

2025 인재양성 프로그램  
연구자 최종 결과보고서

# 석탄화력발전소 조기 폐쇄를 위한 실물 옵션: 독일 탈석탄 정책 사례 연구

Real Option Analysis for Early Retirement of  
Coal-fired Power Plants with a Case Study of the German Coal  
Phase-out Policy

2025. 11. 12.

이 영 주

## 제 출 문

재단법인 숲과나눔 이사장 귀하

본 보고서를 “리얼 옵션 분석을 활용한 석탄화력발전소 조기 폐쇄 좌초자산 분석 및 탈석탄 정책 사례연구”의 최종 연구 결과보고서로 제출합니다.

2025년 11월 12일

연구 원 : 이 영 주(특정주제연구자)

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

## 결과보고서 초록

| 연구원  | 이영주                  | 구분   | 특정주제 연구 장학생 |
|------|----------------------|--|-------------|
| 연구제목 | 한글                   | 석탄화력발전소 조기 폐쇄를 위한 실물 옵션 분석: 독일 탈석탄 정책 사례 연구  |             |
|      | 영문                   | Real Option Analysis for Early Retirement of Coal-fired Power Plants with a Case Study of the German Coal Phase-out Policy |             |
| 연구기간 | 2025.3.1 ~ 2025.9.30 |  |             |
| 색인어  | 한글                   | 석탄발전소 조기폐쇄, 좌초자산, 실물옵션 분석, 독일 탈석탄 정책, 역경매  |             |
|      | 영문                   | Coal Phase-out, Early Retirement, Stranded Asset, Real Option Analysis, German Coal Phase-out                              |             |

탄소중립 달성을 위한 석탄화력발전소 조기 폐쇄는 필수적이거나, 좌초자산 위험과 보상금 책정의 어려움이 따른다. 특히, 전통적인 가치평가 방식은 미래의 불확실성과 정책 변화에 따른 경영의 유연성을 제대로 반영하지 못한 채 보상금 책정의 근거로서 주로 활용되었다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하고자 실물옵션 분석을 적용하여, 독일의 석탄화력발전소 조기 폐쇄를 위한 역경매 정책 사례를 분석하였다. 이를 위해 미국형 포기 옵션 모델과 최소제공 몬테카를로 시뮬레이션 및 동적 프로그래밍을 활용하였으며, 독일 정부의 경매 입찰 상한가를 행사가격으로 설정하여 발전소 소유자의 최적 폐쇄 전략을 도출하였다. 분석 결과, 낮은 가격 변동성 하에서는 대상 자산의 지속적인 음(-)의 수익성으로 인해 현 경매 상한가가 다소 높게 설정되었을 가능성이 시사되었다. 한편, 탄소 가격 상승은 발전소 수익성을 더욱 악화시켜 보상금을 받고 조기 폐쇄하는 것이 경제적으로 합리적 선택임을 확인하였다. 설비이용률, 탄소 가격 등이 주요 폐쇄 결정 요인이었고, 모델 분석 결과는 실제 독일 경매 참여 발전소 특성에도 부합했다. 결론적으로, 실물옵션 분석은 정책 입안자의 효과적인 폐쇄 지원 정책 설계와 발전 사업자의 최적 의사결정을 위한 유용한 도구로서의 가능성을 제시한다.

# 요 약 문

## I. 제 목

석탄화력발전소 조기 폐쇄를 위한 실물 옵션 분석: 독일 탈석탄 정책 사례 연구

## II. 연구의 목적 및 필요성

탄소중립 목표 달성을 위해 전세계적으로 석탄화력발전소(Coal-fired Power Plant, CFPP)의 조기 폐쇄는 필수적인 과제가 되었으나, 이 과정에서 발생하는 '좌초자산(Stranded Asset)' 위험과 이에 대한 공정하고 효율적인 보상금 책정은 큰 난제로 남아있습니다.

전통적인 할인현금흐름(Discounted Cash Flow, DCF) 기반의 가치평가 방식은 미래 시장의 불확실성(예: 전력 가격, 연료 가격, 탄소 가격 변동)과 정책 변화에 대응하는 기업의 경영 유연성(예: 폐쇄 시점 선택)의 가치를 제대로 반영하지 못하는 한계를 지닙니다. 이러한 평가는 보상금 산정의 근거로 활용될 경우, 과다 또는 과소 보상의 문제를 야기할 수 있습니다.

독일은 2020년 탈석탄법을 통해 CFPP 조기 폐쇄 보상 방식으로 '역경매(Reverse Auction)'를 도입한 최초의 국가입니다. 이는 발전 사업자 간의 경쟁을 통해 정보 비대칭성을 완화하고 비용 효율적인 폐쇄를 유도하기 위한 시도였으나, 실제 운영 과정에서 경매 참여율 부족, 보상금 수준의 적절성 등에 대한 엇갈린 평가가 존재합니다.

따라서 본 연구는 미래의 불확실성과 경영의 유연성을 정량적으로 평가할 수 있는 '실물 옵션 분석(Real Option Analysis, ROA)' 방법론을 적용하고자 합니다. 독일의 역경매 사례를 중심으로, 불확실한 시장 환경 하에서 CFPP 운영자의 최적 조기 폐쇄 전략을 분석하고, 효과적인 탈석탄 정책 설계 및 보상 메커니즘에 대한 정책적, 산업적 함의를 도출하는 것을 목적으로 합니다.

## III. 연구의 내용 및 범위

본 연구는 독일의 무연탄 CFPP(대표 사례: 만하임 발전소)를 대상으로, 조기 폐쇄 결정을 '미국형 포기 옵션(American Put Option)'으로 개념화하여 분석을 수행했습니다.

- 모델 설계: 발전소 운영자가 정해진 기간(2021-2028년) 내에 언제든지 조기 폐쇄를 선택하고 보상금을 받을 수 있는 권리로 모델링했습니다. 이때 옵션의 '행사가격(Strike Price)'은 독일 정부가 법적으로 고시한 '역경매 입찰 상한가'로 설정하였습니다. 이는 정부가 지급할 용의가 있는 최대 보상 수준을 의미합니다.

- 불확실성 모델링: CFPP 수익성에 가장 큰 영향을 미치는 '전력 가격'과 '석탄 가격'을 주요 불확실성 요인으로 선정하고, 두 변수 간의 상관관계를 고려한 '오르슈타인-올렌베크(OU) 확률 과정'으로 모델링했습니다.

- 분석 방법: 옵션 가치 평가를 위해 동적 프로그래밍(Dynamic Programming, DP)과 최소제곱 몬테카를로(Least Square Monte Carlo, LSMC) 시뮬레이션 기법을 결합하여 사용했습니다. 1,000

회의 시뮬레이션을 통해 다양한 가격 경로 하에서의 순현재흐름과 순현재가치(Net Present Value, NPV) 분포를 도출하고, 각 시점에서의 최적 의사결정(폐쇄 vs. 운영 지속)을 결정했습니다.

- 시나리오 분석: (1) 탄소 가격 시나리오(현재 수준의 고정 가격 vs. 강화된 NDC 시나리오)와 (2) 가격 변동성 시나리오(과거 로그 변환 데이터 vs. 절대값 데이터)를 조합하여 정책과 시장 환경 변화가 조기 폐쇄 결정에 미치는 영향을 분석했습니다.

- 영향 요인 및 검증: 소볼(Sobol) 방법을 이용한 글로벌 민감도 분석(Global Sensitivity Analysis, GSA)을 통해 조기 폐쇄 결정에 영향을 미치는 주요 변수를 식별하고, 실제 독일 경매에 참여한 34개 발전소 데이터를 활용하여 모델 분석 결과가 실제 현상(참여/비참여 그룹 특성)과 일치하는지 비교 검증했습니다.

#### IV. 연구 결과

경제성 분석 (NPV): 분석 대상 발전소(만하임)는 모든 시뮬레이션 시나리오에서 평균 NPV가 큰 폭의 음(-)의 값을 기록했습니다. 이는 분석 기간 동안 지속적인 운영 손실이 예상됨을 의미하며, 독일 정부가 설정한 경매 입찰 상한가(보상금)가 사업자의 기회비용(포기된 이익)보다 높아 조기 폐쇄를 유도하기에 충분한 수준일 가능성을 시사합니다.

최적 조기 폐쇄 전략:

낮은 변동성 시나리오 (로그 변환): 지속적인 수익성 악화로 인해, 탄소 가격 시나리오와 무관하게 모든 시뮬레이션에서 즉각적인 조기 폐쇄(평균 행사 시점 최초 0.00년)가 최적의 전략으로 도출되었습니다.

높은 변동성 시나리오 (절대값): 가격 변동성이 커지면 향후 수익 개선 가능성(옵션의 시간 가치)으로 인해 폐쇄 결정이 다소 지연되었습니다 (고정 탄소 가격 시 평균 행사 시점 최초 3.23년).

탄소 가격의 영향: 강화된 NDC 탄소 가격 시나리오를 적용하자, 높은 변동성 하에서도 즉각적인 조기 폐쇄 (평균 0.00년)가 다시 최적으로 나타났습니다. 이는 탄소 가격 상승이 CFPP 수익성을 급격히 악화시켜 조기 폐쇄를 강력하게 유도하는 핵심 요인임을 확인시켜 줍니다.

주요 영향 요인 (민감도 분석): 조기 폐쇄 결정(평균 최초 행사 시점)에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 프로젝트별 요인 중 '설비 가동률(Capacity Factor, CF)'로 나타났습니다. CF가 낮을수록 수익성이 낮아 조기 폐쇄 성향이 강해졌습니다. 환경 및 확률 변수 중에서는 '탄소 가격', '전력 장기 평균 가격', '전력 가격 변동성' 순으로 영향력이 크게 나타났습니다.

모델 일관성 평가: 실제 독일 경매 데이터 분석 결과, 경매 '참여 그룹'이 '비선정/비참여 그룹'보다 평균적으로 낮은 CF를 보였습니다. 이는 본 연구의 모델 시뮬레이션에서 낮은 CF 그룹이 더 높은 조기 폐쇄(옵션 행사) 경향을 보인 결과와 일치하며, 모델이 실제 사업자의 경제적 동인을 합리적으로 반영하고 있음을 뒷받침합니다.

## V. 연구 결과의 활용 계획

### 정책적 활용 (정부 및 규제 기관):

본 연구의 ROA 프레임워크는 정책 입안자가 탈석탄 정책(예: 조기 폐쇄 일정, 탄소 가격 수준) 및 보상 메커니즘(예: 역경매 상한가, 보상 규모)을 설계하고 그 효과를 사전에 평가하는 유용한 분석 도구로 활용될 수 있습니다.

발전소의 개별 특성(CF, 효율 등)과 시장 불확실성을 고려한 동적 평가를 통해, 정부와 사업자 간의 정보 비대칭성을 완화하고 보다 효율적이고 공정한 보상 수준을 책정하는 데 기여할 수 있습니다.

신뢰할 수 있는 정책 신호(명확한 폐쇄 기한, 투명한 보상 규칙)와 강력한 탄소 가격 정책이 자발적 조기 폐쇄 메커니즘의 성공에 중요함을 시사합니다.

### 산업적 활용 (발전 사업자):

발전 사업자는 ROA를 활용하여 불확실한 시장 및 정책 환경 하에서 보유 자산(CFPP)의 좌초 위험을 정량적으로 평가하고, 조기 폐쇄 옵션의 내재 가치를 파악할 수 있습니다.

이를 통해 최적의 조기 폐쇄 시점, 경매 참여 여부, 적정 보상금 요구 수준 등 전략적 의사결정을 내리는 데 과학적 근거로 활용할 수 있습니다.

### 학술적 기여 및 향후 연구:

전통적인 정적 평가 방식의 한계를 극복하고, CFPP 조기 폐쇄 및 좌초자산 평가 분야에 불확실성과 경영 유연성의 가치를 반영하는 ROA 방법론의 적용 가능성과 유용성을 실증적으로 제시했습니다.

향후 한국의 탈석탄 정책 수립 및 한국형 조기 폐쇄 지원 메커니즘(예: 경매 제도 도입) 논의 시, 본 연구의 분석 틀을 적용하여 국내 환경에 맞는 효율적인 정책 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있습니다.

# 목 차

## I. 서 론

## II. 문헌 고찰

- 2.1. 석탄발전 전환 과정에서의 좌초자산: 위험과 가치평가의 한계
- 2.2. 불확실성 하에서의 조기 폐쇄 결정을 위한 실물옵션 분석
- 2.3. 석탄화력발전소 조기 폐쇄 보상과 독일의 역경매

## III. 방 법 론

- 3.1. 실물 옵션 문제 식별
- 3.2. 입력 변수 모델링
- 3.3. 현금 흐름 분석
- 3.4. 최소제곱 몬테카를로를 이용한 동적 프로그래밍
- 3.5. 민감도 분석

## IV. 연구 결과

- 4.1. 단일 자산 실물 옵션 분석 결과
- 4.2. 민감도 분석 결과
- 4.3. 관측 결과와의 모델 일관성 평가

## V. 결론

- 5.1. 연구 내용 요약
- 5.2. 주요 결과 요약
- 5.3. 연구의 기여도와 의의
- 5.4. 정책 및 산업적 함의

## 제1장. 개요

석탄 화력 발전소(Coal-fired Power Plant; CFPP)는 세계에서 가장 큰 발전 자원일 뿐만 아니라 가장 큰 온실 가스(Green House Gas; GHG) 배출원입니다. CFPP는 전 세계 CO2 배출량의 40.97%를 배출하는데, 이는 다양한 산업 또는 연료 중 가장 큰 범주입니다 (Global Carbon Budget, 2024). 따라서 석탄의 단계적 폐지, 즉 계획된 수명보다 조기에 석탄화력발전소를 폐쇄하는 것은 탄소 중립을 위한 피할 수 없는 전제 조건으로 간주됩니다 (Jung, 2023; IPCC, 2023; Cullenward & Victor, 2020). 이러한 시급성을 반영하여 국제에너지기구(IEA)는 탄소 중립 목표를 달성하기 위해 선진국은 2030년까지, 그 외 모든 국가는 2040년까지 석탄 화력 발전을 중단할 것을 촉구했습니다 (IEA, 2021).

그러나 석탄화력발전소의 조기 폐기 과정은 상당한 난관에 직면해 있습니다. 석탄화력발전소를 보유한 30개 OECD 및 EU 국가 중 2030년 이전 석탄 퇴출을 목표로 하는 국가는 15개국에 불과합니다. 한국을 포함한 7개국은 2040년을 목표로 하거나 구체적인 목표 연도를 설정하지 않은 상태입니다 (Jung, 2023). 심지어 퇴출 목표를 선언한 국가들조차 폐기 시한을 연기하고 있습니다. 예를 들어 독일에서는 2023년 1월 12개 석탄화력발전소의 임시 재가동이 발표되기도 하였습니다. 또한 신흥 경제국들은 여전히 탄소 집약적 에너지원에 크게 의존하고 있습니다. 중국의 전력 생산에서 석탄이 차지하는 비중이 61%, 인도는 74%에 달한다는 사실이 이를 입증합니다 (World Resources Institute, 2024).

석탄 화력 발전소의 조기 폐기는 기존 장기 계약을 파기해야 하고, 투자자 보호 규범과 충돌하며, 전력 공급 안정성에 문제를 야기할 수 있기 때문에 복잡한 문제입니다 (Srivastav & Zaehring, 2024). 전 세계적으로 석탄 화력 발전소의 조기 폐쇄를 방해하는 주요 문제 중 하나는 좌초 자산 위험에 대한 적절한 보상입니다. 좌초자산이란 자산의 완전한 감가상각 이전에 조기 폐쇄로 인해 상각 처리해야 하는 자산을 의미합니다 (Kefford et al., 2018). 시장 요인이 아닌 다른 요인으로 발전소를 폐쇄할 경우, 폐쇄의 기회비용, 즉, 조기 폐쇄를 하지 않고 일반적인 상황에서 취득할 누적 미래 수익 흐름의 순현재가치를 반영하여 지급하는 것이 필요합니다. 조기 폐쇄에 대한 보상은 CFPP의 조기 가동 중단 비용을 고려한 '파기 비용 지급' 메커니즘입니다.

그러나 조기 폐쇄로 인한 좌초자산 위험을 보상하는 관리형 조기 폐쇄(Managed Coal Phase Out)는 비교적 새로운 활동이기 때문에 CFPP 조기 폐쇄에 대한 역사적 데이터나 확립된 시장 가격이 거의 없습니다. 또한 CFPP 운영자와 규제 기관 간의 정보 비대칭성은 조기 폐쇄의 정확한 가격 책정에 상당한 어려움을 초래하며 CFPP 운영자의 잠재적인 이윤 추구 행위로 이어질 수 있습니다. CFPP 운영자는 일반적으로 정부나 규제 기관보다 미래 수익에 대한 진정한 기대치와 조기 폐쇄를 위해 진정으로 수용할 수 있는 최소 보상액에 대해 더 나은 정보를 보유하고 있습니다. 따라서 운영자들은 폐쇄 비용을 과대평가하거나 로비할 가능성이 높은 반면, 정부는 납세자 이익을 고려하여 저비용 폐쇄를 추구합니다. 이로 인해 정책 입안자가 조기 폐쇄의 정확한 비용을 파악하기 어렵습니다 (Bhat et al., 2023). 이러한 문제에 대응하기 위해 가격 발견(Price discovery)은 단계적 폐쇄 협상 구조를 위한 보상 규모와 필요한 자본량을 결정하는 데 도움이 될 수 있습니다.

독일은 이 문제를 해결하기 위해 2020년 CFPP 보상 방식을 역경매 방식으로 채택한 최초이자 유일한 국가입니다. 경매 방식의 가격 입찰이 앞서 언급한 정보 비대칭성을 완화하고 조기 폐기 가격을 도출하는 데 도움이 될 수 있기 때문입니다. 그러나 2020년부터 2023년까지 진행된 경매는 그 효과

성과 효율성에 대해 상반된 주장을 남겼습니다. Tiedemann & Müller-Hansen (2023) 은 몇 차례 경매에서 경쟁이 부재했음에도 보상 금액을 최소화하는 데 효과적이었다고 관찰했습니다. 반면 *Frontier Economics* (2023) 은 엄격한 경매 규칙으로 인해 참여 유인성이 떨어졌다고 주장했습니다. 따라서 조기 폐기 정책 내 보상과 관련된 미묘한 차이는 적절한 가격 책정을 위한 효과성에 대한 추가 연구가 분명히 필요하며, 이는 상세한 사례 연구 접근법을 특히 적절하게 만듭니다.

현재 CFPP 조기 폐쇄 보상 제도의 또 다른 한계는 CFPP의 미래 운영 수익성 정량화 시 불확실성을 고려하지 않는다는 점입니다 (Mo et al., 2021; Shimbar, 2021). 할인된 순현금흐름 프레임워크 내 정적 값에 의존하는 전통적 좌초자산 위험 계산은 변동하는 에너지 가격 하에서의 미래 수익을 시물레이션하는 데 어려움을 겪습니다. 최근 문헌 중 일부는 금융 프로젝트에 내재된 불확실성, 유연성, 비가역성을 해결하기 위해 실물 옵션 분석(Real Option Analysis, ROA)를 도입하여 기후 변화로 인한 좌초자산 위험을 정량화하는 보다 정교한 접근법을 제시하고 있습니다 (Jeong et al., 2023; Mo et al., 2021; Wu et al., 2023). 그러나 이 고급 추정 방법론을 CFPP 조기 폐쇄 보상 메커니즘과 통합하여 발생하는 역학을 분석한 연구는 여전히 제한적입니다.

따라서 본 논문은 불확실성 하에서 CFPP의 미래 현금 흐름을 평가하기 위해 ROA를 적용합니다. 또한 독일 CFPP 조기 폐쇄 경매 메커니즘에 특히 초점을 맞춰, 독일 내 개별 CFPP가 가격 신호에 기반하여 경매에 어떻게 반응할지 모델링합니다. 독일 사례를 연구한 이유는 독일의 독특한 역경매 시스템이 시장 불확실성과 상호작용하여 개별 CFPP의 조기 폐쇄 결정을 어떻게 형성하는지 탐구할 수 있는 독특한 사례를 제공하기 때문입니다. 본 연구는 독일의 대표적인 경질 CFPP를 대상으로 다음 질문에 답하고자 합니다: (1) 전력 및 석탄 가격 불확실성 하에서 경제적 가치는 어떻게 분배되는가? (2) 독일 석탄 조기 폐쇄 역경매 메커니즘(특히 입찰 상한선)을 고려할 때, CFPP의 최적 조기 폐쇄 전략(시기 및 참여 결정 측면)은 무엇인가? (3) 분석 결과에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 요인은 무엇인가?

