	phase	3.684	lag_-4_GDP_percap	4.341
9	lag_-3_Coal_price	3.081	lag_-1_GDP_percap	3.408
10	lag_-1_GDP_percap	1.629	lag_-3_GDP_percap	3.359

특성 중요도 결과에 따르면, 한국 제외한 모든 국가에서 가장 중요한 특성은 누적 주차(cumulative week)로 나타났다. 이는 ETS의 시간적 변화와 추가적인 발전이 ETS 가격에 영향을 미친다는 것을 시사한다. 이를 더 탐구하기 위해, 누적 주차와 다른 특성들 간의 상호작용(interaction)을 분석하였다. 분석 결과에 따르면, 누적 주차 특성은 ETS 메커니즘의 주요 변수들(배출 할당량 상한, 무상 할당, 경매 할당, 이월, 그리고 상쇄 크레딧과 상대적으로 높은 상호작용을 보이는 것으로 나타났다(표 4.8). 또한, ETS 메커니즘 변수들의 특성 중요도 유의미한 것으로 평가

되었다.

ETS가 진행됨에 따라, 배출 할당량 상한은 일반적으로 감소하여 배출 제한을 강화하는데, 이는 ETS 가격 상승을 유도할 것으로 예상된다(그림 4.11). 그러나, 한국의 경우에는 배출 할당량 상한이 증가하는 경향이 나타났다. 더불어, 무상 할당에서 경매 기반 할당으로의 전환은 시간적 변화에 반영되어 가격 변동에 영향을 미친다. 이러한 결과는 ETS 가격 패턴이 시간에 따라 변화할 뿐만 아니라, ETS 메커니즘과 정책 도구에 의해 크게 영향을 받는다는 점을 보여준다.

표. 4.8. 누적 주차와 다른 특성들 간의 상호작용 분석 결과.

No	Feature 1	Feature 2	Interaction Strength Value
1	cumulative_week	allocation_free	4.531
2		allowance_cap	4.192
3		allocation_auction	3.869
4		offset_credit	1.683
5		banking	1.343

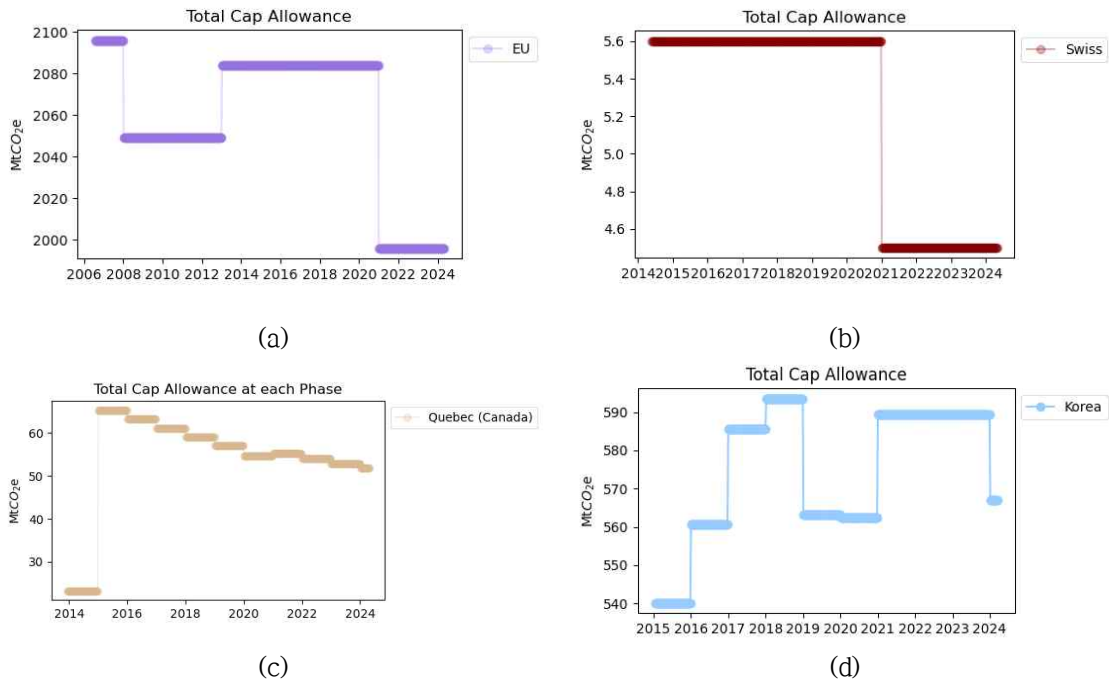


그림 4.11. 각 국가의 배출 할당량 상한: a) EU, b) 스위스, c) 퀘벡 및 d) 한국.