다양한 실물 옵션 유형 중 포기 옵션은 CFPP 조기 폐쇄를 분석하는 합리적 틀을 제공합니다 (Jeong et al., 2023; Mo et al., 2021; Wu et al., 2023). 이는 운영자가 법적 의무와 상승하는 탄소 가격의 결합으로 인해 조기 운영을 중단할 권리를 반영하며, 동시에 경매에 기반한 보상을 받을 가능성을 내포하기 때문입니다. 연구 질문에 답하기 위해 동적 계획법(Dynamic Programming, DP)과 몬테카를로 시물레이션을 결합한 최소제곱 몬테카를로(Least Squares Monte Carlo, LSMC) 방법을 적용하였습니다. 이는 복잡한 순차적 의사결정 문제를 해결하고 상호작용하는 여러 불확실성 요인을 효과적으로 처리하기 때문입니다.

본 연구는 특히 LSMC 방법을 활용하여 ROA의 유용성을 입증함으로써 독일의 역경매 시스템과 같은 CFPP 조기 폐쇄 정책 평가에 학문적, 실무적 기여를 제시합니다. 학문적으로 핵심장점은 정책 메커니즘 하에서 미래 시장 불확실성과 경영 유연성의 가치를 명시적으로 반영한다는 점으로, 좌초자산의 이러한 동적 차원을 종종 간과하는 기존 정적 평가 방법보다 자산 생존 가능성과 정책 효과성에 대한 보다 미묘한 통찰을 제공합니다. 실무적으로는 다양한 보상 및 탄소 시나리오 하에서 최적의 발전소 수준 폐기 결정 평가를 가능케 합니다. 이를 통해 정책 입안자와 발전소 운영자는 경제적 합리성에 부합하는 보상 수준에 대한 핵심 기준 데이터와 초기 통찰력을 확보할 수 있으며, 이는 경매 입찰 상한선 및 기타 효율적 보상 메커니즘의 설계와 평가에 기여할 수 있습니다.

이러한 소개에 이어, 제2장에서는 기후 변화로 인한 좌초자산, 에너지 인프라의 실물 옵션 분석, 독일 보상 메커니즘에 관한 관련 문헌을 종합적으로 검토합니다. 제3장에서는 실제 옵션 프레임워크와 분석에 사용된 데이터를 포함하여 본 연구에서 채택한 방법론을 상세히 설명합니다. 제4장에서는 독일 조기 폐기 경매에 본 모델을 적용하여 도출된 주요 결과와 논의를 제시합니다. 마지막으로 제5장에서는 연구를 요약하며 논문을 마무리합니다.

## 제2장. 문헌 고찰

### 2.1. 석탄 발전 전환 과정에서의 좌초자산: 위험과 가치 평가의 한계

저탄소 경제로의 전환은 기술 발전과 규제 변화에 주로 영향을 받는 상당한 전환 위험을 초래하며, 이는 중대한 재정적 영향, 평판 손상 및 정치적 파장을 초래할 수 있습니다 (Bank of England, 2024; Battiston et al., 2017; Luo et al., 2023). 전환 위험 내 주요 쟁점은 "좌초자산" 위험 개념으로, 특히 상류 화석연료 부문, 전력 부문, 그리고 탄소 집약적 석탄 발전 산업 내에서 주목받고 있습니다 (Binsted et al., 2020; Bos & Gupta, 2018; Breitenstein et al., 2020; Edwards et al., 2022; Guo & Hawkes, 2019; McGlade, 2015; Zhang et al., 2022). 저탄소 전환 과정에서 좌초자산이란 경제의 탈탄소화로 인해 경제 주체가 최초 투자 시 기대했던 수익이 급격히 감소할 것으로 예상되는 자산을 의미합니다. 이러한 현상은 비용이 많이 드는 재분배 또는 거래 비용으로 인해 해당 자산을 쉽게 용도 변경하거나 처분할 수 없기 때문에 발생합니다.

Daumas (2023)와 Fisch-Romito et al. (2021)는 좌초자산에 관한 기존 문헌을 검토하며, 조기 폐기된 설비 용량 (Binsted et al., 2020), 미추출 화석연료량 (Leaton et al., 2011), 기존 고정자산에 내재된 확정 배출량 (Pfeiffer et al., 2016), 저이용률, 또는 자본재의 노후화 (Mo et al., 2021) 등 다양한 지표를 강조합니다. 특히 CFPP의 경우, 좌초자산 위험의 주요 형태로는 운영 수명 단축, 가동률 감소, 예상치 못한 조기 폐기 등이 있습니다. 금전적 추정치는 종종 장부상 손실로 분류되며, 이는 탄소 예산을 충족하기 위해 예상 경제 수명 전에 폐기된 기존 고탄소 고정자산의 경제적 가치를 포착합니다. 또한 포기된 현금흐름은 전환에 노출된 기업이나 프로젝트가 지속적으로 입게 될 재정적 유입 손실을 나타냅니다.

CFPP와 같은 핵심 인프라 자산의 좌초는 개별 자산 손실을 넘어 광범위한 금융 안정성에 중대한 우려를 제기하므로 세심한 평가가 필요합니다. 직접적 인과관계에 대한 연구는 여전히 진행 중이지만, Daumas (2023)의 검토에 따르면 좌초자산은 회수되지 않은 투자로 인한 대출 부도, 재정적 어려움을 시사하는 유실된 수익 흐름 등의 메커니즘을 통해 상당한 가치 손실을 촉발하고 금융 취약성을 높일 수 있습니다. 이러한 압박은 잠재적 채무 불이행을 통해 개별 CFPP 수준에서도 드러나며, 금융 안정성에 대한 현실적 위협이 왜 좌초자산에 대한 철저한 분석을 필수적으로 만드는지 강조합니다. 다만 그 체계적 영향을 완전히 규명하기 위해서는 추가 연구가 필요합니다.

화석 기반 에너지 인프라의 좌초자산 연구는 전체 위험 규모에 대한 거시적 정량화 등 (Binsted et al., 2020; Edwards et al., 2022; Mercure et al., 2018)에서 통합적 상향식 및 하향식 방법론을 통한 보다 정교한 이해로 진화해 왔습니다. Edwards 등(2022)은 CFPP로 인한 글로벌 좌초자산 위험 변화를

평가하여, 현재 시점에서 건설이 계획된 모든 CFPP에 대해 1.5°C 정책 시나리오에서 1조 4천억달러 규모의 좌초자산이 발생할 것이라고 계산했습니다. Cui 등(2019)은 GCAM-China 모델과 CFPP의 발전소 수준 조기 폐기 결정 프레임워크를 통합하여 상세한 분석을 수행했습니다. 또한, Dulong (2023)은 연구를 소유권 매핑으로 확장하여, 특히 상장 기업의 주식 가치와 자본에 미치는 영향을 강조하며, 좌초된 CFPP 자산의 재무적 위험을 부각시켰습니다.

이 분야의 좌초자산, 특히 CFPP에 대한 전통적인 평가는 시나리오 분석을 포함한 현금 흐름 분석을 자주 활용하며, 순현재가치(NPV) (Gray & Sundaresan, 2020), 순장부가치(NBV) (Saygin et al., 2019), 그리고 원가 기반 방법 등의 방법론을 사용합니다. 예를 들어, Hickey 외 (2021)는 전환 위험에 직면한 유럽 전력 사업자의 자산 조기 폐쇄 및 필수 완화 투자로 인한 손실을 측정하기 위해 NPV 기반 평가 프레임워크를 개발했습니다. Wang 외(2022)는 중국의 석탄 발전 전환을 검토하면서, 유연한 발전소 운영을 촉진하는 정책의 영향으로 인한 기대 수익 감소를 포함하도록 좌초자산의 정의를 확대했습니다. 최근 In 등(2022a)은 CFPP를 포함한 에너지 인프라 자산의 기후 관련 금융 부도 위험을 평가하기 위해 부채 상환 비율(DSCR) 및 내부 수익률(IRR)과 같은 지표를 사용하는 통합 프레임워크를 제안했습니다.

그러나 CFPP와 같은 장기 인프라 투자에 내재된 동적 불확실성과 복잡성은 좌초자산의 효과적인 세분화된 정량화를 위해 보다 정교한 접근법이 필요함을 시사합니다 (Mo et al., 2021; Shimbar, 2021). 최근 연구에서는 좌초 자산 위험을 보다 포괄적으로 평가하기 위해 실물 옵션 분석을 활용하여 전통적인 현금 흐름 분석의 한계를 해결하기 시작했습니다. Wu et al. (2023)은 여러 탄소 가격 시나리오에서 불확실성의 원인으로 석탄, 전력 및 탄소 가격을 모델링하여 중국의 CFPP에 대한 국가적 좌초 자산 위험을 평가하기 위해 LSMC 기반 ROA 모델을 제안했습니다. 그들의 연구 결과는 다양한 탄소 가격 시나리오가 총 석탄 좌초 자산에는 제한적인 영향을 미치지만, 공격적인 탄소 가격 책정은 특정 기간 동안 집중적인 영향을 미칠 수 있음을 시사했습니다. 별개의 분야이지만 유사한 접근법을 사용한 Jeong et al.(2023)은 동적 프로그래밍과 LSMC 기법을 활용하여 개별 자산 수준에서 변화하는 미래 탄소 가격에 의해 유발되는 선박 투자 좌초 자산 위험을 평가하는 프레임워크를 구축했습니다.

ROA 적용을 통한 이 연구분야의 지속적인 발전에도 불구하고, 그동안의 연구들은 중국, 미국, 인도 등 제한된 국가군과 탄소 가격 책정 메커니즘에 관한 제한된 시나리오에 집중하는 경우가 많았습니다. 다양한 정책 맥락 내 기후 변화로 인한 좌초 자산에 관한 연구는 현저히 부족한 실정입니다. 예를 들어, 독일의 CFPP 조기 폐기 정책에서 관찰된 특정 정책 개입과 관련된 역학은 여전히 충분히 탐구되지 않았습니다. 다양한 규제 프레임워크, 독일과 같은 정책 사례 연구, 그리고 다양한 지리적 맥락을 포함하도록 연구 범위를 확장하는 것은 좌초자산 위험에 대한 보다 포괄적인 이해를 위해 중요하며, 궁극적으로 투자자들이 정보에 기반한 의사결정을 내리는 데 도움이 될 것입니다.

## 2.2. 불확실성 하에서의 조기 폐쇄 결정에 대한 리얼 옵션 분석

역사적으로 할인현금흐름(Discounted Cash Flow, DCF) 방식은 에너지 부문을 포함한 인프라 투자 평가의 주된 도구로 사용되어 왔습니다. 이 방식은 단일 할인율을 적용해 현재 가치로 할인된 모든 예상 순현금흐름을 합산하여 순현재가치(NPV)를 산출합니다. 일반적으로 양의 NPV는 투자가 수용 가능함을 의미합니다 (Bodie et al., 2001; Lee, 2011). 전통적인 정책 평가에 자주 활용되는 DCF 접근법

은 NPV와 내부수익률(IRR) 계산을 통해 프로젝트의 타당성을 평가하지만, 불확실성과 관련 위험을 충분히 고려하지 못한다는 한계가 있습니다.

한편, DCF 방식은 불확실성 하에서 경영진의 유연성 가치—예를 들어 프로젝트를 연기하거나 확장, 축소 또는 포기할 수 있는 선택권—나 CFPP와 같은 장기 자산에 대한 변화하는 정책 환경의 영향을 반영하지 못하는 등 내재적 한계를 지닙니다. 이 방법의 근본적 가정은 미래 현금흐름이 정적(static)이거나 미리 정해진 경로를 따르며, 모든 불확실성이 할인율에 충분히 반영되어 있다는 것입니다. DCF 프레임워크 내에서 선택된 변수 변화의 영향을 평가하기 위한 민감도 분석을 수행할 수 있지만, 이는 일반적으로 사전 정의된 시나리오에 의존하고 다른 변수들을 고정시키므로 프로젝트 가치 변화의 확률적 특성을 포착하기 어렵습니다.

반면, Myers (1977)가 개념화한 ROA는 옵션 가격 결정 이론을 실물 자산에 적용함으로써 투자 가치 평가에 보다 동적인 접근법을 제공합니다. 옵션은 특정 날짜(만기일)까지 미리 정해진 가격(행사가격)으로 특정 자산을 매수하거나 매도할 권리(의무는 아님)로 정의됩니다. ROA는 프로젝트에 내재된 불확실성을 명시적으로 반영하고 투자 기간 전반에 걸쳐 유연한 경영 전략의 가치를 인정한다는 점에서 차별화됩니다 (Kim, 2008; Lee, 2011). 이는 특히 CFPP와 같은 유형 자산 투자에 해당되며, 여기서 상당 부분의 가치는 시간이 지남에 따라 새로운 정보와 변화하는 시장 또는 정책 조건에 적응할 수 있는 유연성에서 비롯됩니다.

ROA 적용은 불확실성 하에서의 투자 결정 평가, 특히 에너지 분야(예: 재생에너지 프로젝트) (Andreolli & others, 2022; Blank et al., 2016; Carbonara & Pellegrino, 2018; Colín et al., 2017; Moon & Baran, 2018; Penizzotto & others, 2019), 그리고 기타 인프라 프로젝트에서 주목받고 있습니다. 또한 옵션 특성 측면에서, 인프라 분야의 기존 ROA 연구 대부분은 투자 연기 옵션이나 정부 보증에 초점을 맞춰왔습니다 (Jeong et al., 2023; Marques et al., 2024). ROA의 중요성이 커지고 있음에도 불구하고, 특히 엄격한 기후 정책과 특정 단계적 폐지 메커니즘에 대응하여 CFPP와 같은 기존 자산에 대한 조기 퇴출 옵션(본질적으로 포기 옵션의 한 형태)을 평가하는 데 ROA를 적용하는 것은 여전히 상당히 미흡한 상태입니다. 예를 들어, 독일의 역경매 제도에서 볼 수 있는 것과 같은 서로 다른 정부 보상 규칙 하에서 CFPP의 최적 퇴출 전략을 평가하는 미시적 수준의 ROA 기반 분석은 현저히 부족합니다. 이 격차를 해소하는 것은 매우 중요한데, 왜냐하면 포기 옵션은 운영자가 조기 CFPP 퇴출과 관련해 직면하는 중대한 결정을 직접 포착하며, 이러한 복잡한 정책 프레임워크 내에서 그 가치를 이해하는 것은 에너지 전환을 추진하는 자산 소유자와 정책 입안자 모두에게 중요한 통찰력을 제공하기 때문입니다.

이 연구 공백을 효과적으로 해결하려면 ROA 프레임워크 내에서 가장 적합한 평가 방법론을 선택하는 것이 필수적입니다. 조기 퇴출 옵션의 미국식 특성 및 상호작용하는 다중 불확실성 요인 등 본 연구 문제의 특수성을 고려하여 다양한 ROA 기법의 장단점을 비교 검토하였습니다. 현재 이용 가능한 주요 실물 옵션 평가 방법론은 다음과 같습니다.

**블랙-숄즈-머튼(Black-Scholes-Merton, BSM model) 모델과 같은 폐쇄형 해법:** 본래 유럽식 금융 옵션을 위해 개발된 BSM 모델은 현재 자산 가격, 행사가격, 만기까지의 시간, 무위험 이자율, 변동성을 기반으로 한 분석적 해법을 제공합니다. 이는 특정 만기일에만 행사할 수 있는 프로젝트의 연기

(defer) 옵션과 같은 단순한 실물 옵션 구조에 자주 적용됩니다. 그러나 유럽식 행사, 일정 변동성, 단일 불확실성 원천과 같은 가정은 발전소 포기처럼 조기 행사 기능이 있는 복잡한 다단계 프로젝트에 대한 적용성을 제한합니다.

**격자 기반(Lattice-based) 모델(예: 이항 옵션 가격 결정 모델(Binomial Option Pricing Model)** (Banda, 2021; Yue & Ying, 2021): 이러한 모델은 시간과 기초 자산 가치의 변화를 이산화하여 가능한 결과의 트리를 구축함으로써 옵션을 단계별로 평가할 수 있게 합니다. 이 모델들은 만기 전 언제든지 행사 가능한 미국식 옵션을 처리할 수 있으며, 어느 정도 수준의 변화하는 매개변수를 통합할 수 있습니다. 그러나 발전소에 전형적인 여러 상호작용하는 불확실성(예: 전기 가격, 연료 가격, 탄소 가격)과 긴 운영 수명으로 인해, 이항 또는 삼항 트리는 계산 집약적이고 다루기 어려워질 수 있습니다("차원의 저주").

**Fuzzy pay-off 방법** (Collan et al., 2009; X. Zhang & Yin, 2023): 이 접근법은 퍼지 논리를 활용하여 입력 변수의 불확실성을 처리하며, 정확한 값 대신 가능한 결과의 범위를 제공합니다. 부정확한 정보를 다루는 데 유용하지만, 옵션 가격 책정을 위한 다른 방법들에 비해 널리 채택되거나 표준화되지 않는 않았습니다.

**동적 프로그래밍(DP) 및 시뮬레이션 기반 접근법(예: LSMC)** (Ma et al., 2020; Mo et al., 2021b; Pringles et al., 2015): DP는 불확실성 하에서 복잡한 다단계 의사 결정 문제를 더 작고 관리 가능한 하위 문제로 분해하여 재귀적으로 해결함으로써 시간에 따른 최적의 전략을 찾습니다. 이는 발전소 운영 지속 또는 폐기 여부를 매년 결정하는 것과 같이 순차적인 의사 결정 기회가 있는 프로젝트에 적합합니다. Longstaff & Schwartz (2001) 가 소개한 LSMC(최소제곱 다중 불확실성 방법)는 DP와 몬테카를로 시뮬레이션을 결합하여, 특히 불확실성의 원인이 여러 개인 경우 미국식 옵션을 평가합니다. 이 방법은 기초 확률 변수에 대한 수많은 경로를 시뮬레이션하고, 최소제곱 회귀를 사용하여 프로젝트 지속의 조건부 기대값을 추정함으로써 최적의 행사 전략을 결정할 수 있게 합니다.

본 논문의 구체적 연구 문제—독일 단계적 폐지 정책 하에서 개별 CFPP(석탄화력발전소)의 조기 퇴출(폐기) 옵션을 평가하는 것—은 다중 상호작용 불확실성(본 사례에서는 전력 가격과 석탄 가격; 향후 탄소 가격 및 잠재적으로 경매 보상금 자체까지 포함하도록 확장 가능)과 다년간의 의사결정 기간을 수반합니다. 이러한 맥락에서 DP와 LSMC(최소제곱몬테카를로) 접근법은 상당한 장점을 제공합니다. LSMC 접근법은 이러한 변수들과 그 상관관계에 대한 복잡한 확률 과정을 모델링할 수 있게 하여, 독일 CFPP 조기 폐쇄 경매 하에서 조기 폐쇄 옵션의 가치를 추정하고 최적의 폐기 전략을 식별하기 위한 견고한 프레임워크를 제공합니다.

### 2.3. 석탄화력발전소 조기폐쇄 보상 메커니즘 및 독일 역경매

석탄화력발전소의 조기 폐쇄에 대한 보상 또는 재정적 인센티브 메커니즘은 그 설계 및 도입 단계가 다양합니다. 미국과 유럽연합에서는 노후 석탄발전소 폐기를 가속화하기 위해 규제 조치와 금융 혁신이 모두 활용되어 왔는데, 여기에는 용량 조기 폐쇄 경매(capacity early retirement), 탄소 가격 하한선(carbon price floors), 양허성 금융(concessional financing), 요금 납부자 기반 증권화(ratepayer-based securitization)가 포함됩니다. 최근에는 개발도상국 환경의 제약된 자금 조달 옵션에 더 적합한 플랫폼 설계가 시도되고 있습니다. 대표적으로 공정 에너지 전환 파트너십(Just Energy Transition

Partnership, JETP) 프레임워크와 에너지 전환 메커니즘(Energy Transition Mechanism, ETM) (Clark et al., 2023)가 있다. 최근 연구에서는 동남아시아에서 중국 자금을 받은 석탄화력발전소 폐쇄의 복잡한 메커니즘을 논의하기도 했습니다(Nedopil et al., 2024).