ETS 메커니즘 변수들 외에도, 글로벌 석탄 가격의 2주 및 4주 시차(lag)는 ETS 가격에 높은 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 순위는 국가별로 약간 다르다. 패턴이 완전히 동일하지는 않지만, 글로벌 석탄 가격과 ETS 가격의 비교 그래프를 통해 석탄 가격 추세가 크게 상승할 경우, 특히 2022년 시점으로 ETS 가격이 뒤따라 상승하는 경향이 자주 관찰되었다(그림 4.12). 2022년 때 글로벌 석탄 가격의 상승은 COVID-19와 지정학적 긴장과 같은 글로벌 상황에 기인한 것으로 해석한다.

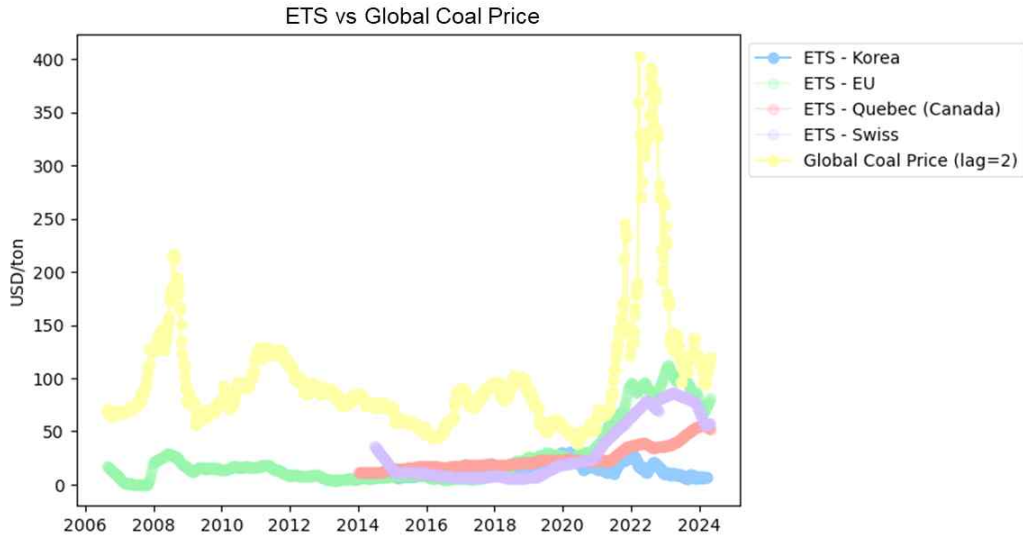


그림 4.12. 각 국가의 ETS 가격 및 글로벌 석탄 가격.

글로벌 석탄 가격 외에도, 1인당 GDP는 각 국가에서 ETS 가격에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지역 특화 경제 변수로서 1인당 GDP는 경제 상황과 산업 활동을 모두 반영한다. 1인당 GDP가 높은 지역은 일반적으로 더 엄격한 배출 할당량 상한을 시행하는 경향이 있어 ETS 가격 상승으로 이어질 수 있다. 이러한 경향은 특히 스위스에서 두드러지게 나타나며(그림 4.13), 특성 중요도 분석에서 1인당 GDP는 세 번째로 중요한 특성으로 평가되었다. 추가 분석을 통해 각 포함 부문의 GDP 기여도를 조사하면 이 관계를 더 잘 이해할 수 있을 것이다. 그러나 데이터의 한계로 인해 현재 연구에서는 수행하지 않다.