협회의 정의 하에 석탄화력발전소의 조기 폐쇄에 대한 보상 결정은 일반적으로 양자 협상 또는 경쟁적 경매를 통해 이루어집니다 (Srivastav & Zaehringer, 2024). 양자 협상은 종종 정보 비대칭성 문제에 직면하는데, 발전소 운영자는 기회 비용을 과대평가할 수 있는 반면 정책 입안자는 비용을 최소화하려 하여 비효율적인 결과와 과도한 보상으로 이어질 수 있기 때문입니다. 반면 경매는 운영자에게 실제 폐쇄 비용을 공개하도록 유도함으로써 이러한 비대칭성을 완화할 수 있으며, 투명하고 효율적인 보상 및 순차적 폐쇄를 촉진합니다. 참가자들은 비용을 허위로 보고할 위험에 직면하여 진실된 입찰을 유도하며, 경매는 직접적인 "오염자 부담(Polluter-pays)" 정책에 비해 기후 행동을 위한 정치적으로 더 실현가능한 경로를 제공할 수도 있습니다 (Srivastav & Zaehringer, 2024). 그러나 경매의 성공은 충분한 경쟁 수준, 다양한 시장 참여, 적절한 경매 설계에 크게 좌우됩니다 (Srivastav & Zaehringer, 2024). 참여 부족이나 담합 가능성은 경매의 가격 발견 기능을 약화시켜 비효율성을 초래할 수 있습니다. 또한 유연하지 않거나 부적절하게 설계된 경매는 의도하지 않은 부정적 결과를 초래하거나 변화하는 시장 상황에 효과적으로 적응하지 못할 수 있습니다 (Frontier Economics, 2023).

독일의 2020년 석탄 퇴출 법률은 2038년까지 석탄 조기 퇴출을 법적으로 의무화하며, 무연탄 및 소규모 갈탄 발전소(150MW 미만)에는 역경매 방식을 적용하는 반면, 대규모 갈탄 발전소는 지역 경제 중요성과 경쟁력 강화를 고려해 양자 협상을 진행하는 방식입니다. 경매에서 운영사는 희망 보상금(Euro/kW)과 이산화탄소 배출 데이터를 함께 입찰합니다. 연방네트워크청(BNetzA)은 입찰가, 전력망 안정성, CO2 배출량을 종합적으로 고려한 "조정 입찰가"를 기준으로 낙찰자를 선정하여 비용 효율적인 감축과 공급 안정성을 보장하며, 입찰가 지급 방식(pay-as-bid mechanism)을 적용합니다(Scott et al., 2022). 이 제도는 2020년부터 2026년까지 단계적으로 입찰 상한선을 낮추는 자발적 경매를 통해 조기 참여를 유도한 후, 2027년부터는 보상 없는 의무적 폐기를 시행했습니다. 중요한 특징은 미달 규칙(undersubscription rule)이었습니다: 경매 라운드에서 목표 용량을 확보하지 못할 경우, 부족분은 가장 오래된 발전소의 강제적, 무보상 폐쇄로 충당됩니다. 이는 경매 참여에 대한 인센티브이자 경매 결과와 무관하게 단계적 폐지 목표를 달성하기 위한 안전장치 역할을 했습니다. 또한 폐쇄된 용량에 상응하는 EU 배출권 거래제(EU ETS) 배출권은 독일 정부에 의해 취소되어 전체 EU 배출량 감축에 기여했습니다.

Tiedemann & Müller-Hansen (2023)에 따르면, 7차례의 무연탄 경매(2020-2023)는 초기 경쟁이 있었으나 이후 상당한 미달성 문제를 겪었습니다. 첫 다섯 차례 경매를 통해 10GW의 석탄 화력 발전 설비가 폐기되었으며, 이에 따른 총 보상 비용은 약 6억 2,700만 유로에서 7억 2,900만 유로로 추정되었습니다. 또한 이 폐기 설비에 대한 설비 가중 평균 보상금은 68±5유로/kW로 나타났습니다. 이러한 성과에도 불구하고 경매는 상당한 비판에 직면해 있습니다. Frontier Economics (2023)에 따르면, 경매의 경직된 설계, 특히 고정된 낮은 입찰 상한선과 유연하지 않은 폐기 기한은 2022년 에너지 위기 당시 급등한 전력 가격에 적응하지 못했습니다. 이는 운영자의 기회 비용을 증가시키고 참여 유인을 감소시켜 입찰 부족과 청산 가격이 상한선으로 수렴하는 결과를 초래했습니다. 이는 '사전 정의된 보상 구조가 개별 CFPP 운영자에게 조기 참여 및 폐기에 대한 경제적 합리적 유인을 제공했는가?'라는 근본적인 의문을 제기합니다.

독일 CFPP 조기 폐쇄에 대한 기존 정량적 분석은 주로 시스템 전체 최적화나 거시경제적 영향에 초점을 맞추고 있으나, 시장 가격 불확실성이 큰 상황에서 감소하는 입찰 상한선과 같은 특정 경매 규칙에 직면한 개별 CFPP 운영자의 동적 의사결정 과정을 명시적으로 모델링하지 않는 경향이 있었습니다. 이러한 보상 메커니즘의 실제 효과성을 평가하기 위해서는, 주어진 입찰 상한 수준이 운영자의 미래 수익성 및 비용 구조에 대한 기대와 어떻게 상호작용하여 최적의 폐기 및 경매 참여 전략을 결정하는지, 즉 이러한 미시적 수준에서의 반응을 이해하는 것이 중요합니다. 따라서 본 연구는 ROA를 활용하여 이러한 동적 의사결정 과정을 시뮬레이션한다. 시장 가격 불확실성의 영향과 정책 수단과의 상호작용을 포착함으로써, 본 연구는 독일 경매 정책에 내재된 경제적 인센티브가 발전소 차원의 잠재적 행동으로 어떻게 전환되는지에 대한 기초적 통찰을 제공하고자 합니다. 이를 통해 정책 수용성과 참여자 반응, 특히 입찰 상한선과 같은 보상 수준 적절성에 관한 논의에 기여할 수 있을 것입니다.

## 제3장. 방법론

방법론 부분은 네 부분으로 나뉩니다. 첫 번째 부분은 실물 옵션 문제의 식별입니다. 이는 사례 연구 적용이 ROA로 해결해야 할 문제인지 확인하는 것입니다. 그런 다음, 입력 변수 모델링과 현금 흐름 분석이 각각 2부와 3부에서 수행됩니다. 이후 4부에서는 LSMC와 DP를 함께 구축합니다. 이 부분에서 옵션 평가 모델과 의사 결정 규칙이 수립됩니다. 마지막으로, 제5부에서는 민감도 분석을 상세히 설명할 것입니다.

### 3.1. 실물 옵션 문제 식별

본 연구는 독일 석탄화력발전소의 조기 폐쇄를 위한 CFPP 역경매 메커니즘에 ROA를 적용하는 것을 목표로 합니다. 독일은 CFPP 조기 폐쇄 분야에서 최초의 실제 정책 실험을 선도한 국가입니다. 정교한 정책 매개변수와 잘 기록된 결과 데이터는 분석 도구를 활용한 학술적 연구에 구체적이고 필수적인 자료를 제공합니다. 이러한 독특한 경매 시스템의 구현은 궁극적으로 특정 정책 수단이 시장 불확실성과 상호작용하여 개별 CFPP의 조기 퇴직 결정을 어떻게 형성하는지 분석하는 적절한 사례 연구가 됩니다.

독일에서는 2038년까지의 의무적 조기 폐쇄와 향후 탄소 가격 상승 전망으로 인해 석탄 화력 발전소가 상당한 좌초 위험에 직면해 있습니다. 이에 독일 정책 프레임워크는 2020년부터 2027년까지 자발적 조기 폐기 기간을 설정하고, 이 경매 메커니즘을 통해 보상금을 결정합니다. 따라서 CFPP 운영자의 핵심 결정은 비용 효율성을 위해 발전소를 조기 폐쇄할 것인지, 그리고 폐쇄할 경우 법적으로 정해진 보상금을 받기 위해 언제 폐쇄할 것인지입니다. 방법론적으로 본 연구에서 조기 폐기는 포기 옵션으로 개념화됩니다. 구체적으로, 발전소 운영자가 고정된 만료일뿐만 아니라 정의된 경매 및 조기 폐기 기간 내 원하는 시점에 자산을 폐쇄하기로 결정할 수 있다는 점에서 미국식 포기 옵션의 특성과 부합합니다. 이 옵션을 행사하는 결정 기준은 발전소의 지속적 운영 가치와 옵션의 행사가격(strike price)을 비교하는 것이다. 행사가격이 운영 가치를 초과할 경우 옵션이 행사됩니다.

한편, Pay-as-you-bid 역경매 메커니즘과 그 규칙은 법적으로 규정된 경매 입찰 상한선을 균일하게 채택하여 행사가격(운영 중단 시 받는 가치)으로 삼는 방식으로 단순화됩니다. 이러한 단순화는 개별 CFPP의 입찰 가격 변동성을 반영하지 않지만, Pay-as-you-bid 경매의 실제 낙찰 가격은 공개되지 않습니다. 따라서 투명하고 일관되게 정의된 입찰 상한선은 정부의 공식적 최대 보상 수준이자 옵션 행사에 대한 객관적 상한선을 나타내는 실용적 대안 지표 역할을 합니다. 실제 선정 과정에서는 입찰가뿐만 아니라 설치 용량 단위당 연평균 온실가스 배출량(비용 효율적 배출 감축 촉진)과 전력망 안정성 요소(필수 CFPP의 퇴출 방지)도 고려하지만, 본 연구에서는 데이터 제한과 모델 구현 간소화를 위해 이 두 요소를 제외하였습니다. 이러한 전략적 단순화를 통해 본 연구는 (1) '최상의 경우'(법적으로 가능한 최대) 보상을 가정할 때 시장 가격 변동성이 조기 폐기 결정에 미치는 영향에 분석을 집중하고, (2) 상한선을 정책 수단으로 평가하여 비용 통제와 같은 정부 목표를 잠재적으로 반영하고 조기 폐기 목표 달성에 적합한지 평가할 수 있습니다. 따라서 위와 같은 한계에도 불구하고 입찰 상한선 사용은 이 특정 분석에 대해 견고하고 실용적인 기반을 제공할 수 있습니다.

이 문제에 내재된 불확실성 요소는 전력 가격과 석탄 가격으로 상정되었습니다. 전력 가격의 경우, 일부 거래는 전력구매계약(Power Purchase Agreement, PPA)을 통해 장기간 고정 가격으로 이루어지지만, 독일에서는 PPA가 주로 재생에너지 발전소에 적용되어 왔습니다. 반면, CFPP는 일반적으로 현물 시장을 통해 전력을 판매합니다. 석탄 가격 역시 가격 변동 위험을 헤지하기 위해 일정 가격 범위 내에서 오프테이크 계약(Off Take Agreement, OTA)을 체결할 수 있으나, 이 경우 최종 구매 가격은 여전히 당시 시장 가격에 의해 결정될 수 있어 시장 가격의 전반적인 영향력이 강함을 시사합니다. 따라서 전력 및 석탄 가격을 변동 요인으로 모델링하는 것은 타당합니다. 이에 근거하여 확률적 모델은 전력 및 석탄 가격에 적용되었습니다. 기타 ROA 구성 요소 중 할인율은 Jeong et al. (2023) 에 기반하여 6%로 설정되었으며, 실제 옵션 자산의 배당금과 유사하게 기능하는 발전소의 현금 흐름은 아래 3부에서 상세히 설명될 예정입니다.

모델링 대상인 독일 역경매의 구체적 환경 설정은 2021년부터 2028년까지의 경매 연도와 조기 폐기 연도를 포함합니다. 실제 경매 연도는 2020년부터 2023년까지 (7회), 조기 폐기 연도는 2021년부터 2026년까지 (7회, 2021년 2회 포함) 였습니다. 그러나 모델링 편의상 본 연구에서는 경매 및 잠재적 조기 퇴출 기간을 동일하게 가정하여, 2021년부터 매년 1회씩 총 8회 (2028년까지) 진행되는 것으로 설정했습니다. 2028년은 보상금이 지급되지 않는 해임을 유의해야 합니다. 따라서 보상금이 지급되는 기간은 실제 경매 빈도와 일치하는 7회로 한정됩니다.

**표 1: 독일 경매 입찰 상한선 (Bundesnetzagentur, 2021)**

| 라운드            | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6      | 7       |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 퇴직 연도          | 2021    | 2021    | 2022    | 2023    | 2024    | 2025   | 2026    |
| 입찰 상한선 (유로/MW) | 165,000 | 155,000 | 155,000 | 116,000 | 107,000 | 98,000 | 89,000  |
| 목표 경매 규모 (MW)  | 4,000   | 1,500   | 2,480   | 433     | 1,222   | 699    | 541.982 |

### 3.2. 입력 변수 모델링

본 연구에서 미래 가격 변동은 오르슈타인-울렌베크(Ornstein-Uhlenbeck, OU) 과정을 사용하여 확률적으로 모델링되었습니다. 이러한 선택은 본 분석의 핵심인 전력 및 석탄을 포함한 원자재 가격이 단기적으로는 무작위적으로 변동하지만 궁극적으로 장기 평균 회귀하는 경향이 잘 내재되어 있음을 반영합니다 (Das Gupta, 2021; Dixit & Pindyck, 1994; Elias et al., 2018; Ma et al., 2020b).

$$dS_t = k(\theta - S_t)dt + \sigma dW_t \quad (1)$$

방정식 (1)은 장기적 균형 수준( $\theta$ ) 주변에서 확률적 변동을 보이는 변수를 설명하며, 이 변수를 체계적으로 평균으로 되돌리는 복원력 역할을 하는 드리프트 성분( $k(S - S_t)dt$ )이 존재합니다.  $S_t$ 는 특정 시점  $t$ 에서의 상태 변수(예: 전기 가격)입니다.  $k$ 는 변수  $S_t$ 가 장기 평균으로 회귀하는 속도(평균 복귀 속도)입니다.  $\sigma$ 는 과정의 무작위 변동 또는 변동성의 크기를 측정하는 변동성 계수입니다. 마지막으로,  $dW_t$ 는 위너 과정 증분입니다. 이는 위너 과정을 따르는 무작위 충격(쇼크)을 나타냅니다.

한편, 전력 가격은 주로 석탄 가격에 기반하여 결정되므로, 이 둘 간의 상호의존성은 확률 과정에 반영되어야 합니다. 따라서 이를 위해 상관된 위너 과정(correlated Wiener processes)이 선택된다. 이는 두 개 이상의 위너 과정으로 구성된 벡터 확률 과정으로, 순간적 무작위 충격들 사이에 통계적 상관관계가 존재한다고 가정합니다. 이 상관관계는 상수 상관 계수  $\rho_{coal,elec}$  ( $\leq 1$ )로 정량화되며,  $dW_{coal}(t)$ 와  $dW_{elec}(t)$ 의 곱의 기대값을 통해 다음과 같이 공식적으로 정의됩니다:

$$E[dW_{coal}(t)dW_{elec}(t)] = \rho_{coal,elec} dt \quad (2)$$

아래 방정식 (3)과 (4)는 각각 석탄 가격과 전기 가격의 역학을 모델링하는 두 개의 상관 OU 과정을 나타냅니다.

$$dX_t = k_{coal} * (\theta_{coal} - X_t) * dt + \sigma_{coal} * dW_{coal,t} \quad (3)$$

$$dY_t = k_{elec} * (\theta_{elec} - Y_t) * dt + \sigma_{elec} * dW_{elec,t} \quad (4)$$

계산적 구현을 위해, 이 과정들은 오일러-마루야마 방법에 기반한 이산 시간 단계 접근법을 사용하여 시뮬레이션되었습니다. 식 (5)와 (6)이 그 예시입니다.  $(\epsilon_{coal}, \epsilon_{elec}) \sim N(0,1)$  및  $E[\epsilon_{coal}, \epsilon_{elec}] = \rho_{coal,elec}$ .  $\epsilon_{coal}$  및  $\epsilon_{elec}$ 를 생성하기 위해, 식 (7)과 (8)에서와 같이 독립적인 정규 분포 난수  $Z_1, Z_2 \sim N(0,1)$  (서로 독립적)이 사용되었습니다.

$$dW_{\text{coal}}(t) \approx \Delta W_{\text{coal}} = \epsilon_{\text{coal}} \sqrt{\Delta t} \quad (5)$$

$$dW_{\text{elec}}(t) \approx \Delta W_{\text{elec}} = \epsilon_{\text{elec}} \sqrt{\Delta t} \quad (6)$$

$$\epsilon_{\text{coal}} = Z_1 \quad (7)$$

$$\epsilon_{\text{elec}} = \rho_{\text{coal,elec}} Z_1 + \sqrt{1-\rho_{\text{coal,elec}}^2} * Z_2 \quad (8)$$

표 2: 확률 과정의 매개변수

| 매개변수                 | 기호                         | 값         | 설명                                  |
|----------------------|----------------------------|-----------|-------------------------------------|
| 석탄 초기 가격             | $X_t$                      | 48.47     | 2020-01-01부터<br>2020-12-31까지의 일일 평균 |
| 석탄 최저 가격             | $X_t$ 중<br>최소값             | 36.9696   | 2015-01-01부터<br>2024-12-31까지의 최저값   |
| 석탄 가격의 최대값           | 최대( $X_t$ )                | 422.0985  | 2015-01-01부터<br>2024-12-31까지의 최댓값   |
| 석탄의 평균 복귀 속도         | $k_{\text{coal}}$          | 1.1457    | OLS에서 도출됨<br>(절대값 데이터 사용)           |
| 석탄의 장기 평균            | $\theta_{\text{coal}}$     | 95.638814 |                                     |
| 석탄의 변동성 계수           | $\sigma_{\text{coal}}$     | 107.72    |                                     |
| 석탄의 평균 복귀 속도 (로그)    | $k_{\text{log,coal}}$      | 0.4750    | OLS에서 도출됨<br>(로그 변환된 데이터 사용)        |
| 석탄의 장기 평균 (로그)       | $\theta_{\text{log,coal}}$ | 101.396   |                                     |
| 석탄의 변동성 계수 (로그)      | $\sigma_{\text{log,coal}}$ | 0.5208    |                                     |
| 전력 초기 가격             | $Y_t$                      | 30.40     | 2020-01-01부터<br>2020-12-31까지의 일일 평균 |
| 최저 전력 가격             | $Y_t$ 중<br>최소값             | 0         | -                                   |
| 전력 가격의 평균 복귀 속도      | $k_{\text{elec}}$          | 23.5860   | OLS에서 도출됨<br>(절대값 데이터 사용)           |
| 전력의 장기 평균            | $\theta_{\text{elec}}$     | 71.5288   |                                     |
| 전력 변동성 계수            | $\sigma_{\text{elec}}$     | 535.3959  |                                     |
| 전력 가격의 평균 복귀 속도 (로그) | $k_{\text{log,elec}}$      | 6.1677    | OLS에서 도출됨<br>(로그 변환된 데이터 사용)        |
| 전력(로그)의 장기 평균        | $\theta_{\text{log,elec}}$ | 71.370    |                                     |
| 전력 변동성 계수 (로그)       | $\sigma_{\text{log,elec}}$ | 8.708     |                                     |
| 상관계수                 | $\rho_{\text{coal,elec}}$  | 0.85      | 계산됨                                 |
| 시간 단위                | dt                         | 0.01      | -                                   |

이러한 방정식의 구성 매개변수와 그에 상응하는 값은 상기 표 2에 제시되어 있습니다. 이 매개변수 값들은 2015.01.01부터 2024.12.31까지의 기간 동안 실제 석탄 및 전력의 역사적 일일 가격의 절대값과 자연 로그에 대해 수행된 보통최소제곱법(Ordinary Least Square, OLS) 회귀 분석에서 도출되었습니다. 먼저 석탄 가격 데이터는 Trading Economics의 "Newcastle 석탄 선물"에서 추출하였습니다. 전력 가격 데이터는 EMBER의 "유럽 도매 전력 가격 데이터"에서 수집하였습니다. 방정식 (9)에 기술된 로그 가격  $\bar{Y}_t = \ln(\bar{\text{Price}}_t)$ 에 대한 연속 시간 모델은 이산 시간으로 변환할 경우 다음과 같은 자기회귀(AR(1)) 방정식으로 표현될 수 있습니다:

$$\bar{Y}_t = a + b * \bar{Y}_{t-1} + \epsilon_t \quad (9)$$

$\bar{Y}_t$  는 시간 t에서의 로그가격이며,  $\bar{Y}_{t-1}$  는 시간 t-1에서의 로그가격 값입니다. 회귀계수 a와 b, 그리고 잔차항  $\epsilon_t$  의 표준편차는 로그가격  $\bar{Y}_t$  의 OU 매개변수와 다음과 같이 관련이 됩니다:

$$b = e^{-k\Delta t} \quad (10)$$

$$a = \theta(1 - e^{-k\Delta t}) = \theta(1 - b) \quad (11)$$

$$\text{Var}(\epsilon_t) = \sigma_\epsilon^2 = \sigma^2 \frac{1 - e^{-2k\Delta t}}{2k} \quad (12)$$

$\bar{a}$  (절편),  $\bar{b}$  (기울기) 및 잔차의 표준편차  $\bar{\sigma}_\epsilon$  는 먼저 OLS를 사용하여  $\bar{Y}_t$  을  $\bar{Y}_{t-1}$  에 회귀분석함으로써 추정됩니다. 이후 로그가격 과정의 OU 매개변수 - 평균회귀 속도(k), 장기 평균( $\bar{l}$ ), 변동성( $\bar{\sigma}$ ) - 는 이러한 OLS 추정값으로부터 도출됩니다. 각 매개변수에 대해 특정 검증 조건이 필수적입니다:

평균 복귀 속도(k)는  $\bar{b}$  에서 도출되며, 로그 변환이 유효하기 위해서는  $\bar{b}$  가 양수여야 합니다 (실질적으로  $\bar{b} > 1 \cdot e^{-10}$ ).  $\bar{b}$  가 1에 가까울수록 k는 0에 접근하여 평균 복귀가 약하거나 무시할 수 있음을 나타냅니다. 반대로  $\bar{b} > 1$ 은 발산 과정을 의미하며, 이는 OU 프레임워크와 일관되지 않습니다. 장기 평균( $\bar{l}$ )의 추정(일반적으로  $\bar{l} = \bar{a} / (1 - \bar{b})$  로 계산됨)은 분모( $1 - \bar{b}$ )가 0에서 크게 벗어나야 합니다.  $\bar{b}$  가 1에 가까울 경우 이 분모는 0에 접근하여 추정을 불안정하게 만듭니다. 이는 종종  $k \approx 0$ 인 시나리오와 일치하며, 장기 평균으로의 회귀 경향이 최소화되었음을 의미합니다. 마지막으로, 변동성( $\bar{\sigma}$ ) 계산에는 k에 대한 양의 추정값과 유효한  $\bar{\sigma}$ 가 필요합니다. 또한 일반적인  $\bar{\sigma}$  도출식의 분모에 나타나는 항  $(1 - \bar{b})$ 은 반드시 양수여야 합니다.  $(1 - \bar{b}) \leq 0$ , 즉  $|\bar{b}| \geq 1$ 인 경우, 이는 불안정적 평균회귀 과정( $k \leq 0$ 과 상관관계 있음) 또는 계산적 불안정성을 나타냅니다.