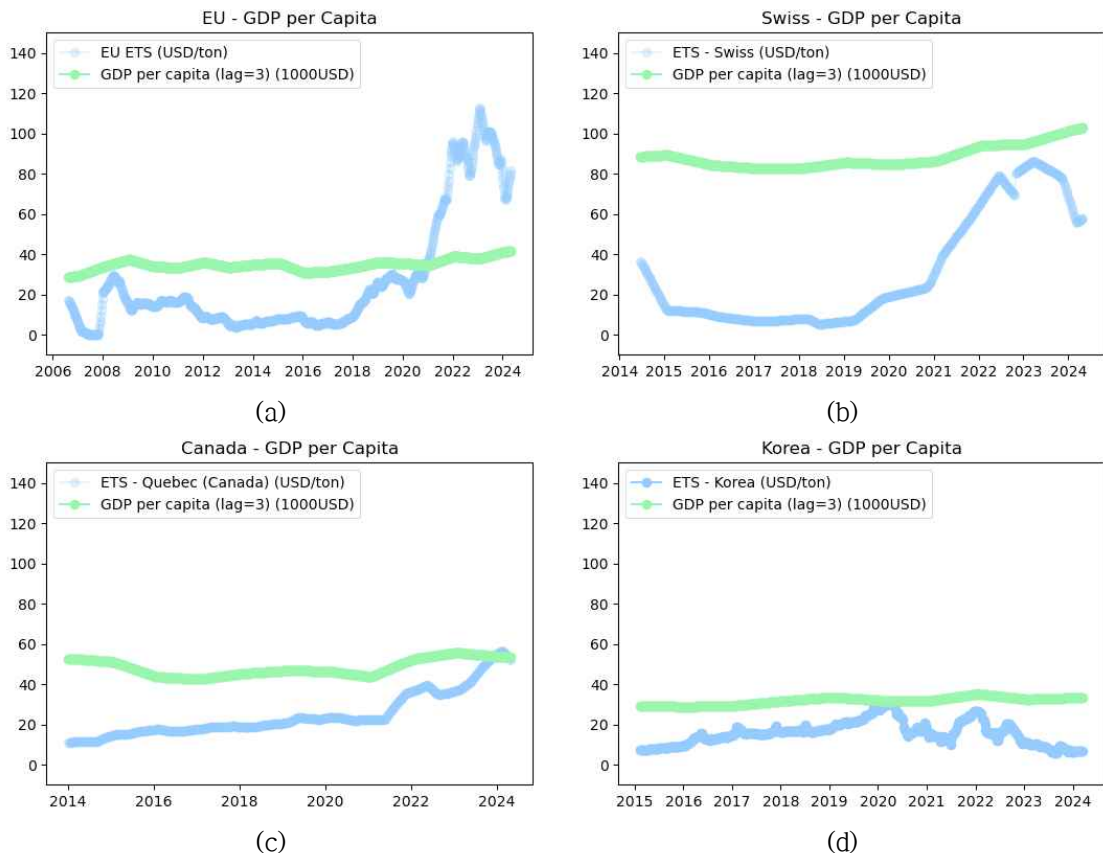


그림 4.13. 각 국가의 1인당 GDP 데이터: a) EU, b) 스위스, c) 퀘벡 및 d) 한국.

○ 각 국가별 요약 분석 - EU

누적 주차(cumulative week) 특성은 가장 높은 중요도 값을 가지며, 이는 ETS 메커니즘의 성숙도를 반영한다. 이는 두 번째로 중요한 특성으로 평가된 배출 할당량 상한에서도 잘 드러난다. 그 다음으로 글로벌 석탄 가격이 중요한 특성으로 나타났으며, 이는 EU가 여전히 석탄에 대한 높은 의존도를 가지고 있음을 시사한다.

또한, 높은 1인당 GDP는 증가하는 산업 및 에너지 수요와 연관되어 배출량을 증가시키고 ETS 할당량에 대한 수요를 높이는 것으로 나타났다. 마지막으로, 상쇄 크레딧 특성은 외부 배출 저감 프로젝트를 통해 참여자들이 상한을 충족할 수 있는 기회를 강조한다. 그러나 EU는 상쇄 크레딧 사용을 점진적으로 제한해 왔으며, 이에 따라 할당량에 대한 의존도가 증가하였고 이는 ETS 가격에 영향을 미쳤다.

○ 각 국가별 요약 분석 - 스위스

누적 주차(cumulative week) 특성은 가장 높은 중요도 값을 가지며, 이는 ETS 메커니즘의 성숙도를 반영한다. 이는 두 번째로 중요한 특성으로 평가된 무상 할당에서도 잘 나타납니다. 무상 할당 비율은 초기 단계에 비해 감소하였고, 이에 따라 네 번째로 중요한 특성인 경매 할당이 증가하였으며, 이는 ETS 가격 상승에 기여하고 있다. 앞서 설명한 바와 같이, 높은 1인당 GDP는 경제 활동도를 반영하며, 이는 배출량 증가로 이어져 상대적으로 높은 ETS 가격에 영향을 미친다. 마지막으로, 글로벌 석탄 및 석유 에너지 가격도 ETS 가격에 영향을 미쳤으며, 스위스가 여전히 화석 연료 기반 에너지에 의존하고 있을 가능성을 시사한다.

○ 각 국가별 요약 분석 - 퀘벡

누적 주차(cumulative week)은 ETS 설립 이후 시간적 발전을 반영하며 가장 중요한 특성으로 나타났다. 배출 할당량 상한, 무상 할당, 경매 할당, 그리고 단계(phase)와 같은 주요 ETS 메커니즘도 높은 특성 중요도를 기록하였다. 특히, 퀘벡의 ETS는 배출 할당량 상한이 점진적 감소/강화 되었으며, 이는 ETS 가격에 영향을 미쳤다. 글로벌 특성 중 석탄 가격이 배출권 가격에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 이는 퀘벡 ETS와 캘리포니아 ETS 간의 통합 및 일부 산업이 화석 연료 기반 생산에 의존하고 있음을 시사한다. 또한, 여러 시차(lagged) 1인당 GDP 특성은 경제 성장이 단기 및 중기적으로 배출량과 할당량 수요에 영향을 미친다는 것을 보여준다. 경제 활동은 산업 및 운송 부문의 배출을 증가시키며, 이는 퀘벡 ETS 프레임워크의 핵심 요소로 작용한다.

○ 각 국가별 요약 분석 - 한국

다른 기존 ETS 시스템과 달리, 한국 ETS에서는 석탄 가격이 가장 중요한 특성으로 나타났으며, 이는 전력 생산과 산업 활동에서 석탄에 대한 높은 의존도를 강조한다. 그 다음으로 중요한 특성은 누적 주차(cumulative week)와 단계(phase)로 평가되었다. 한편, 배출 할당량 상한은 특히 2021년과 2022년에 독특한 완화가 이루어진 것으로 나타났다. 이러한 정책 결정은 할당량의 희소성을 줄이고 해당 기간 동안 ETS 가격을 완화하는 데 기여했다. 또한, GDP 성장과 밀접하게 연결된 한국 ETS의 폭넓은 부문별 적용 범위도 ETS 가격 패턴의 주요 요인으로 관찰되었다.

전이 학습 방법을 활용한 가격 평가 결과에 따르면, 2024년에 배출 할당량 상한이 다시 강화되

기 시작했음에도 불구하고 ETS 가격이 예측 값보다 낮게 유지되고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 모델에 정책 특성 반영시 배출 할당량 상한을 신중하게 고려해야 할 필요성을 강조한다. 특히, 한국 ETS에서는 배출 할당량 상한과 무상 할당과 같은 ETS 메커니즘이 다른 기존 ETS 시스템에 비해 중요한 특성으로 평가되지 않았다. 다른 시스템에서는 ETS 메커니즘이 항상 가장 중요한 상위 10개 특성 중 하나로 평가되는 경향이 있지만, 한국 ETS에서는 이러한 메커니즘의 중요도가 상대적으로 낮게 나타났다.

V. 결론

본 연구는 배출권거래제도의 초기 이행을 강화하고 시장 리스크를 규명 및 해소하기 위해 두 가지 세부 과업을 수행하였다. 첫 번째 세부 과업은 국제 학술 논문을 수집하고 텍스트 분석과 동적 토픽 모델링을 적용해 ETS와 관련된 주요 주제와 시간적 변화를 분석하고, bibliometric 시각화를 통해 잠재적 리스크와 제도 개선 방안을 도출하였다. 두 번째 세부 과업은 ETS 메커니즘 변수를 포함한 머신러닝 모델을 훈련해 ETS 가격을 예측하고, 선택된 변수들이 ETS 가격에 미치는 영향을 평가하였다. 훈련된 모델은 전이 학습(transfer learning)을 통해 다른 지역의 ETS 가격을 예측하고 평가하는 데 활용되었다.

수집된 모든 논문의 키워드를 기반으로 누적 텍스트 분석의 실시한 결과, “메커니즘(mechanism),” “설계(design),” “할당(cap),” “가격(price)”이 가장 자주 등장하는 단어로 나타났으며, 이는 대부분의 연구가 이러한 측면에 초점을 맞추고 있음을 보여줬다. 분석을 통해 ETS 리스크와 밀접하게 관련된 가장 중요한 용어들이 드러났으며, 특히 ETS 설계와 메커니즘의 구조, 그리고 ETS의 상한과 가격 결정 방식이 주요한 관심사임이 확인되었다. 동적 토픽 모델링(Dynamic Topic Modeling, DTM) 통해 자세한 추가 텍스트 분석을 수행하였다. 시간 범위를 고려하여 분석은 초기, 중기, 최근의 세 시기로 나뉘며, 총 토픽 수(k)=3이 가장 의미 있는 분석 결과를 제공하는 것으로 선택되었다. 분석 결과는 토픽 1은 자원 할당에 초점을 맞추고, 토픽 2는 시범(pilot) 사업과 안전성을 강조하며, 토픽 3은 시장 메커니즘과 탄소 가격을 강조하는 것을 해석하였다.

CatBoost 모델은 세 국가의 데이터를 학습하였으므로 ETS 가격 예측을 위한 “글로벌 모델”로 여겨진다. 평가 지표 결과에서 작은 RMSE 값과 1에 가까운 R2 값이 관찰되어 훈련된 모델이 ETS 가격 예측에서 우수한 성능을 보임을 해석하였다. 전이 학습 결과, 실제 값과 예측 값의 비교 그래프에서, 미세 조정된 모델이 1단계에서는 실제 값과 예측 값이 유사함을 보여 우수한 성능을 나타냈다. 또한, 2단계 초기 기간 동안 두 값은 매우 유사하지만, 이후 점차 차이를 보이기 시작하였다. 실제 ETS 가격은 하락하기 시작해 2024년까지 감소세를 이어간다는 것을 보였다. 이 추세는 예측 ETS 가격이 실제 값보다 높게 유지되면서 ETS 가격이 과소 평가되었을 가능성을 나타낸다 것을 시사하였다. 다른 기존 ETS 시스템들은 ETS 가격이 지속적으로 증가하는 추세를 보이며, 이는 한국의 경우와는 차이를 보였다. 특성 중요도 결과에 따르면, 한국 제외한 모든 국가에서 가장 중요한 특성은 누적 주차(cumulative week)로 나타났다. 이는 ETS의 시간적 변화와 추가적인 발전이 ETS 가격에 영향을 미친다는 것을 시사하였다. 이를 더 분석하기 위해, 누적 주차와 다른 특성들 간의 상호작용(interaction)을 분석하였다. 분석 결과에 따르면, 누적 주차 특성은 ETS 메커니즘의 주요 변수들과 상대적으로 높은 상호작용을 보이는 것으로 나타났다. ETS 메커니즘 변수들의 특성 중요도 유의미한 것으로 평가되었다.