OU 과정 매개변수 추정 시 가격 데이터에 로그 변환을 적용하면 뚜렷한 장점이 있습니다:

본질적으로 가격을 양수 범위 내에 유지하며 백분율 변동성 추정치의 안정성을 높입니다. 그러나 이 접근법은 고변동성 시나리오를 모델링하지 못할 수 있어 해당 조건에서 직관적이지 않은 시뮬레이션 결과를 초래할 수 있습니다. 반면, 로그 변환되지 않은 (절댓값) 가격 데이터를 직접 매개변수 추정에 사용하면 음수 가격의 가능성을 허용하며, 절대 변동성을 추정하게 됩니다. 그러나 이는 가격의 절대적 변화를 직접 모델링하므로 특정 시장 상황에서 더 직관적이거나 현실적으로 보이는 결과를 생성할 수 있습니다.

본 연구에서는 확률적 가격 프로세스에 대해 이러한 서로 다른 접근법(로그 변환된 가격 데이터 사용 여부)을 시뮬레이션하고 비교하여 결과를 도출했습니다. 로그 변환되지 않은 가격 데이터를 기반으로 한 시뮬레이션의 경우, 현실성을 보장하기 위해 다음과 같은 가정을 적용했습니다: 석탄 가격 범위는 역사적 가격 데이터를 바탕으로 최소값과 최대값이 정의되었습니다. 전력 가격의 경우, 재생에너지 공급 과잉 기간으로 인해 일간 또는 시간당 수치가 가끔 음수가 될 수 있지만, 연간 평균 전기 가격이 음수인 사례는 기록상 존재하지 않습니다. 따라서 본 연구 시뮬레이션에서 전기 가격의 하한선은 0으로 설정되었습니다.

그림 1은 로그 변환된 과거 가격 데이터로부터 추정된 OU 매개변수를 활용하여 (a) 석탄 가격 경로와 (b) 전기 가격 경로의 시뮬레이션 궤적을 제시합니다. 이 경로들은 로그 수익률 기반 모델의 특징인 상대적으로 제한된 변동성을 보이며, 각각의 장기 평균을 향해 전반적인 상승 추세를 보입니다. 반면, 그림 2는 절댓값(로그 변환되지 않은) 역사적 가격 데이터에서 직접 도출한 OU 매개변수를 사용한 (a) 석탄 가격 및 (b) 전기 가격의 시뮬레이션 경로를 보여줍니다. 그림 2의 가격 경로는 특히 설정된 가격 범위 내의 전기(그림 2b)에서 그림 1의 경로보다 현저히 높은 변동성을 명확히 나타냅니다.

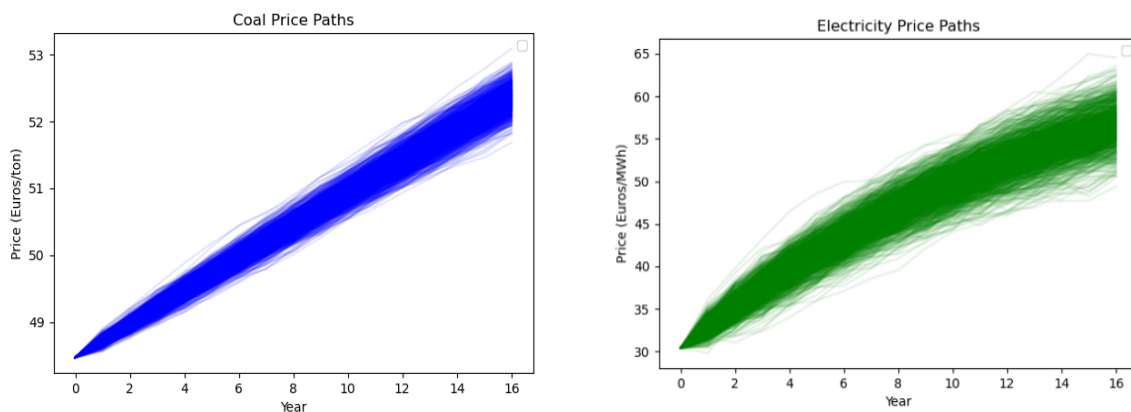


그림 1: 로그 변환된 데이터에서 도출된 매개변수를 사용한 (a) 석탄 가격 경로 및 (b) 전력 가격 경로 시뮬레이션

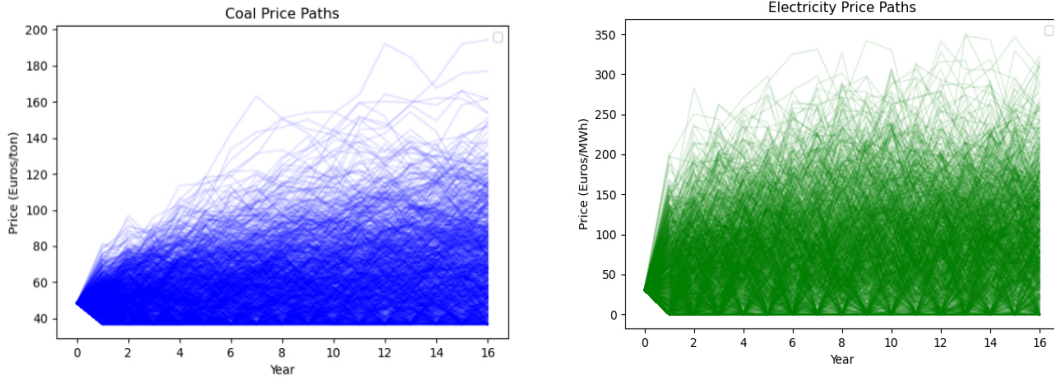


그림 2: 절대값 가격 데이터에서 도출된 매개변수를 사용한 (a) 석탄 가격 경로 및 (b) 전력 가격 경로 시뮬레이션

### 3.3. 현금 흐름 분석

ROA 프레임워크 내에서 순현금흐름은 CFPP 자산의 미래 운영 기간 동안 예상 지속 가치 (Expected Continuation Value, ECV)를 결정하는 핵심 요소입니다. 순현금흐름(Net Cash Flow, NCF)은 각 예상 시점에서 수익에서 비용을 차감하여 산출됩니다. 본 연구에서는 생산된 전력을 전량 현물 시장에 판매한다는 가정 하에 수익을 구성하는 전력 가격과 연료 비용을 결정하는 석탄 가격을 각각 확률 과정으로 모델링하여 계산했습니다. 현금흐름 분석에 사용된 방정식과 데이터는 아래와 같습니다.

$$NCF_t = \text{Revenue} - \text{Operation and Maintenance cost} - \text{Fuel cost} - \text{Carbon cost} - \text{Coal transportation cost} \quad (13)$$

$$\text{Revenue (Euros)} = \text{electricity price} \left( \frac{\text{euros}}{\text{MWh}} \right) * \text{power generation (MWh)} \quad (14)$$

$$\text{OM cost (euros)} = \text{fixed operating costs (euros/kW)} * \text{capacity (kW)} + \text{variable operating costs} \left( \frac{\text{euros}}{\text{MWh}} \right) * \text{power generation (MWh)} \quad (15)$$

$$\text{Fuel cost} = \text{coal price} \left( \frac{\text{euros}}{\text{ton}} \right) * \text{conversion factor of coal in ton to MWh} / 1000 / \text{Unit efficiency rate} * \text{power generation (MWh)} \quad (16)$$

$$\text{Carbon cost} = \text{carbon price} \left( \frac{\text{euros}}{\text{tonCO}_2} \right) * \text{conversion factor of CO}_2 \text{ in ton to MWh} * \text{emission factor} / 1000 / \text{unit efficiency rate} * \text{power generation (MWh)} \quad (17)$$

$$\text{Coal transportation cost} = \text{transportation unit cost} * \text{power generation (MWh)} \quad (18)$$

**표 3: 'Mannheim' 발전소 현금 흐름 분석 매개변수**

| 매개변수                   | 값                             | 단위         | 출처                                 |
|------------------------|-------------------------------|------------|------------------------------------|
| 전력 가격                  | '3.2 입력 변수 모 델링'의 확률적 모 델링 결과 | 유로/MWh     | Trading Economics (2025)           |
| 발전량                    | 1,863,491,000                 | kWh        | SMARD.de (2025)                    |
| 고정 운영 비용               | 40.00                         | 유로/kW      | EMBER (2020)                       |
| 용량                     | 912,000                       | kW         | SMARD.de (2025)                    |
| 가변 운영 비용               | 0.0020                        | 유로/kWh     | EMBER (2020)                       |
| 석탄 가격                  | '3.2 입력 변수 모 델링'의 확률적 모 델링 결과 | 유로/ton     | Trading Economics (2025)           |
| 톤 단위의 석탄을 MWh로 변환하는 계수 | 0.143342                      | -          | EMBER (2020)                       |
| 단위 효율                  | 표 4 참조                        | -          | EMBER (2020)                       |
| 탄소 가격                  | 표 5 참조                        | 유로/tonCO2  | Trading Economics (2025)           |
| CO2의 톤에서 MWh로의 변환 계수   | 0.3333                        | -          | EMBER (2020)                       |
| 배출 계수                  | 1                             | tonCO2/MWh | 유럽 오염물질 배출 및 이동 등록부(E-PRTR) (2025) |
| 운송 단위 비용               | 0.0011                        | 유로/kWh     | EMBER (2020)                       |

본 분석은 주로 독일 바덴뷔르템베르크 주에 위치한 만하임(Mannheim) 발전소라는 단일 CFPP를 중심으로 수행되었습니다. 해당 발전소는 2015년에 가동을 시작했으며 2055년에 폐기될 것으로 가정했습니다. 이후 모델 타당성 평가를 위해 경매에 참여한 18개 CFPP와 경매에 참여하지 않았거나 경매에서 탈락한 16개 CFPP를 대상으로 분석을 진행했습니다. 표 3의 변수 중 단위 효율과 배출계수는 발전소 사양을 기반으로 일부 가정을 통해 결정되었습니다. 단위 효율은 발전소의 연령에 따른 효율을 나타냅니다. 클래스를 구분하여 0.325~0.475의 범위를 부여하고 가동 연도에 따라 5단계로 분류하였습니다 (표 4 참조). 배출계수는 2016년부터 2020년까지의 CO2 배출량과 발전량 데이터를 바탕으로 계산되었으며, 0.79에서 1.71 사이의 범위를 가집니다. 해당 데이터를 확보할 수 없는 발전소의 경우 1을 대신 적용하였습니다.

**표 4: 발전소 효율 등급**

| 등급 | 시작 연도 | 종료 연도 | 단위 효율  |
|----|-------|-------|--------|
| 1  | 1950  | 1964  | 0.325  |
| 2  | 1965  | 1979  | 0.3625 |
| 3  | 1980  | 1994  | 0.4    |
| 4  | 1995  | 2009  | 0.4375 |
| 5  | 2010  | 2024  | 0.475  |

탄소 가격 측면에서 두 가지 시나리오가 모델링되었습니다: (i) 2020년부터 2022년까지 고정값 (28.60 유로/tonCO2), 2023년부터 2038년까지 실제 탄소 가격 데이터에 따른 68.45 유로/tonCO2, (ii) NiGEM NGFS v1.24.2[GCAM 6.0 NGFS]로 모델링된 조정된 국가별 기여 목표(Nationally Determined Contribution, NDC) 시나리오 값. 두 번째 사례의 경우, 2020년부터 2023년까지의 값은 실제 탄소 가격 데이터에서 가져왔으며, 그 외 값은 NGFS 시나리오에서 가져왔습니다.

**표 5: 탄소 가격 시나리오 (NGFS, 2025)**

| 연도   | 가격 (유로/톤CO2) |
|------|--------------|
| 2020 | 28.60        |
| 2021 | 28.60        |
| 2022 | 28.60        |
| 2023 | 68.45        |
| 2024 | 82.8646662   |
| 2025 | 143.538468   |
| 2026 | 204.212265   |
| 2027 | 264.886061   |
| 2028 | 325.559856   |
| 2029 | 357.124788   |
| 2030 | 371.224401   |
| 2031 | 385.324015   |
| 2032 | 399.423628   |
| 2033 | 399.423628   |
| 2034 | 399.423628   |
| 2035 | 399.423628   |
| 2036 | 399.423628   |
| 2037 | 399.423628   |

### 3.4. 최소제공 몬테카를로를 이용한 동적 계획법

프로젝트나 자산 포기를 선택할 수 있는 옵션의 가치 평가는 순차적 의사결정 과제를 제시합니다. 옵션 보유자는 만기 전 언제든지 이 권리를 행사할 재량권을 가집니다. 각 잠재적 행사 기회에 최적의 행동 방침(계속 또는 중단)을 결정해야 하는 이 평가 문제의 본질적 복잡성을 효과적으로 해결하기 위해, 벨만의 최적성 원리에 기반한 DP 알고리즘이 활용될 수 있습니다 (Fatica & Phillips, 2013; Jeong et al., 2023). DP 방법론은 불확실성 조건 하에서 전개되는 다양한 순차적 의사결정 문제를 해결하기 위한 강력한 프레임워크를 제공하며, 역방향 재귀(backward recursive process) 과정을 통해 최적 전략을 반복적으로 도출합니다 (Amram & Kulatilaka, 1999; Jeong et al., 2023; Rust, 2019). 의사 결정 기간 내 주어진 시간 단계 't'에서, 미래 시퀀스 전체는 분석적으로 두 개의 별개의 세그먼트로 분할될 수 있습니다: 시간 't'를 포함하는 즉각적인 기간과, 시간 't+1'부터 종결 시간 'T'까지 이어지는 후속 지속 기간입니다. 중요한 점은 후자 구간에서 도출된 예상 미래 가치가 현재 시점 't'의 의사 결정 과정에 체계적으로 통합되어 포괄적이고 선제적인 평가를 가능하게 한다는 것입니다.

주어진 시간 't'에서, 우리는 현재 상황을 설명하는 '상태 변수'( $S_t$ )와 취해진 행동을 나타내는 '결정 변수'( $A_t$ )를 정의할 수 있습니다.  $S_t$  는 현재 석탄 가격과 현재 전기 가격을 나타낼 수 있습니다. 이 경우, 옵션 행사 여부라는 두 가지 가능한 행동만 존재하므로 결정 변수  $A_t$ 는 이진값으로 간주할 수 있습니다:  $A = \{\text{옵션 행사}, \text{옵션 미행사}\}$ . 의사 결정자가 행동  $A_t$ 을 선택하면, 현재 상태와 선택된 행동 모두에 따라 결정되는 즉각적인 수익  $C_t(S_t, A_t)$ 이 발생합니다. 발전소 운영자가 폐기 옵션을 행사하면  $C_t(S_t, A_t)$  는 행사가격이 됩니다. 그러나 발전소 운영자가 옵션을 행사하지 않을

경우,  $C_t(S_t, A_t)$  는 현재 순현금흐름이 됩니다. 시간 't'에서의 옵션 가치  $V_t(S_t)$  는 해당 시점부터 최적의 의사결정을 통해 달성 가능한 모든 예상 미래 수익의 현재가치입니다. 즉시 현금 흐름은 추정된 '계속 가치'  $current\ net\ cashflow + \gamma E[V(S_{t+1})|S_t = s]$  와 비교됩니다. 이는 현재 순 현금 흐름에 추가된 할인된 미래 가치입니다.  $\gamma$  는  $1 / (1 + \text{할인율})$ 입니다. 방정식 (19)는 방정식 (20)으로도 상세히 표현될 수 있습니다. 현재 상태 변수를 기반으로 't+1'의 기대값을 구하기 위해 회귀 분석이 사용됩니다.

$$V_t(S_t) = \max_{A_t} \{C_t(S_t, A_t) + \gamma E[V(S_{t+1})|S_t = s]\} \quad (19)$$

$$V_t(S_t) = \max\{strike, current\ net\ cashflow + \gamma E[V(S_{t+1})|S_t = s]\} \quad (20)$$

현재 순현금흐름을 할인된 미래가치에 통합하여 지속가치를 도출함으로써, 본 모델은 중간 현금흐름을 반영할 수 있습니다. 이러한 중간 현금흐름은 주식 옵션에서의 배당금, 채권 옵션에서의 이자 지급, 또는 실물 옵션 분석에서의 운영 현금흐름과 유사합니다. 따라서 계산된 할인 미래 가치는 시간 't+1', 't+2'부터 시간 'T-1'까지의 현재 순 현금 흐름에 대한 기대 현재 가치의 합계를 포괄합니다. 이러한 설계는 예상 폐기 시점까지 CFPP 운영에서 발생하는 모든 미래 현금 흐름이 기대 미래 가치에 포괄적으로 반영되도록 보장합니다.

또한 시간 t에서의 최적 정책 ( $A_t^*$ )은 당장의 보상과 그 시점부터 가능한 모든 전략을 따를 때 얻을 수 있는 잠재적 미래 보상을 모두 고려할 때 가능한 최고 가치를 제공하는 정책입니다. 달성 가능한 최고 가치는 각 단계에서 지속적으로 최선의 행동을 선택할 때 받을 수 있는 모든 보상의 총합입니다. 이는 다음과 같이 표현될 수 있습니다:

$$A_t^* = \operatorname{argmax}_{A_0, \dots, A_T} \{C_t(S_t, A_t) + \gamma E[V(S_{t+1})|S_t = s]\} \quad (21)$$

Longstaff and Schwartz (2001)가 제안한 LSMC 기법은 시뮬레이션을 통해 미국식 옵션의 가치를 근사하는 효율적이고 견고한 방법론을 제공합니다. 이 접근법의 핵심은 최소제곱법을 활용하여 옵션 보유자가 계속 보유함으로써 얻는 조건부 기대 수익을 추정하는 데 있습니다. 전통적인 유한차분 기법과 이항 모델은 옵션 가치에 영향을 미치는 다중 요인이 존재하거나 경로 의존적 특성이 나타나는 시나리오에 적용할 때 한계에 부딪힙니다. 반면 시뮬레이션 기반인 LSMC 방법은 이러한 복잡한 상황에서 유연성을 발휘합니다. 시뮬레이션은 다중 요인 문제(본 사례의 석탄 가격과 전력 가격), 경로 의존적 특성, 평균 복귀 과정과 같은 일반적 확률 과정 등 다양한 상황에 쉽게 적용 가능하며, 병렬 컴퓨팅에도 적합하여 계산 속도와 효율성을 높입니다.