본 연구의 결과는 ETS 메커니즘의 잠재적 위험과 주요 요인에 대한 핵심적인 통찰을 제공하였다. 본 연구의 결과는 정책 입안자들에게 더 적응적이고 투명한 ETS 프레임워크를 개발하기 위한 로드맵을 제시한다. 전이 학습의 활용은 새로운 지역에서도 확장 가능한 예측 접근법의 가능성을 입증하며, 특성 중요도 분석은 가격 안정성에 영향을 미치는 주요 상호작용을 밝혀낸다. 텍스트 분석과 머신러닝을 결합함으로써, 본 연구는 탄소 시장 전략을 정교화하고 환경 정책 연구를 발전시키는 데 있어 융합적 접근법의 가치를 강조한다.

부록

CatBoost 모델은 범주형 특성을 Gradient Boosting 방법에 포함하도록 개발되었다 (Prokhorenkova et al., 2018). Gradient Boosting은 그래디언트 강하법(Gradient Descent)과 부스팅(Boosting)을 결합하여 개발된 강력한 머신러닝 기법으로, 다양한 실무 작업에서 최첨단 성능을 달성한다 (Friedman, 2001; Natekin & Knoll, 2013). Gradient Boosting의 가장 널리 사용되는 구현은 의사결정 트리를 기본 예측기로 사용하는 방식이다. 의사결정 트리는 일반적으로 숫자형 특성에 적합하지만, 많은 데이터셋에는 범주형 특성도 포함되는 경우가 많다.

Gradient Boosting 기술은 지도 학습 방식의 머신러닝 기법으로, 입력 값 x_i 와 출력 값 y_i 의 집합 $\{x_i, y_i\}, i = 1, \dots, n$ 이 필요하다. Gradient Boosting 은 손실 함수 $L(y, F^t)$ 가 주어졌을 때, 함수 $F^0, F^1, \dots, F^t, \dots, F^m$ 의 집합을 반복적으로 구성하는 접근 방식을 취합니다. 여기서 손실 함수는 i -번째에서 예상 출력 값 y_i 와 t -번째 함수 F^t 가 y_i 를 추정하는 관계를 나타낸다. y_i 추정치를 개선하는 방법은 또 다른 함수 h^{t+1} 를 찾아 손실 함수의 기대값을 최소화하는 것이다.

$$h^{t+1} = \operatorname{argmin}_{h \in H} L(y, F^t + h)$$

H 는 앙상블에 추가할 의사결정 트리를 평가하는 후보 집합이다. 손실 함수의 기대값은 F^t 와 h^{t+1} 를 기준으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(y, F^{t+1}) = L(y, F^t + h^{t+1})$$

CatBoost 모델과 그래디언트 부스팅의 몇 가지 차이점은 다음과 같다 (Hancock & Khoshgoftaar 2020; Prokhorenkova et al., 2018). 범주형 변수를 처리하기 위한 한 가지 전략은 Ordered Target Statistic (Ordered TS)으로 알려진 타겟 통계를 사용하는 것이다. 이는 범주형 값을 원-핫 인코딩을 사용하지 않을 때 인코딩하는 방법으로 활용된다. Ordered TS 계산에서 가장 중요한 개념은 훈련 데이터셋과 테스트 데이터셋 간의 구분에 기반을 둔다. Gradient Boosting Decision Tree (GBDT)를 훈련하고 평가하기 위해 사용 가능한 모든 데이터를 D 로 정의한다. 이 중 일부 데이터는 Decision Tree h^{t+1} 를 학습하는 데 사용되고, 나머지 일부는 손실 함수 $L(y, F^t + h^{t+1})$ 를 최소화하기 위해 h^{t+1} 을 찾는 데 사용된다. CatBoost는 데이터를 랜덤 순열로 배치하며, 이 순열에서 k -번째 요소 이전의 데이터 하위집합을 D_k 로 정의한다. D_k 는 Decision Tree h^{t+1} 를 훈련하는 데 사용되며, 전체 데이터셋 D 는 손실 함수를 최소화하도록 h^{t+1} 을 평가하고 보장하는 데 사용된다. 범주형 특성을 인코딩하기 위해 CatBoost는 지시 함수(Indicator Function) $1_{a=b}$ 를 활용하는데, 이는 두 값이 동일할 때 1, 그렇지 않을 때 0으로 설정된다. 이 함수는 범주형 특성을 수치 값으로 매핑하는 데 중심적인 역할을 하며, 타겟 누출(target leakage)을 방지한다. 범주형 특성의 인코딩된 값은 사전 통계(prior statistics)와 지시 함수의 기여를 결합하여 과적합(overfitting)을 최소화한다.

다른 차이점으로는 특성 결합(feature combinations)과 빠른 스코어링(fast scorer)이 있다 (Huang et al., 2019; Prokhorenkova et al., 2018). 모든 범주형 특성은 새로운 특성으로 결합될 수 있다. 트리를 위한 새로운 분할(split)을 구성할 때, CatBoost는 이러한 결합을 고려하기 위해 탐욕적 접근법(greedy approach)을 사용한다. 트리의 첫 번째 분할에서는 어떤 결합도 고려되지 않지만, 두 번째 및 이후의 분할에서는 데이터셋 내 모든 범주형 특성과 모든 사전 설정된 결합(preset

combinations)을 결합한다. 트리에서 선택된 모든 분할은 두 개의 값으로 구성된 범주로 간주되며, 이후 결합에서도 사용된다. Fast scorer을 위해 CatBoost는 기본 예측기로 oblivious trees(균형 트리)**를 사용한다. Oblivious trees는 트리의 전체 레벨에서 동일한 분할 기준을 사용하는 트리로, 균형을 이루며 과적합(overfitting)에 덜 취약하다. 반면, Oblivious Trees에서는 각 리프(leaf) 인덱스가 트리의 깊이와 동일한 길이의 이진 벡터로 인코딩된다. 이러한 설계는 CatBoost의 계산 속도를 높이고, 복잡성을 줄이며, 예측 성능을 개선하는 데 기여한다.

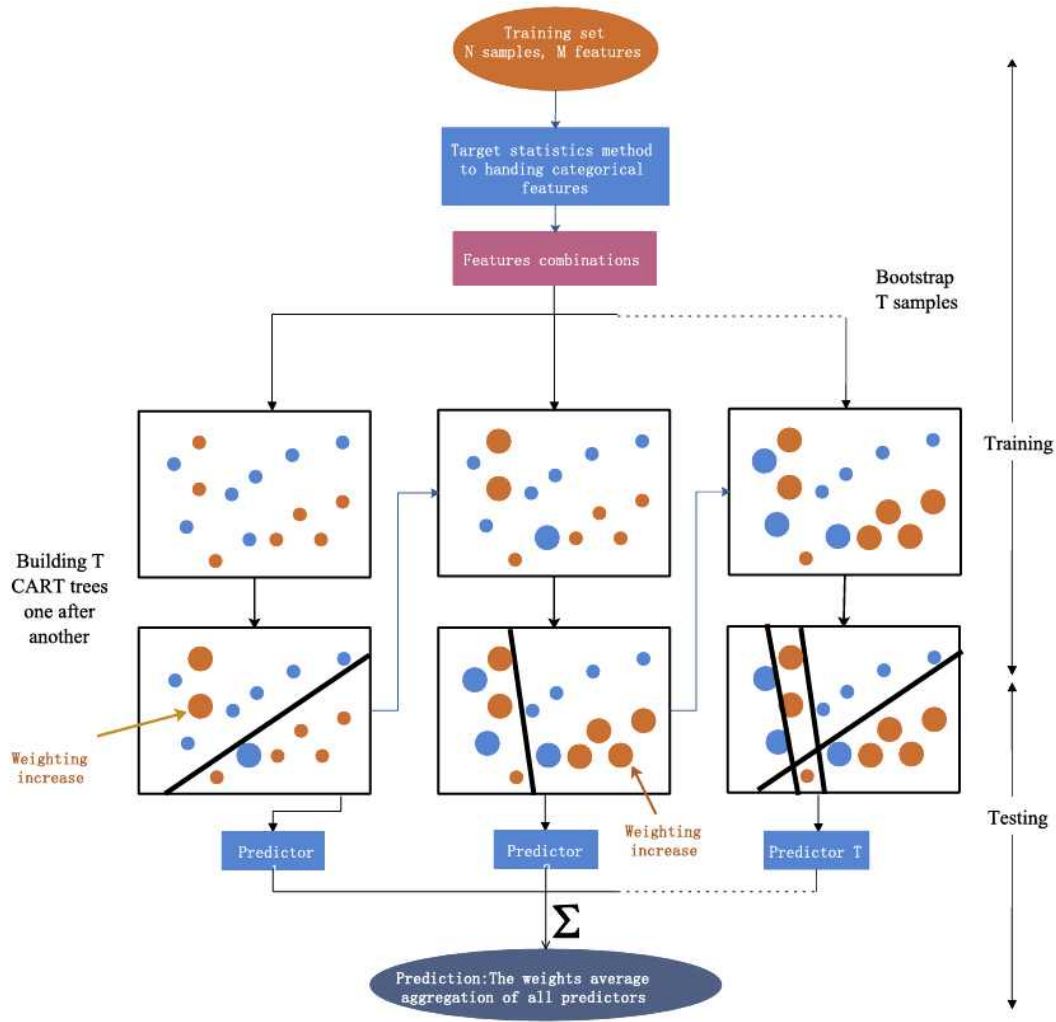


그림 A.1. CatBoost 알고리즘의 구조(Huang et al., 2019).