최적 행사 전략은 근본적으로 옵션을 계속 보유할 경우의 조건부 기대 수익에 의해 결정됩니다. LSMC의 핵심 아이디어는 최소제곱법을 통해 시뮬레이션에서 얻은 횡단면 정보를 활용하여 이 조건부 기대값을 추정하는 것입니다. 구체적으로, 각 시간 단계에서 옵션을 계속 보유한 후 실현된

수익을 상태 변수의 함수에 대해 회귀분석합니다. 이 회귀 분석의 적합값은 조건부 기대값 함수에 대한 직접적인 추정치를 제공하여 각 경로에 따른 최적 행사 전략을 완전히 명시할 수 있게 합니다. 이렇게 명시적으로 정의된 최적 행사 전략을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 미국식 옵션의 가치를 정확히 평가할 수 있습니다.

구체적으로 시간 't'에서 시뮬레이션 경로 'i'에 대해 회귀는 다음과 같이 설정됩니다:

### 종속 변수(Y)

종속 변수  $Y_{i,t}$ 는 다음 시간 단계 't+1'에서 실현되는 현금 흐름으로, 할인율 'r'과 각 경로 'i'를 사용하여 현재 시간 't'의 가치로 할인됩니다. 그러나 조기 퇴직 옵션의 만기( $T_{opt}$ , in this case, 8)가 발전소의 전체 운영 수명(T)보다 앞서는 상황에서는 시간 단계에 따라 차이가 발생합니다. 이러한 상황은 독일의 CFPP 조기 폐기 정책과 특히 관련이 있는데, 이 정책에서는 조기 폐기에 대한 보상 또는 인센티브가 제한된 기간 동안만 제공됩니다.

$$Y_{i,t} = \frac{CF_{i,t+1}^{realized}}{1+r} \quad (22)$$

(i) 옵션 유효 기간( $t < T_{opt}$ ) 동안:

이 기간 내 각 시점 t에서의 결정은 옵션 행사 시 즉시 발생하는 수익(사전 정의된 행사가격  $S_t$ , 조기 폐쇄에 대한 보상)과 기대현금가치  $E[C_{i,t}]$ 를 비교하는 것을 포함합니다.

$$CF_{i,t}^{realized} = \max \{S_t, E[C_{i,t}]\} \quad (23)$$

(ii) 옵션 만료 후, 잔여 프로젝트 기간 동안 ( $T_{opt} \leq t < T-1$ ):

옵션의 행사 기간이 종료되면 행사가격  $S_t$ 을 받을 가능성은 더 이상 존재하지 않습니다( $S_t = 0$ ). CFPP는 조기 폐기되지 않은 경우 운영을 지속할 것으로 가정합니다. 따라서 해당 기간의 실현 현금 흐름은 순수하게 ECV로, 지속적인 운영 수익을 반영합니다.

$$CF_{i,t}^{realized} = E[C_{i,t}] \quad (24)$$

$E[C_{i,t}]$ 의 계산은 일관성을 유지하며,  $NCF_{i,t}$  및 상태 변수에 대한 회귀 분석을 통해 추정된 후속 운영 기간의 할인된 기대 수익률  $CF_{i,t+1}^{realized}$ 을 반영합니다.

(iii) 프로젝트의 최종 시점( $t = T-1$ )에서:

실현 현금 흐름은 이후 현금 흐름이 존재하지 않으므로, 이 최종 운영 기간에서 생성된 실제 순 현금 흐름입니다.

$$CF_{i,T-1}^{realized} = NCF_{i,T-1} \quad (25)$$

옵션 만기를 기반으로 한 이러한 차별화된 모델링은 전략적 조기 폐기 결정의 제한된 시간대를 정확히 반영하면서도 자산의 전체 예상 운영 수명 동안의 경제적 가치를 포착하는 정교한 평가를 가능하게 합니다. 각 시간 단계  $t$ 에서 미래 현금 흐름과 관련된  $E[C_{i,t}]$  구성 요소를 추정하기 위해 수행된 회귀 분석은 이후 단계 't+1'에서 이미 결정된  $CF_{i,t+1}^{realized}$  값을 종속 변수로 사용합니다.

### 독립 변수(X)

독립 변수  $X_{i,t}$ 는 시간  $t$ 의 상태 변수로 구성됩니다. 이 맥락에서 CFPP의 주요 상태 변수는 현재 석탄 가격( $P_{coal,i,t}$ )과 전기 가격( $P_{elec,i,t}$ )입니다. 회귀 모델의 설명력을 높이기 위해, 이 모델은 선행량, 제곱 항 및 이들 변수의 상호작용 항을 포함하는 다항식 형태로 구성됩니다.

$$X_{i,t} = [1, P_{coal,i,t}, P_{elec,i,t}, P_{coal,i,t}^2, P_{elec,i,t}^2, P_{coal,i,t} * P_{elec,i,t}] \quad (26)$$

### 회귀 모델(Regression model)

$$Y_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 P_{coal,i,t} + \beta_2 P_{elec,i,t} + \beta_3 P_{coal,i,t}^2 + \beta_4 P_{elec,i,t}^2 + \beta_5 P_{coal,i,t} * P_{elec,i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (27)$$

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_5$ 는 회귀 계수이며  $\epsilon_{i,t}$ 는 오차항입니다. 추정된 계수를 사용하여 독립 변수  $X_{i,t}$ 를 회귀 모델에 대입하면 다음과 같이 얻어집니다.  $E[Y_{i,t} | X_{i,t}]$  이 항은 현재 시간  $t$ 에서 상태 변수  $X_{i,t}$ 를 주어진 조건 하에  $Y_{i,t}$ 의 조건부 기대값으로 나타냅니다. 이 조건부 기대값  $E[Y_{i,t} | X_{i,t}]$ 은 현재 시간  $t$ 에서의 순현금흐름  $NCF_{i,t}$ 와 결합되어 기대 지속가치  $E[C_{i,t}]$ 를 구성합니다.

$$E[C_{i,t}] = NCF_{i,t} + E[Y_{i,t} | X_{i,t}] \quad (28)$$

회귀 모델의 다중공선성 문제 해결과 관련하여 Longstaff와 Schwartz(2001)는 일부 기저 함수 선택이 높은 상관관계를 보일 수 있어 개별 계수 추정 시 다중공선성 유사 문제가 발생할 수 있으나, LSM 알고리즘은 개별 계수보다 회귀의 추정값에 초점을 맞추므로 이러한 어려움이 영향을 미치지 않는다고 설명합니다. 회귀의 추정값은 설명변수들 간의 상관도 수준에 영향을 받지 않습니다. 또한 Jeong 등(2023)은 LSMC 회귀에서 낮은 조건부 기대값( $R^2$ ) 값이 흔히 예상된다고 지적했습니다.

이는 실현 현금흐름이 조건부 기대값 주변에서 내재적 변동성을 보이기 때문입니다. 낮은  $R^2$  값은 단순히 예상치 못한 현금 흐름의 변동성이 예상 현금 흐름의 변동성에 비해 크다는 것을 의미합니다. 핵심적으로, 그들은 "LSM 알고리즘이 2차 모멘트가 아닌 조건부 1차 모멘트를 기반으로 하기 때문에, 회귀 분석의  $R^2$ 은 미국식 옵션 가치에 대한 LSM 근사값의 품질에 거의 영향을 미치지 않아야 한다"고 주장합니다.

결과적으로, 본 연구에서 ROA는 두 가지 주요 출력 변수를 생성합니다. 첫째, 1,000회의 시뮬레이션 시험을 통해 매년 조기 퇴직 옵션이 행사되는지 여부를 나타냅니다. 둘째, 이러한 시뮬레이션에서 도출된 옵션의 평균 최적 행사 시점을 제공합니다. 최적 행사 전략은 역방향 추론에 기반한 접근법인 LSMC를 활용한 DP(확률적 계획법)를 통해 결정됩니다. 이 방법론에서는 옵션 만기일을 기준으로 역방향으로 추론하여 각 시간 단계별 의사결정 규칙을 수립합니다. 핵심적으로, 아메리칸 옵션의 특성상 옵션 만기 전까지 단 한 번만 행사할 수 있습니다. 예를 들어, 특정 경로에서 t=2 시점에 옵션을 행사하는 것이 최적이라고 판단되면, 옵션은 즉시 만료되어 이후 시점(예: t=3)에서의 행사 기회를 차단합니다. 따라서 본 분석은 각 시뮬레이션 경로 내에서 행사가 최적화되는 가장 빠른 시점을 식별하는 데 초점을 맞춥니다. 이러한 최적 행사 시점들의 평균값은 몬테카를로 시뮬레이션으로부터 도출된 단일 통합 지표를 제공하며, 이는 이후 민감도 분석에 활용됩니다.

### 3.5. 민감도 분석

민감도 분석은 모델 입력 매개변수 또는 가정의 변화에 따른 모델 출력의 반응성을 정량적으로 평가하는 분석 기법입니다. 근본적으로 "가상 시나리오 분석"의 변형으로 간주됩니다. 예를 들어 금리 1% 변동이 순현재가치(NPV)에 미치는 영향 분석이 이에 해당합니다. 감도 분석의 주요 목적은 모델 내재적 불확실성을 이해하고 효과적으로 관리하는 데 있습니다. 또한 모델 결과에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 요인을 식별하는 데 기여합니다. 이는 의사 결정 과정이나 위험 관리 전략 수립 시 세심한 주의가 필요한 요소를 파악하는 통찰력을 제공합니다. 더불어 감도 분석은 모델의 견고성을 평가하는 중요한 도구로 기능합니다. 모델의 출력이 입력 변수의 변화에 대해 일관성을 보이고 편차가 최소화된다면 해당 모델은 견고하다고 평가될 수 있습니다. 반대로 입력 변수의 미미한 변화가 출력에 큰 변동을 초래한다면, 이는 모델의 기본 가정이 중요함을 시사하며 해당 가정이 수정될 때 각별한 주의가 필요함을 의미합니다.

특정 시점과 특정 자산을 대상으로 한 모델링 작업에는 해당 기간과 주체의 고유한 특성을 지닌 입력 변수가 종종 포함됩니다. 예를 들어, 2020년(본 연구의 대상 연도)은 코로나19 팬데믹, 그린 달의 부상, 대체 발전원 가격 하락 등 여러 요인이 복합적으로 작용하여 독일의 무연탄 화력발전소가 상대적으로 적은 전력을 생산한 독특한 시기를 나타냅니다. 이러한 독특한 시기적 특성과 예외적 상황을 반영한 입력 변수를 사용하여 모델을 구축하고 분석할 경우, 결과는 이러한 잠재적 비정상적 조건에 크게 좌우될 가능성이 높습니다. 이러한 이유로 민감도 분석이 수행되었습니다. 이러한 입력 매개변수의 변동이 모델 결과에 미치는 영향을 체계적으로 조사함으로써, 기준 시나리오에 내재된 독특한 가정에 대한 결과의 견고성을 평가하고 특정 입력값에 대한 결과 의존도의 정도를 이해하기 위함입니다.

감도 분석 수행의 일반적 절차는 다음과 같습니다: (i) 기준 사례 설정, (ii) 감도 분석 대상 변수 선정, (iii) 해당 변수의 변동 범위 및 방법론 정의, (iv) 모델 실행 및 결과 도출, (v) 결과 해석 및 검토.

본 연구에서는 소볼(Sobol) 방법론이라 불리는 글로벌 민감도 분석(Global Sensitivity Analysis, GSA)을 사용하였습니다. 소볼 방법은 모델 출력의 불확실성을 입력 변수의 불확실성에 정량적으로 귀속시키는 대표적인 분산 기반 GSA 기법으로, 개별 효과와 상호작용 효과를 모두 고려합니다. 총 출력 분산을 분해하여 소볼 지수를 계산합니다. 1차 민감도 지수( $S1_i$ )는 입력 변수  $X_i$ 가 모델 출력 Y의 총 분산에 개별적으로 기여하는 비율을 나타낸다.  $V(Y)$ 는 모델 출력 Y의 총 분산입니다.

$E_{X_{\sim i}}(Y|X_i)$ 는  $X_i$ 가 특정 값으로 고정된 상태에서 Y의 조건부 기대값으로, 이 기대값은 다른 모든 입력 변수  $X_{\sim i}$ 의 변동에 대해 계산됩니다.  $V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y|X_i))$ 는  $X_i$ 가 그 범위 전반에 걸쳐 변화함에 따른 조건부 기대값의 분산입니다. 이 항은  $X_i$ 의 주효과에 기인한 분산을 정량화한다.

$$S1_i = \frac{V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (29)$$

총효과 지수( $ST_i$ )는 입력 변수  $X_i$ 가 모델 출력 Y의 분산에 기여하는 전체 정도를 측정합니다. 여기에는 개별 기여도(주효과)뿐만 아니라 다른 입력 변수들과의 모든 상호작용(모든 차수)을 통한 기여도도 포함됩니다.  $ST_i$  값이 높을수록  $X_i$ 이 중요한 변수임을 나타내며, 직접 효과나 다른 변수와의 상호작용을 통해 출력의 변동성에 크게 기여함을 의미합니다.  $ST_i$ 가  $S1_i$ 보다 현저히 클 경우, 변수  $X_i$ 이 다른 변수들과 강한 상호작용 효과를 가짐을 시사합니다. 이 차이는 해당 상호작용들의 기여도를 정량화한 것입니다.

$$ST_i = 1 - \frac{V_{X_{\sim i}}(E_{X_i}(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (30)$$

소볼 방법의 주요 장점으로서는 단순한 방법으로는 종종 놓치기 쉬운 복잡한 상호작용 효과를 엄밀하게 정량화할 수 있는 능력, 가장 영향력 있는 입력 변수를 식별하여 견고한 요인 우선순위를 용이하게 하는 점, 입력 변수의 불확실성이 출력으로 어떻게 전파되는지 밝혀 모델 단순화를 안내하고 전반적인 모델 이해도를 향상시키는 점이 포함됩니다. 분석을 수행하기 위해 민감도 분석용 오픈소스 Python 라이브러리인 SALib을 사용했습니다 (Herman & Usher, 2017; Iwanaga et al., 2022).

민감도 분석을 위해 입력 변수는 두 가지 주요 그룹으로 분류되었습니다. 첫 번째 그룹인

'프로젝트별 매개변수'에는 단위 효율, 배출계수, 연간 발전량(또는 발전 용량), 가동 연도 등의 변수가 포함됩니다. 이러한 매개변수는 해당 자산에 내재된 근본적인 물리적, 경제적, 운영적 특성을 정의합니다. 따라서 그 값은 본질적으로 자산에 의존적이며, 다른 자산을 분석할 경우 달라질 것입니다. 따라서 이 그룹의 분석은 모델 결과에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 자산별 특성이 무엇인지 규명하는 데 목적이 있습니다. 이러한 변수들은 자산 가치의 내재적 가치와 더 밀접한 관련이 있기 때문입니다.

반면 두 번째 그룹은 '환경 및 확률적 매개변수'로, 석탄/전기 가격 변동률, 석탄/전기 장기 평균 가격, 석탄/전기 가격의 평균 복귀 속도, 석탄 가격과 전기 가격 간의 상관 계수, 드리프트율 및 탄소 가격을 포함합니다. 이들은 시장 관련 변수의 확률적 움직임을 설명하는 외부 요인으로, 미래의 불확실성을 모델링합니다. 이러한 변수들은 불확실성의 특성과 규모를 결정하므로, 전체 자산 가치 평가에 내재된 유연성 또는 실물 옵션 가치 결정에 특히 큰 영향을 미칩니다. 옵션 가치(유연성 가치)는 기초 자산 가격 변동성이 높을수록 증가하는 경향이 있습니다.

## 제4장. 연구 결과

본 절에서는 역경매 메커니즘 하에서 운영되는 독일의 대표적인 석탄화력발전소인 만하임 시설에 대한 경제적 가치 평가 및 최적 조기 폐쇄 시점 평가 결과를 제시합니다. 평가는 독일의 실제 석탄화력발전소 조기 폐쇄 역경매 시작 시점과 일치하도록 2020년을 기준 연도로 설정하고, 1,000회의 몬테카를로 시뮬레이션 시험을 활용한 실물 옵션 분석을 통해 수행되었습니다. 첫째, 석탄 및 전력 가격 데이터는 두 가지 방식으로 확률적으로 모델링되었습니다: (i) 로그 변환된 가격 데이터 사용, (ii) 절대값 가격 데이터 사용. 둘째, 자산의 성과는 두 가지 탄소 가격 시나리오 하에서 모델링되었습니다: (i) 2024년부터 시행되는 고정 탄소 가격 시나리오, (ii) 독일의 NDC(국가 결정 기여) 경로와 일치하는 동적 탄소 가격 시나리오(금융 시스템 녹색화 네트워크(NGFS)의 전망 자료 활용).

이 단일 자산 실물 옵션 분석의 주요 결과물(순현재가치 분포, 조기 폐쇄 옵션 행사에 관한 최적 결정, 옵션 행사 평균 최초 연도 등)은 아래에 상세히 기술됩니다. 또한, 34건의 실제 독일 CFPP 사례에서 얻은 실제 발전소 운영 데이터를 활용한 후속 포괄적 민감도 분석 및 모델 타당성 평가 결과도 본 절에서 제시하고 논의합니다.

### 4.1. 단일 자산 실물 옵션 분석 결과

#### 4.1.1. 통제된 변동성(로그 변환된 가격 데이터 사용)

시뮬레이션된 순현금흐름 경로는 연도 0에 약 -5000만 유로에서 시작하여 연도 2까지 개선 추세를 보입니다(그림 3 참조). 그러나 이후 경로는 급격히 악화되어 순현금흐름이 3년차에 -98백만 유로까지 하락합니다. 이후 현금흐름 경로는 전기 가격 상승과 함께 점진적으로 회복되어 시뮬레이션 기간 후반에는 약 -60백만 유로 수준으로 돌아가는 추세를 보입니다. 3년차의 급격한 하락의 주요 원인은 탄소 가격 책정 방식의 변경 가정 때문입니다. 2020년(0년차)부터 2022년(2년차)까지는 톤당 28.60유로의 탄소 가격이 가정되었습니다. 이 가격은 2023년부터 2038년까지(3년차 이후 포함) 톤당 68.45유로로 크게 상승합니다. 이러한 탄소 가격의 단계적 변화가 순현금흐름 결과에 영향을 미친다는 점이 명백합니다. 또한 시뮬레이션 후반 연도에는 개별 현금 흐름 경로 간 편차가 증가하는 현상이 관찰됩니다. 이러한 분산 확대는 장기 전망의 불확실성증가를 의미합니다.

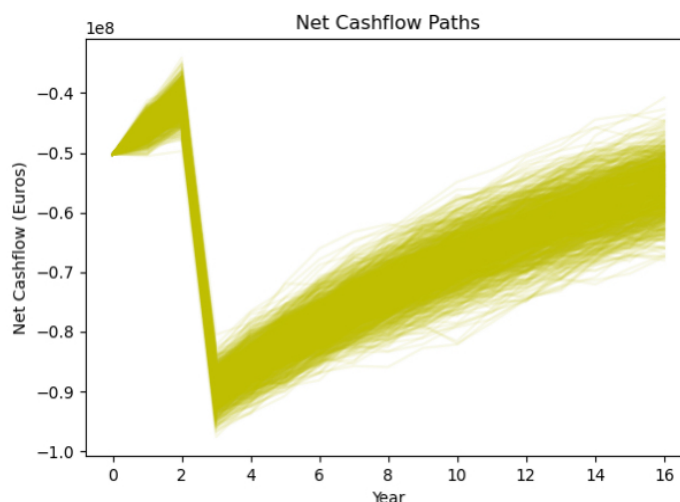


그림 3: 로그 변환된 가격 데이터를 사용한 만하임 공장 미래 순현금흐름

그림 4는 순현금흐름의 연간 분포를 보여주는 박스 플롯을 제시합니다. 이 플롯들은 그림 3에서 관찰된 전체 순현금흐름 추세를 반영하는 연간 통계적 요약 정보를 제공합니다.