참고문헌

- Abdullah, M. & Said, S. (2023). Performance Evaluation of Machine Learning Regression Models for Rainfall Prediction. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3258529/v1>
- Bhati, N. S., & Khari, M., 2021. A new intrusion detection scheme using CatBoost classifier. In Forthcoming Networks and Sustainability in the IoT Era: First EAI International Conference, FoNeS-IoT 2020, Virtual Event, October 1-2, 2020, Proceedings 1 (pp. 169-176). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69431-9_13
- Blei, D. M., & Lafferty, J. D. (2006, June). Dynamic topic models. In Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning (pp. 113-120). <https://doi.org/10.1145/1143844.1143859>
- Cao, Y., Zha, D., Wang, Q., & Wen, L. (2023). Probabilistic carbon price prediction with quantile temporal convolutional network considering uncertain factors. *Journal of Environmental Management*, 342, 118137. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118137>
- De Perthuis, C., & Trotignon, R. (2014). Governance of CO2 markets: Lessons from the EU ETS. *Energy Policy*, 75, 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.033>
- Deng, M. Z., & Zhang, W. X. (2019). Recognition and analysis of potential risks in China's carbon emission trading markets. *Advances in Climate Change Research*, 10(1), 30-46. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.03.004>
- Dong, H., Hu, Y., Yang, Y., & Jiang, W. (2023). A multi-strategy integration prediction model for carbon price. *Energies*, 16(12), 4613. <https://doi.org/10.3390/en16124613>
- Dorogush, A. V., Ershov, V., & Gulin, A., 2018. CatBoost: gradient boosting with categorical features support. arXiv preprint arXiv:1810.11363. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.11363>
- EDF (Environmental Defense Fund). 2013. Switzerland, The World's Carbon Markets: A Case Study Guide to Emissions Trading. https://www.edf.org/sites/default/files/EDF_IETA_Switzerland_Case_Study_May_2013.pdf
- EDF (Environmental Defense Fund). 2015. Québec, The World's Carbon Markets: A Case Study Guide to Emissions Trading. <https://www.edf.org/sites/default/files/quebec-case-study-may2015.pdf>
- EU Climate Action (n.d.). Development of EU ETS (2005-2020). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en
- Friedman, J. H., 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 29(5), 1189-1232. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
- Guillén-Pacho, I., Badenes-Olmedo, C., & Corcho, O. (2024). Dynamic topic modelling for exploring the scientific literature on coronavirus: an unsupervised labelling technique. *International Journal of Data Science and Analytics*, 1-31. <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00610-0>
- Hancock, J. T., & Khoshgoftaar, T. M. (2020). CatBoost for big data: an interdisciplinary review. *Journal of big data*, 7(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00369-8>.

- Hanoteau, J., & Talbot, D. (2019). Impacts of the Québec carbon emissions trading scheme on plant-level performance and employment. *Carbon Management*, 10(3), 287–298. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.159515>
- He, S. et al. (2019). Mapping economic drivers of China’s NOx emissions due to energy consumption. *J. Clean. Prod.* 241, 118130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118130>.
- Hintermann, B., Peterson, S., & Rickels, W. (2016). Price and Market Behavior in Phase II of the EU ETS: A Review of the Literature. *Review of Environmental Economics and Policy*. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1093/reep/rev015>
- Huang, G., Wu, L., Ma, X., Zhang, W., Fan, J., Yu, X., ... & Zhou, H. (2019). Evaluation of CatBoost method for prediction of reference evapotranspiration in humid regions. *Journal of Hydrology*, 574, 1029–1041. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.085>
- Ibrahim, A., Muhammed, M. M., Sowole, S. O., Raheem, R., & Abdulaziz, R. O. (2020). Performance of CatBoost classifier and other machine learning methods.
- ICAP, 2023. ETS Brief #9. https://icapcarbonaction.com/system/files/document/icap_briefs-en-brief-9.pdf
- ICAP, 2024. Welcome to the ICAP ETS Map. <https://icapcarbonaction.com/en/ets>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, and J. Malley (Eds.)]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Ji, C.-J., Hu, Y.-J., Tang, B.-J., Qu, S. (2021). Price drivers in the carbon emissions trading scheme: evidence from Chinese emissions trading scheme pilots. *J. Clean. Prod.* 278, 123469 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123469>.
- Jung, H., & Song, C. K. (2023). Effects of emission trading scheme (ETS) on change rate of carbon emission. *Scientific Reports*, 13(1), 912. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28154-6>
- Jung, S. I., Ho, S. D., & Kim, J. 2023. Word Cloud Techniques for Data Analysis. *Proceedings of the IEOM International Conference on Smart Mobility and Vehicle Electrification*. <https://ieomsociety.org/proceedings/2023detroit/123.pdf>
- Kim, E., Ahn, Y., & Ryu, D. (2014). Application of the carbon emission pricing model in the Korean market. *Energy & environment*, 25(1), 63–78. <https://www.jstor.org/stable/43735591>
- Kim, H., Kim, Y., Ko, Y., & Han, S. (2022). Performance Comparison of Predictive Methodologies for Carbon Emission Credit Price in the Korea Emission Trading System. *Sustainability*, 14(13), 8177. <https://doi.org/10.3390/su14138177>
- Lee, M. 2019. Tomotopy (Version, 0.13). <https://github.com/bab2min/tomotopy>
- Li, H., Huang, X., Zhou, D., Cao, A., Su, M., Wang, Y., & Guo, L. (2022). Forecasting carbon price in China: a multimodel comparison. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 6217. <https://doi.org/10.3390/ijerph19106217>
- Michaelowa, A., Shishlov, I., & Brescia, D. (2019). Evolution of international carbon markets: lessons for the Paris Agreement. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(6), e613. <https://doi.org/10.1002/wcc.613>