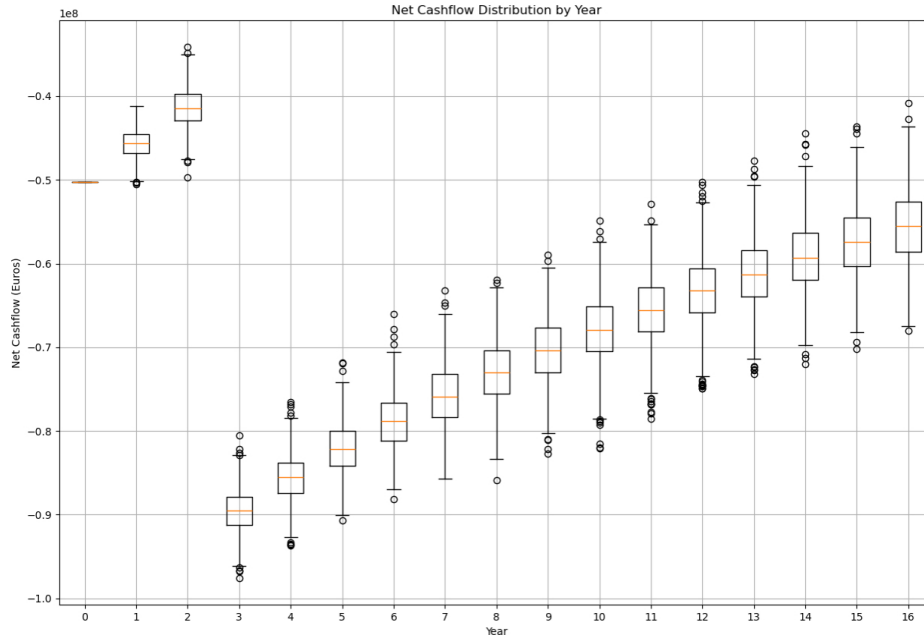


그림 4: 로그 변환된 가격 데이터를 사용한 만하임 공장 미래 순현금흐름 박스 플롯

독일 NDC 탄소 가격 시나리오를 반영한 공장의 시뮬레이션된 미래 순현금흐름은 그림 5에 제시되어 있습니다. 분석 결과 초기 순현금흐름은 약 -7천만 유로로 나타났습니다. 이후 현금흐름은 급격히 악화되어 시뮬레이션 기간 마지막 해에는 약 -5억 유로까지 하락할 것으로 전망됩니다. 전망 기간 내내 순현금흐름은 통계적으로 유의미하게 낮은 수준( )을 유지하며, 시뮬레이션 경로 간 변동성이 현저히 적게 나타납니다. 이러한 결과는 석탄 가격 상승, 특히 전기 가격 상승률을 상회하는 탄소 가격의 급격한 증가에 따른 직접적 결과입니다. 그림 5와 6에 나타난 일관된 부정적 추세는 탄소 가격이 독일 NDC 시나리오를 따를 경우 석탄 화력발전소가 수익성을 확보할 수 없음을 명백히 보여줍니다.

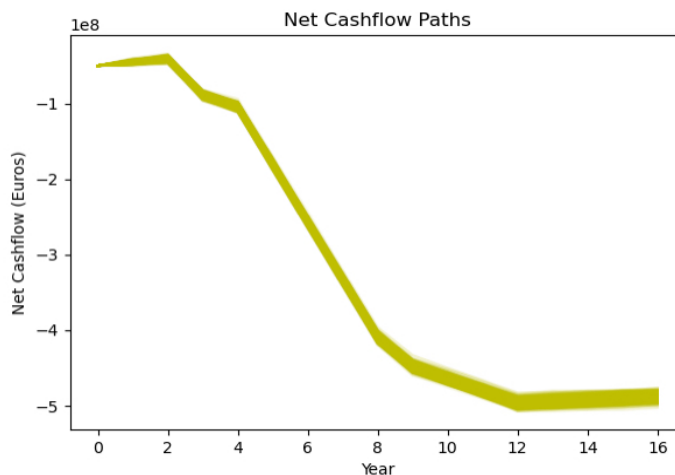


그림 5: NDC 탄소 시나리오 적용 로그 변환 가격 데이터를 사용한 만하임 발전소 미래 순현금흐름

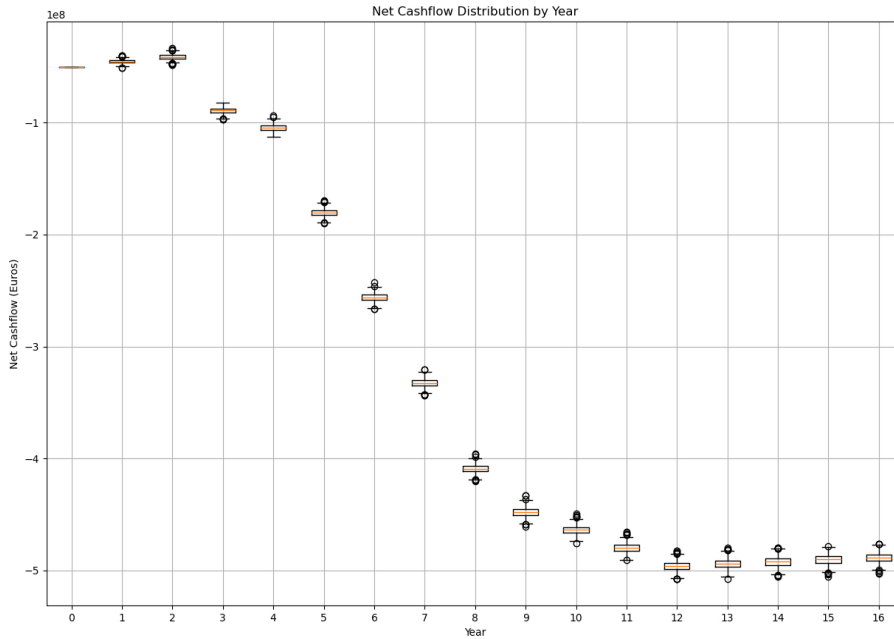


그림 6: NDC 탄소 시나리오 적용 로그 변환 가격 데이터를 사용한 만하임 발전소 미래 순현금흐름 박스플롯

그림 7은 NDC 탄소 가격 시나리오와 고정 현행 가격 시나리오 하에서 1000개의 순현금흐름 경로로부터 도출된 NPV 분포를 비교합니다. NDC 시나리오의 평균 NPV는 -2,783.35백만 유로, 표준편차는 24.46백만 유로였습니다. 반면 고정 현행 가격 시나리오의 평균 NPV는 -691.71백만 유로, 표준편차는 23.45백만 유로였습니다. 두 분포 모두 정규 분포 형태를 보이지만 NPV 범위는 현저히 다릅니다. NDC 시나리오는 CFPP의 수익성 회복에 상당한 어려움이 있음을 분명히 보여줍니다. 따라서, 특히 이 시나리오 하에서 예상되는 심각한 수익성 부족만을 고려한다면, 보상 조치가 필요하지 않을 수 있음을 시사합니다.

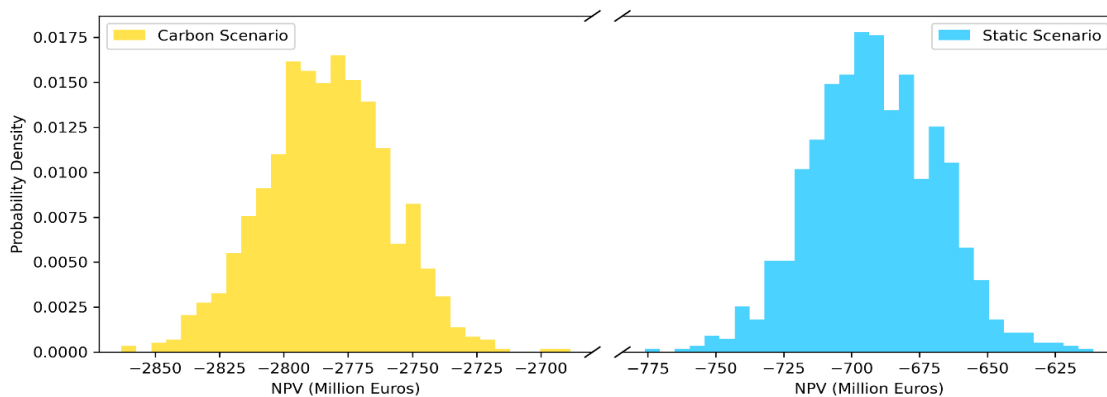


그림 7: NDC 시나리오(좌)와 고정 현재 가격 시나리오(우) 하의 NPV 분포

ROA 결과에 따르면, 옵션 행사 기간 내내 평균 ECV가 행사를 지속적으로 하회한 것으로 나타났습니다 (그림 8 참조). 따라서 1,000회의 모든 몬테카를로 시뮬레이션에서 각 시간 단계마다 조기 상환 옵션을 행사하는 것이 최적이었습니다(그림 9 참조). 평균 옵션 최적 행사의 최초 시점은 0.00년입니다. 이 결과는 그림 8에 나타난 지속적으로 마이너스인 '평균 NCF'와 부합하며, 이는 지속적인 운영 손실을 시사하므로 이용 가능한 보상을 받기 위해 옵션을 행사하는 것이 합리적임을 뒷받침

니다.

계속 운영에서 파생된 가치를 나타내는 ECV (그림8 참조)는 초기에는 양수였습니다. 이 양수 평가는 2020년부터 2028년까지 행사 가능한 옵션이 제공하는 전략적 유연성을 암묵적으로 반영한 것입니다. 그러나 지속적인 순현금흐름의 마이너스로 인해 이 값은 2024년 이후 마이너스로 전환되었습니다. 2028년에는 행사 옵션이 더 이상 유효하지 않음에 따라 최저점을 기록했으며, 이 시점부터 ECV는 잔여 예상 순현금흐름의 현재가치만을 반영했습니다. 이후 잔여 마이너스 현금흐름이 감소함에 따라 ECV는 최저점에서 점진적으로 상승했습니다.

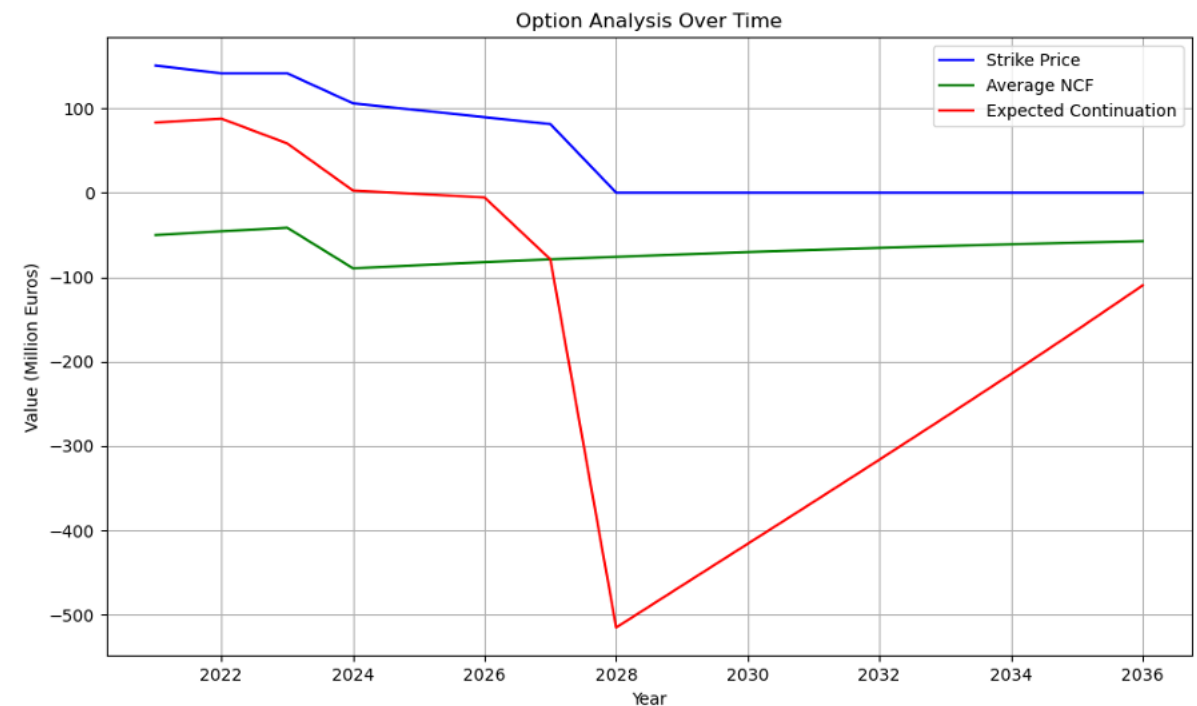


그림 8: 고정 탄소 가격을 적용한 리얼 옵션 분석 결과 그래프

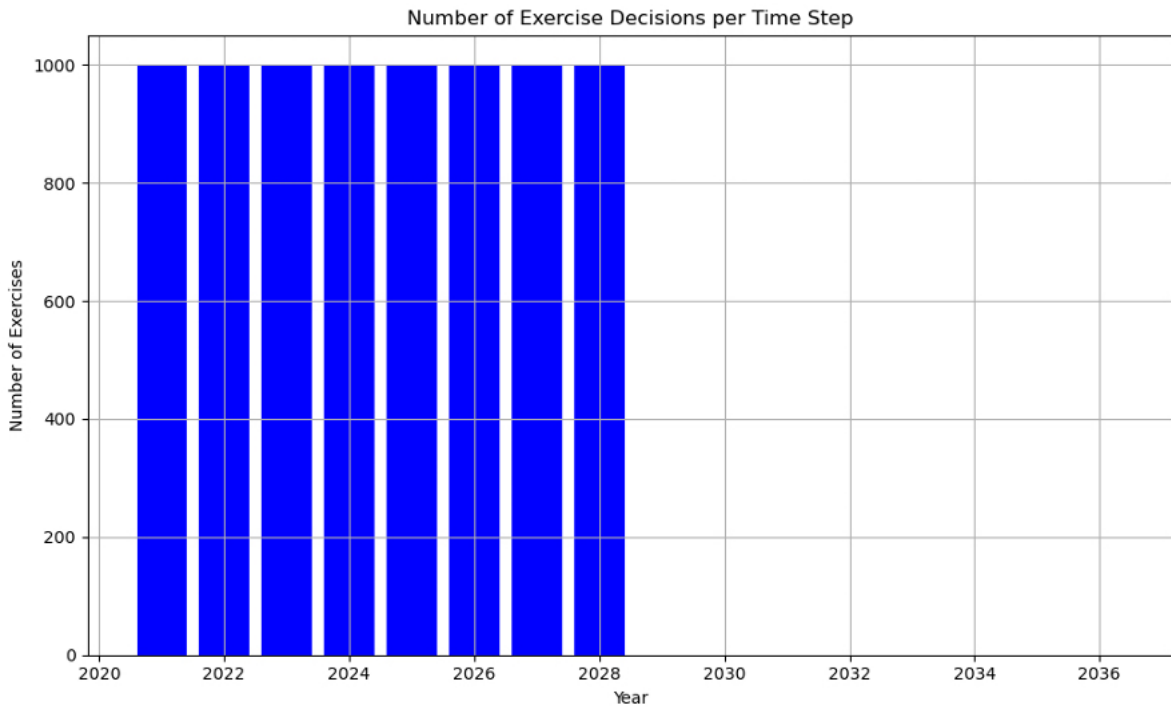


그림 9: 고정 탄소 가격 시나리오별 연간 옵션 행사 결정 횟수

그림 10과 11은 NDC 탄소 가격 시나리오에 따른 ROA 결과를 제시합니다. 위 순현금흐름 그래프에서 예상된 바와 같이, 이 시나리오 하에서의 마이너스 순현금흐름 규모가 고정 탄소가격 결과보다 크기 때문에 ECV의 최저점은 약 35억 유로로 훨씬 낮아집니다. 옵션 행사 결정은 모든 연도와 모든 시뮬레이션에서 모두 '행사'로 나타납니다 (그림 11 참조). 따라서 평균 최적 행사 시기는 최초 0.00년입니다.

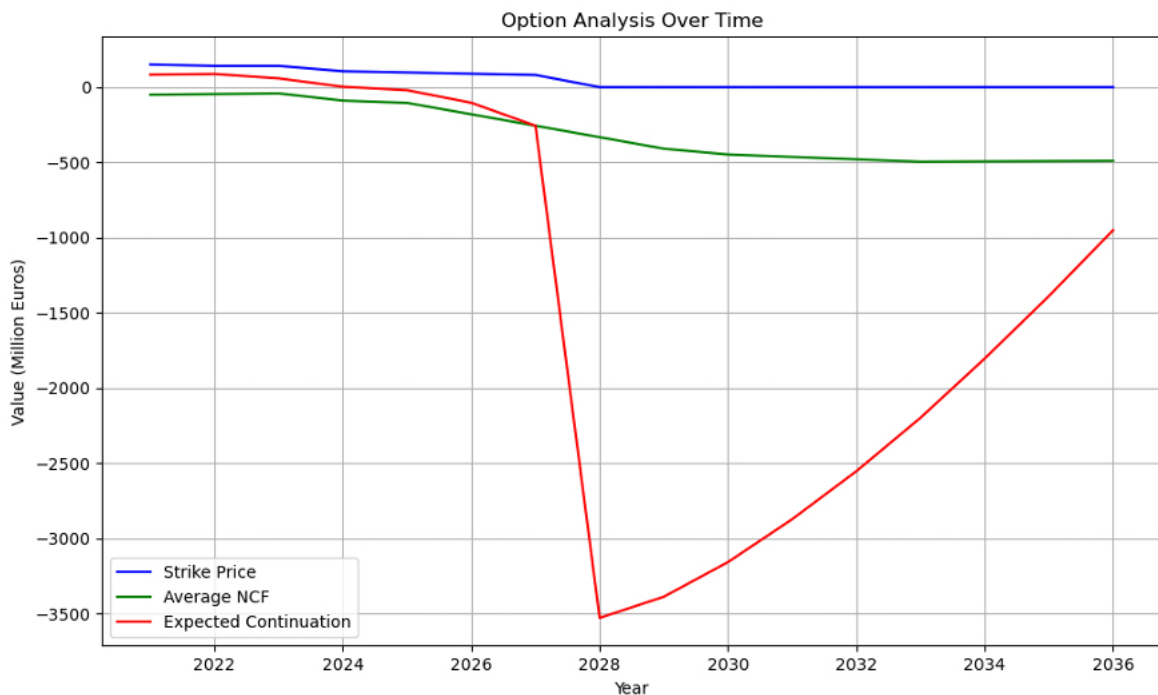


그림 10: NDC 시나리오 적용 시 리얼 옵션 분석 결과 그래프

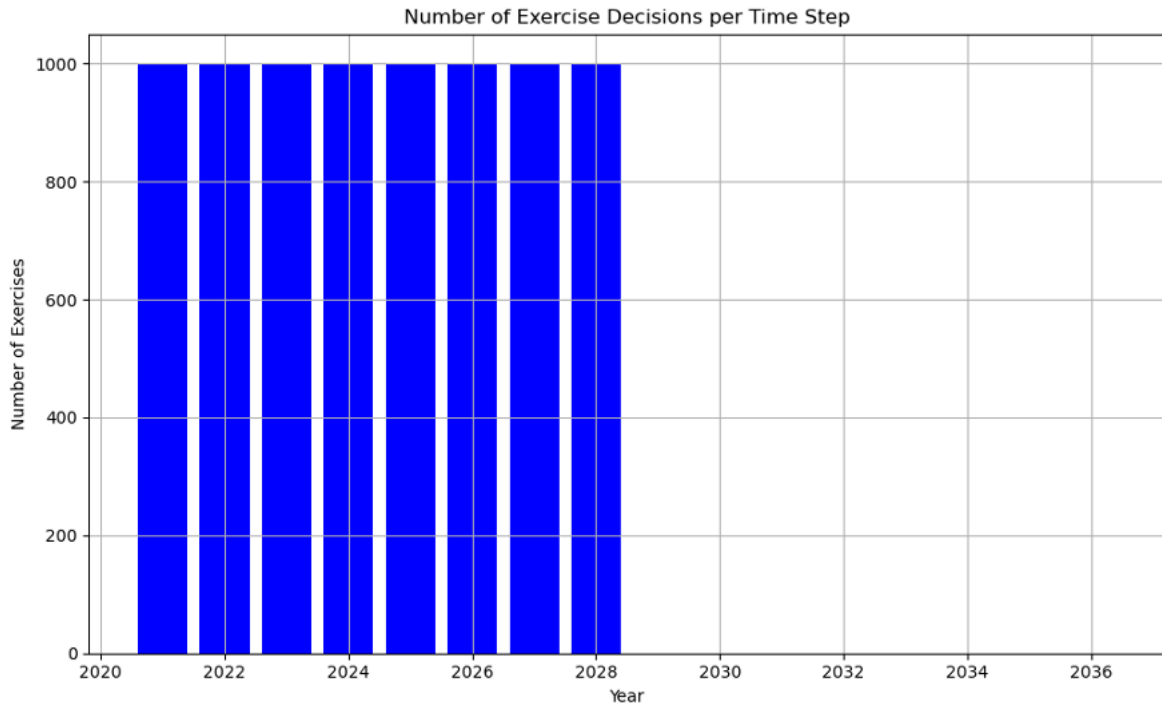


그림 11: NDC 시나리오별 연도별 옵션 행사 결정 건수

#### 4.1.2. 변동성 증가(절대 가격 데이터 사용 시)

그림 12는 평균값이 -1억 유로를 약간 상회하는 연간 순현금흐름 분포를 보여줍니다. 또한 그림 12의 막대는 그림 4 및 6의 막대보다 길어, 이 분포의 분산이 상당히 높음을 확인시켜 줍니다. NDC 탄소 가격 시나리오로 인해 그림 13의 값은 그림 12에 비해 시간이 지남에 따라 감소합니다.

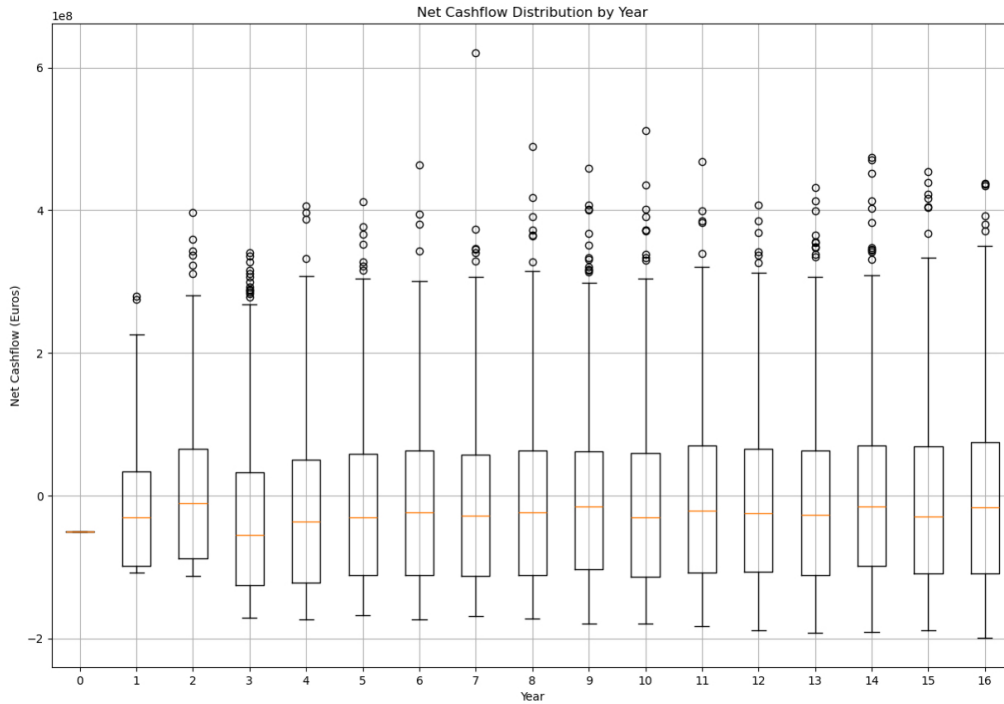


그림 12: 고정 탄소 가격을 적용한 만하임 공장 미래 순현금흐름 박스플롯

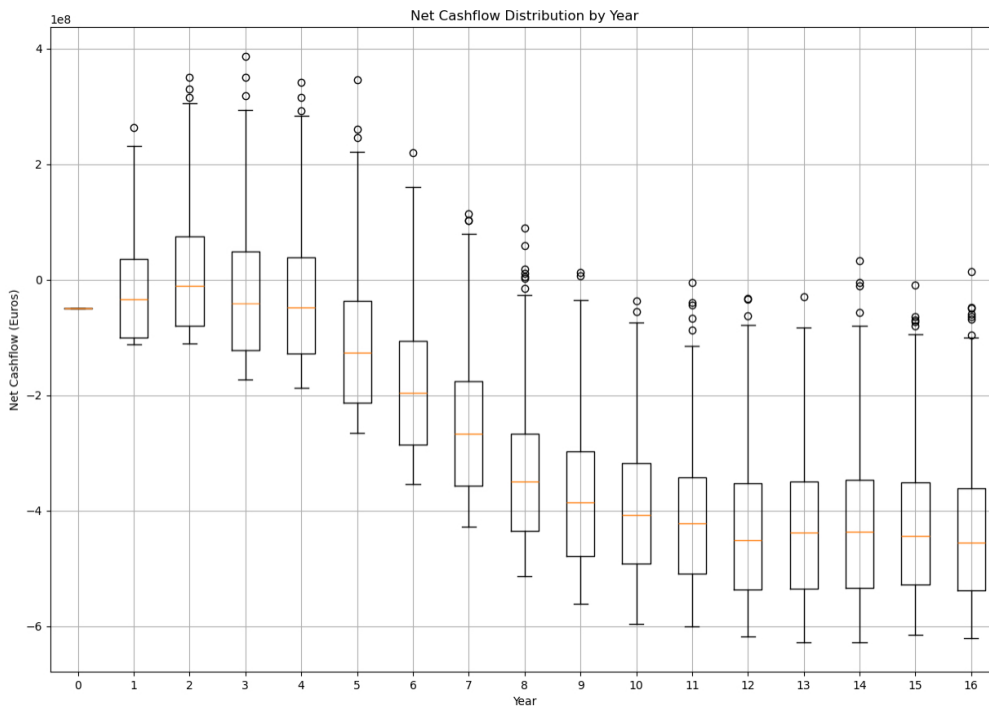


그림 13: NDC 시나리오에 따른 만하임 공장 미래 순현금흐름 박스플롯

그림 14는 NDC 시나리오(그래프에서 ‘Carbon Scenario’로 표기)와 고정된 현재 탄소 가격 시나리오(‘Static Scenario’로 표기)의 순현재가치(NPV) 분포를 대비하여 보여줍니다. 두 분포 모두 대략 정규 분포 형태를 보이지만, 모델의 현금 흐름 가정 내 최소값 제약 또는 하한선 영향으로 추정되는 뚜렷한 좌측 편향을 나타냅니다.

‘NDC 탄소 시나리오’는 완전히 음의 NPV 분포를 보이며, 결과는 약 -33억 유로에서 -5억 유로 사이로, 수익성이 없음을 명확히 보여줍니다. 반면 ‘정적 시나리오’는 평균값 역시 음수이지만, 약 15억 유로까지의 양의 NPV를 포함하는 더 넓은 분포를 나타냅니다. 변동성을 통제된 결과(그림 7 참조)와 비교할 때, 변동성이 증가된 결과는 경제적 손실이 더 작습니다: NDC 시나리오에서 변동성을 통제된 경우의 평균값은 -27억 8,300만 유로이고, NDC 시나리오에서 변동성이 증가된 경우의 평균값은 -25억 유로입니다. 이 결과는 정적 탄소 가격 시나리오 하에서의 결과와 동일합니다. 변동성 증가 가정 하에서는 후기 연도의 양의 순현재가치가 초기 연도의 음의 순현재가치를 상쇄하여 평균값이 약 -1억 유로 수준으로 나타납니다.

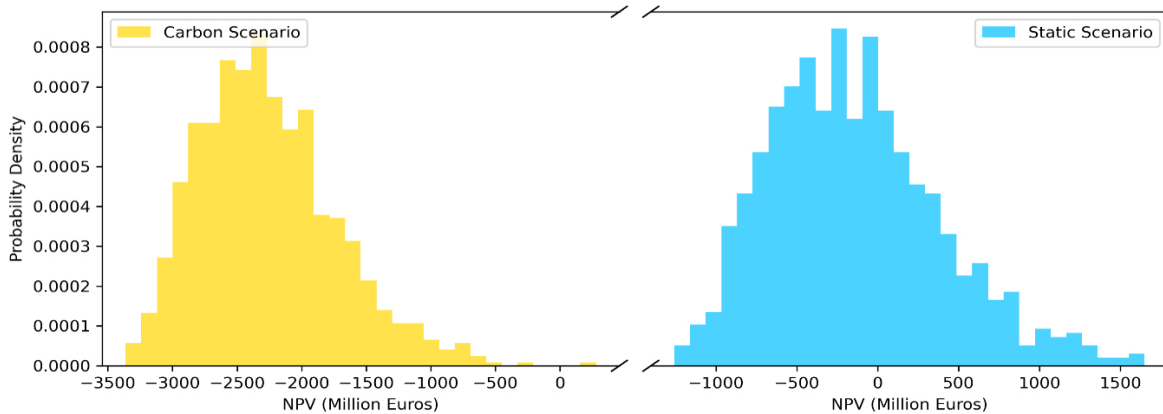


그림 14: NDC 시나리오(좌측) 및 고정 현재 가격 시나리오(우측) 하의 NPV 분포

변동성 증가 가정 하에서 ROA는 옵션 행사 결정에 있어 연도별 동적 패턴을 더 명확히 보여주었습니다 (그림 15 참조). 이는 통제된 변동성 가정 하의 결과 (그림 8-11에 이전에 제시됨)와 대비됩니다. 그림 15는 1,000회의 몬테카를로 시뮬레이션에 따른 조기 폐쇄 옵션 행사 연도별 빈도를 보여줍니다. 특히, 경매 첫 해 (즉, 옵션 행사 기간)에는 가장 높은 보상 (행사가격)에도 불구하고 1,000개의 시뮬레이션 경로 중 어느 것도 옵션을 행사하지 않았습니다. 이후 옵션 행사 확률은 2022년 0.378로 시작하여 옵션 만기 시점까지 점진적으로 증가하여 0.609에 도달했습니다. 평균 최적 행사 시기는 최초 3.2340년입니다.

이러한 행사 패턴의 근거는 그림 16에 나타난 행사가격 대비 변동하는 ECV(현재가치)에서 찾을 수 있습니다. 평균 ECV는 지속적으로 행사가격을 초과하지만, 시간이 지남에 따라 감소하는 추세를 보입니다. 평균 ECV가 행사가격을 초과하는 현상은 높은 변동성에 의해 일부 몬테카를로 시뮬레이션 경로에서 연간 순현재가치가 양수일 가능성이 증가하고, 옵션 행사 기간 동안 최적의 시점에 옵션을 행사할 수 있는 미래 유연성의 가치에 기인합니다.

시간 경과에 따른 평균 ECV의 감소(그림 16 참조)와 2022년부터 2028년까지 증가하는 옵션 행사 결정 추세(그림 15 참조)는 옵션의 시간 가치가 감소하는 것을 반영한 것으로 해석될 수 있습니다. 만기까지의 기간이 길고 변동성이 높은 옵션은 일반적으로 시간 가치가 더 큽니다. 따라서 초기 연도에는 옵션을 보유함으로써 얻는 가치(즉, 퇴직 연기)가 후기 연도보다 더 큰 것으로 계산됩니다. 옵션이 만기에 가까워질수록 이 시간 가치는 감소하여 조기 퇴직을 위한 옵션 행사 확률이 높아집니다.

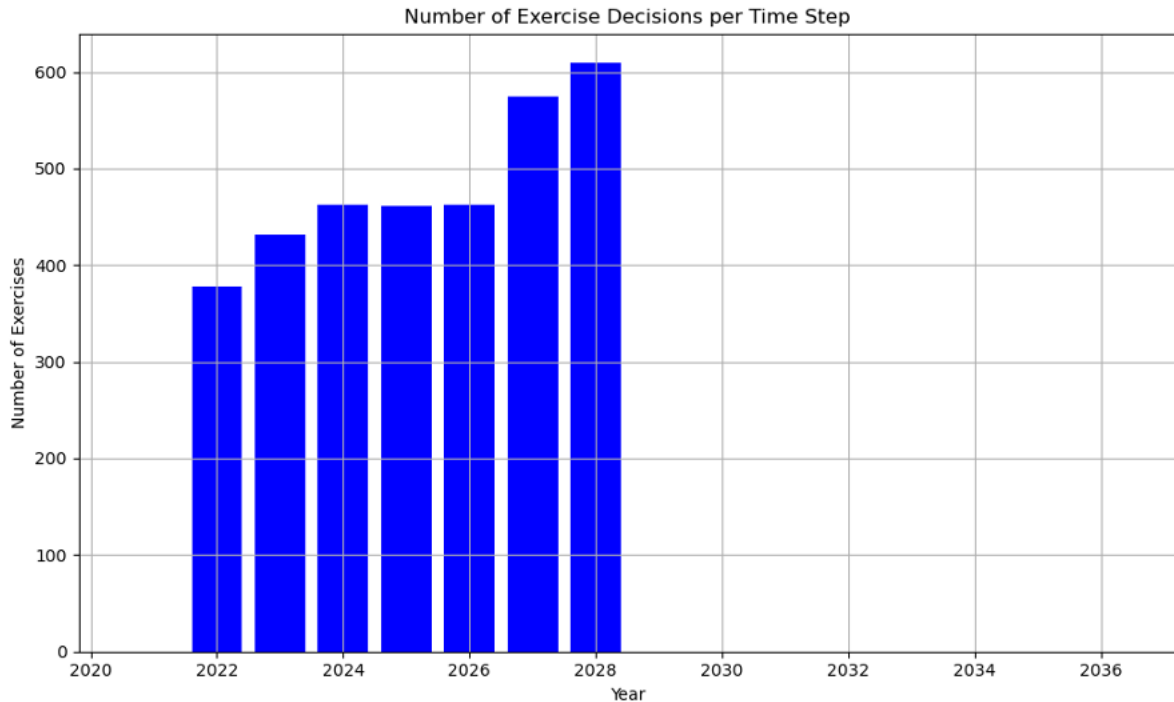


그림 15: 고정 탄소 가격 시나리오에서의 연간 옵션 행사 결정 횟수

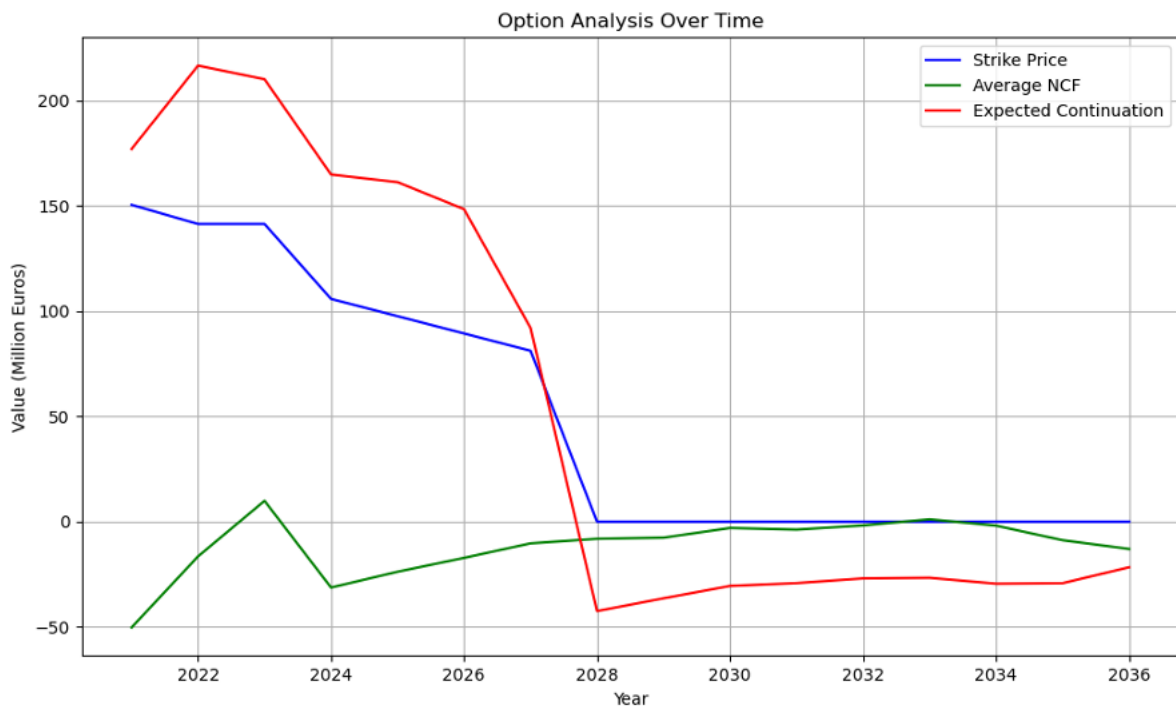


그림 16: 고정 탄소 가격 시나리오의 실물 옵션 분석 결과 그래프

NDC 탄소 가격 시나리오 하에서 ROA는 옵션 행사 결정에 뚜렷한 패턴을 보여주었으며 (그림 17 참조), 이는 이전에 분석된 시나리오와 현저히 달랐습니다. 주요 차이점은 초기 연도인 2021년에 즉시 100% 행사율이 나타난 점입니다. 이후 2022년 0.528로 급감했으나, 전체적으로 옵션 행사 경향은 연도별 비교 시 (그림 15 참조) 지속적으로 높은 수준을 유지했습니다. 행사 건수는 2023년 0.607에서 2028년 1.000으로 점진적 상승 추세를 보였다. 평균 최적 행사 시기는 최초 0.000년입니다.

이러한 행사 패턴은 상승하는 탄소 가격 가정과 그림 18의 요인들에 의해 이루어집니다. 초기 연도에는, 특히 예상되는 행사가격의 확실한 하락과 증가하는 탄소 가격으로 인한 운영 손실 증가로 인해, 즉각적인 최대 보상 확보가 더 유리했을 것으로 평가됩니다. 이후 2027-2028년까지 1,000번의 옵션 행사로 복귀하는 것은 옵션 행사가격이 0에 근접하고 ECV가 극심한 마이너스 값으로 급락함에 따라 더욱 강력하게 이루어집니다. 이 ECV 급락은 점차 악화되는 순현금흐름에 크게 영향을 받으며, 이는 높은 탄소 가격으로 인해 악화되어 옵션 행사를 더욱 유인하게 만듭니다. 탄소 중립 시나리오와 같은 더 엄격한 탄소 가격 책정 체제는 더 높은 옵션 행사율과 더 빠른 CFPP 폐기를 초래할 것입니다.