- Mueller, A. C. (2024). Wordcloud (1.9.4). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14062883>
- Narassimhan, E., Gallagher, K. S., Koester, S., & Alejo, J. R. (2018). Carbon pricing in practice: A review of existing emissions trading systems. *Climate Policy*, 18(8), 967-991. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1467827>
- Natekin, A., & Knoll, A. (2013). Gradient boosting machines, a tutorial. *Frontiers in neurorobotics*, 7, 21. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2013.00021>
- Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: unbiased boosting with categorical features support. <https://catboost.ai/docs/en/>
- Shahzad, U., Sengupta, T., Rao, A., & Cui, L. (2023). Forecasting carbon emissions future prices using the machine learning methods. *Annals of Operations Research*, 1. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05188-7>
- Uddin, N., & Holtedahl, P. (2013). Emission trading schemes—avenues for unified accounting practices. *Journal of cleaner production*, 52, 46-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.017>
- Vöhringer, F. (2012). Linking the Swiss emissions trading system with the EU ETS: economic effects of regulatory design alternatives. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 148, 167-196. <https://doi.org/10.1007/BF03399365>
- Vollebergh, H. R., & Brink, C. (2020). What can we learn from EU ETS?
- Wang, Q. & Zhang, F. (2020). Does increasing investment in research and development promote economic growth decoupling from carbon emission growth? An empirical analysis of BRICS countries. *J. Clean. Prod.* 252, 119853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119853>.
- Wang, M., Zhu, M., & Tian, L. (2022). A novel framework for carbon price forecasting with uncertainties. *Energy economics*, 112, 106162. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106162>
- World Bank. (n.d.). Putting a Price on Carbon with an ETS. Retrieved January 5, 2024, from https://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/Climate/background-note_ets.pdf
- Yahşi, M., Çanakoglu, E., & Ağralı, S. (2019). Carbon price forecasting models based on big data analytics. *Carbon Management*, 10(2), 175-187. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1568138>
- Zhang, K., Yang, X., Wang, T., Thé, J., Tan, Z., & Yu, H. (2023). Multi-step carbon price forecasting using a hybrid model based on multivariate decomposition strategy and deep learning algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 405, 136959. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136959>
- Zhang, X., Li, Z., Zhao, Y., & Wang, L. (2023b). Carbon trading and COVID-19: a hybrid machine learning approach for international carbon price forecasting. *Annals of Operations Research*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05327-0>
- Zhao, D. Q., Wang, W. J., & Luo, Z. G. (2018). A Brief Overview of China's ETS pilots. Singapore: Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-1888-7>
- Zhu, B., Wei, Y. (2013). Carbon price forecasting with a novel hybrid ARIMA and least squares support vector machines methodology. *Omega*, 41(3), 517-524. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.06.005>.

기획재정부·환경부, 2017. 제2차 배출권거래제 기본계획.

https://www.moef.go.kr/com/cmm/fms/FileDown.do?atchFileId=ATCH_000000000003839&fileSn=3

기획재정부·환경부, 2019. 제3차 배출권거래제 기본계획.

https://www.gir.go.kr/home/board/read.do;jsessionid=6oF30HRjFmfs3Hvyl1CXgnYqTqPRs8uaPAV8MLml1bCVbgsfnU4hBXuPgB0CbL3X.og_was2_servlet_engine1?pagerOffset=500&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10&boardMasterId=3&boardId=1068

본 연구보고서의 내용은 연구자의 의견이며,
(재)숲과나눔의 공식적인 견해와는 다를 수 있습니다.