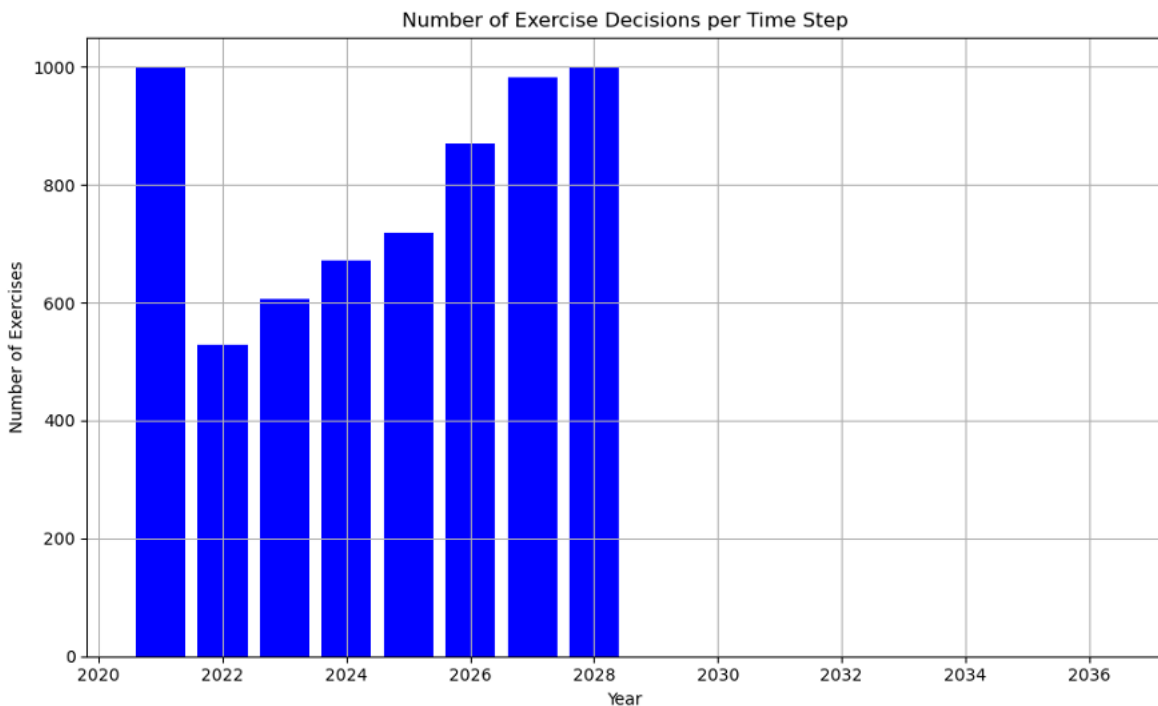


그림 17: NDC 시나리오별 연간 옵션 행사 결정 건수

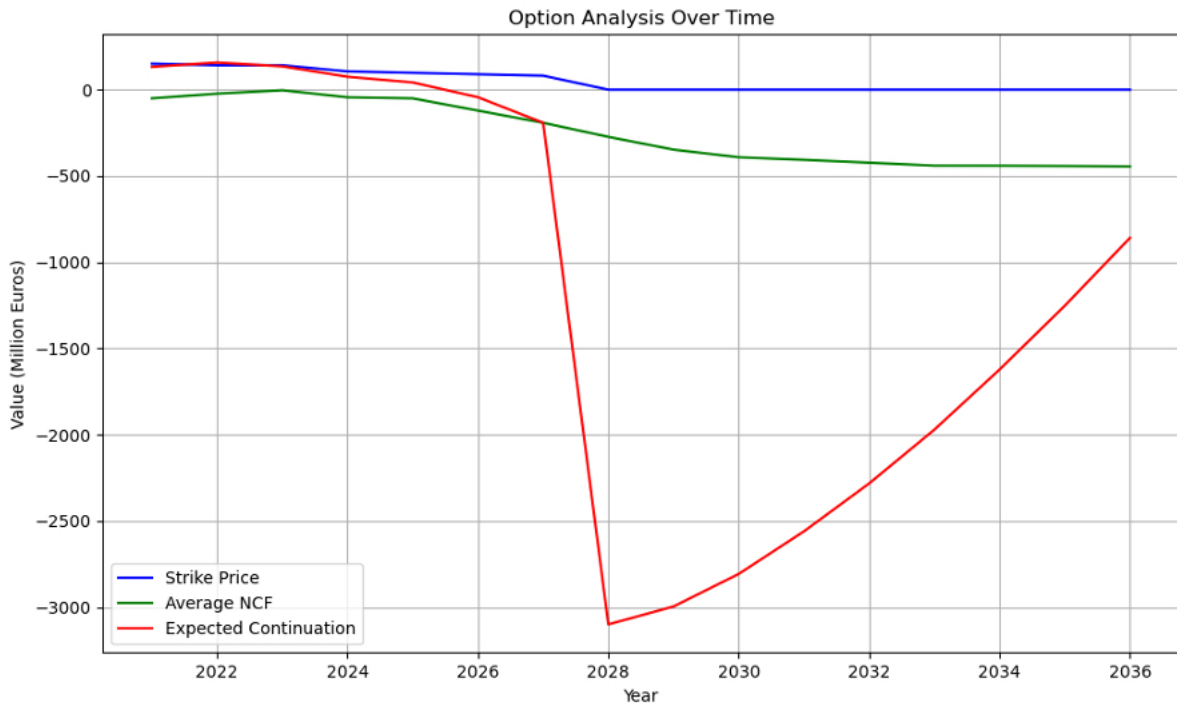


그림 18: NDC 시나리오를 적용한 실물 옵션 분석 결과 그래프

그림 19는 NDC 탄소 시나리오 하의 2022년을 나타내며, 특정 시점 t에서 두 가지 핵심 상태 변수인 '석탄 가격(X축)'과 '전력 가격(Y축)'에 대한 다양한 시장 조건 시뮬레이션 결과를 바탕으로 개별 CFPP가 조기 폐기 옵션(빨간 점)을 행사할지 또는 계속 운영(파란 점)할지 결정하는 산점도입니다. 적색과 청색 점 사이에 비교적 명확한 결정 경계가 형성된 옵션 행사 영역(행사 영역)을 관찰할 수 있으며, 이는 결정 경계의 형성을 의미합니다. 행사 결정은 수익성이 낮은 낮은 전력 가격 영역에 집중되는 경향이 있는 반면, 계속 운영 결정은 높은 전력 가격 영역에 집중됩니다. 이 그림은 여러 시점 중 하나의 예시이며, 이 결정 경계는 시간이 지남에 따라 변화할 가능성이 높다는 점을 유의해야 합니다. 발전소 운영자는 실제 시장에서 관측된 석탄 가격과 전력 가격의 특정 조합을 바탕으로 조기 폐기 최적 시점을 결정하는 데 이 시각화된 결정 경계를 활용할 수 있습니다. 또한 이 결정 경계는 변동하는 시장 가격 하에서 가동 중단 유연성에 내재된 가치를 반영하며, 이는 ROA의 핵심 원칙입니다. 이러한 ROA 기반 시각화는 전통적인 NPV 분석에 비해 더 정교하고 현실적인 통찰력을 제공할 잠재력을 지닙니다.

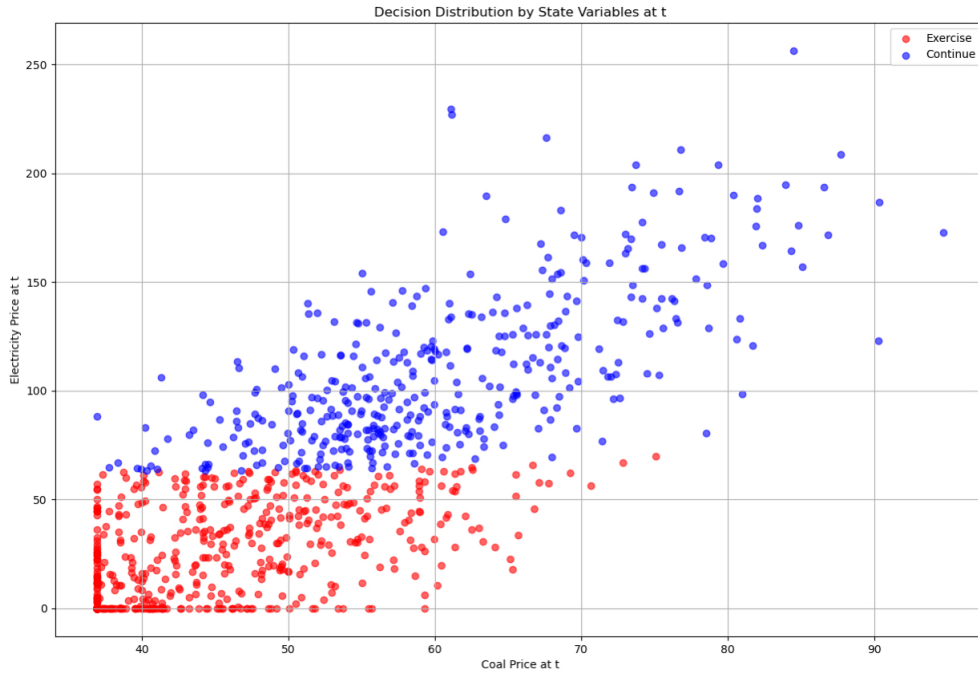


그림 19: NDC 시나리오 하에서 year 2의 석탄 및 전력 가격 조합 산점도

## 4.2. 민감도 분석 결과

독일 무연탄의 기준 연도인 2020년은 독특하고 잠재적으로 왜곡될 수 있는 조건 (특히 최대 용량의 5분의 1에 불과한 극히 낮은 가동률(Capacity Factor, CF)로 인해 Ember (2020)에 따르면 발전소의 93%가 경제적 손실을 기록함)을 보였기 때문에, 이 비정상적인 기준 연도의 잠재적 편향적 영향 너머, 모델 결과에 근본적으로 중요한 입력 매개변수를 식별하기 위해서는 민감도 분석이 필수적이었습니다. 분석을 위해 출력 지표는 모든 시뮬레이션 경로에서 가장 이른 행사 시점의 평균값으로 정의되어 단일 대표값을 확보하였습니다. 입력 변수는 '3. 방법론' 섹션에서 논의된 바와 같이 분석을 위해 두 그룹으로 분류되었습니다: (i) 프로젝트별 매개변수, (ii) 환경 및 확률적 매개변수. 첫 번째 그룹에는 고정 탄소 가격 시나리오와 증가된 변동성 가정이 적용되었습니다. 이러한 가정은 두 번째 그룹 분석의 민감도 분석을 통해 검증되었습니다.

그룹 1 매개변수 조정은 다음과 같습니다: 단위 효율 - Ember(2020)의 가정에 따라 0.325에서 0.475 까지 변동. 배출계수 - 모델 타당성 평가를 위해 수집된 34개 발전소 데이터의 최소값과 최대값을 나타내는 0.79에서 1.71까지의 범위. Capacity Factor (CF) - 동일하게 34개 발전소의 최소 및 최대값을 기반으로 0.02에서 0.55까지 조정. 가동 연도 - 해당 34개 발전소 데이터에서 도출된 1983년부터 2020년까지 변동.

그림 20은 프로젝트별 매개변수에 대한 민감도 지수를 보여줍니다. CF가 가장 영향력 있는 매개변수로 나타났으며, 1차 지수(S1 = 0.38)와 총차수 지수(ST = 0.57)가 가장 높았습니다. 이는 CF가 평균 최초 가동 시기의 분산에 가장 큰 개별적 영향을 미칠 뿐만 아니라, ST와 S1 값의 차이로 입증되듯 다른 매개변수들과도 상당한 상호작용 효과를 지님을 시사합니다. 배출계수는 S1이 약 0.16으로 두 번째로 중요한 매개변수입니다. 단위 효율률과 가동 연도는 비교적 낮은 개별적 영향을 보입니다.

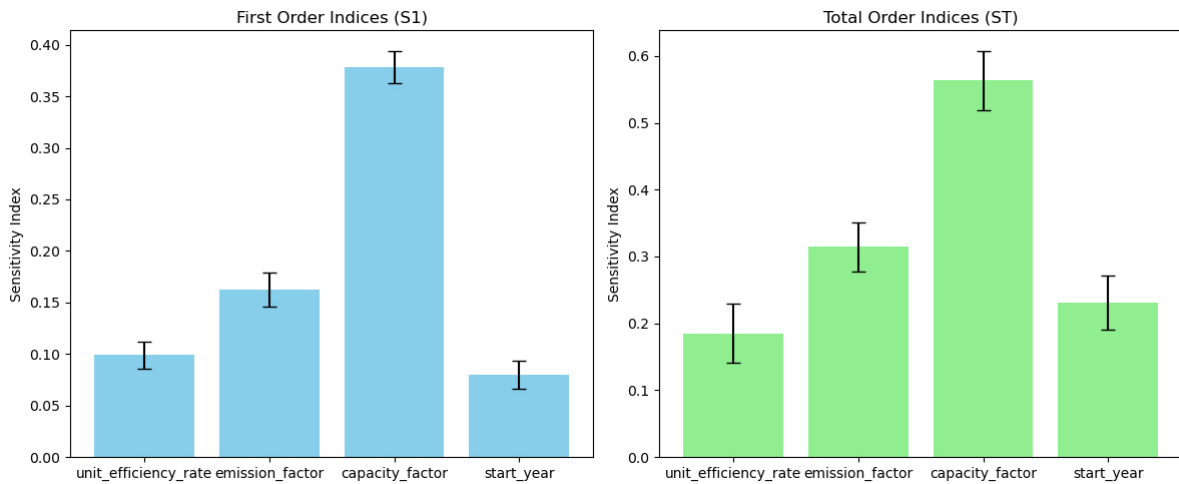


그림 20: 그룹 1 민감도 분석 결과: 프로젝트별 매개변수

그룹 2 매개변수는 상당한 미래 불확실성에 노출되고 정확한 확률 분포를 항상 쉽게 구할 수 없는 환경 및 확률적 변수를 포함하므로, 기준값 대비  $\pm 20\%$ 의 균일한 조정이 적용되었습니다. 이 범위는 모델 출력에 미치는 영향을 표준화하여 평가하기 위해 선정되었습니다.

그림 21은 환경 및 확률적 매개변수의 S1을 보여줍니다. 분석 결과 탄소 가격이 가장 높은 S1 값(약 0.36)을 나타내며, 모델 출력 불확실성에 가장 큰 개별적 영향을 미치는 핵심 변수로 확인되었습니다. 즉, 환경 및 확률적 매개변수중 CFPP 조기 폐기에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 탄소 가격입니다. 이어서 전력 장기 평균 가격( $S1 \approx 0.28$ )과 전력 시그마( $S1 \approx 0.25$ ) 역시 상당한 개별적 영향을 미치는 주요 변수로 확인되었습니다. 전기 속도는 비교적 낮은 S1 값(약 0.055)을 보였습니다. 석탄 초기 가격( $S1 \approx 0.22$ )과 전력 초기 가격( $S1 \approx 0.015$ )은 더 작은 1차 효과를 나타냈습니다. 반대로 석탄 장기 평균 가격, 석탄 속도, 석탄 시그마, 상관 계수, 할인율과 같은 다른 매개변수들은 모두 매우 낮은 S1 지수(0.01에 근접하거나 그 이하)를 보였는데, 이는 출력 분산에 대한 개별 기여도가 미미함을 시사합니다.

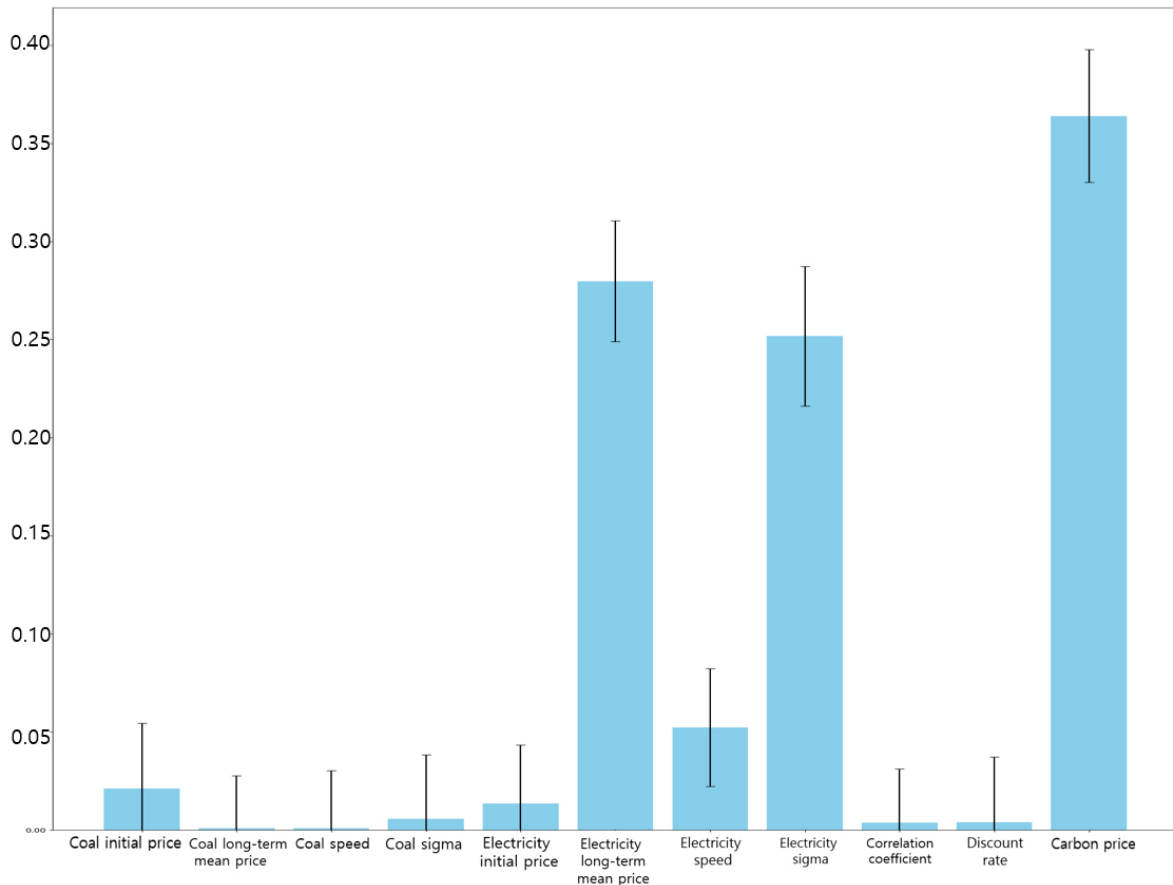


그림 21: 그룹 2: 환경 및 확률적 매개변수의 민감도 분석

### 4.3. 관측 결과와의 모델 일관성 평가

본 절에서는 개발된 실물 옵션 모델을 독일 CFPP의 실제 사례에 적용하여 그 타당성을 평가합니다. 이는 모델 결과가 관찰된 실제 현상(예: 경매 참여 그룹과 비참여 그룹의 특성)과 일관성을 보이는 지 검토하는 것을 포함합니다. 모델의 예측력을 직접 검증하는 것은 아니지만, 핵심 경제적 동인들을 합리적으로 반영하는지, 이를 바탕으로 경매 참여 결정을 적절히 시뮬레이션할 수 있는지를 간접적으로 평가하는 것이 목적입니다. 데이터는 운영 사양이 서로 다른 34개 독일 발전소에서 수집되었습니다. 발전소는 두 그룹으로 구분되었습니다: 경매에 참여하여 입찰에 성공한 발전소로 구성된 "참여 그룹"과 경매에 참여하지 않았거나 참여했으나 낙찰에 실패한 발전소를 포함한 "비선정/비참여 그룹"입니다.

참여 그룹의 경우, 5년간의 발전 및 배출 이력 데이터가 없는 발전소를 제외한 18개 발전소의 데이터를 확보했습니다. 이 중 2021년 이전에 폐쇄된 노후 발전소를 추가로 제외하여 12개 발전소가 최종 선정되었습니다. 비선정/비참여 그룹의 경우, 5년간의 발전 및 배출 기록이 있는 16개 발전소 데이터가 확보되었으며, 이 중 2021년 이전에 폐쇄된 발전소를 제외하면 13개 발전소가 남았습니다. CF는 2020년 기준을 적용했으며, 해당 발전소들의 배출계수는 지난 5년간(2016-2020)의 배출량 및 발전량 데이터를 활용해 산출되었습니다. 분석은 고정된 현재 탄소 가격과 증가된 변동성을 가정하여 수행되었습니다.

참여 그룹과 비선정/비참여 그룹 간 기술 통계의 차이는 Tiedemann & Müller-Hansen (2023) 에서 보

고된 결과와 일치하였습니다. 첫째, 설비 용량(MW) 측면에서 참여 그룹은 비선정/비참여 그룹에 비해 상대적으로 높은 평균 용량을 보였습니다. 탄소 집약도(tonCO<sub>2</sub>/MWh) 측면에서, 참여 그룹의 발전소는 일반적으로 더 낮은 과거 탄소 집약도 수치를 보인 반면, 비선정/비참여 그룹의 발전소는 더 높은 수치를 보였습니다. 1000MW 이상의 용량을 가진 발전소의 CF의 경우, 참여 그룹이 더 낮은 평균 CF를 보였습니다. 마지막으로 발전소 연식(vintage) 측면에서, 참여 그룹은 비선정/비참여 그룹보다 평균적으로 노후화되었으나 예외 사례도 존재했습니다(표 6 참조).

**표 6: 독일 CFPP의 통계적 특성**

|                                  | 참여 그룹                       | 비선정/비참여                                 |
|----------------------------------|-----------------------------|---|
| 설비 용량(MW)                        | 261.8                       | 151.885                                 |
| 탄소 집약도 (tonCO <sub>2</sub> /MWh) | (평균) 0.9624<br>(중간값) 0.9238 | (평균) 1.2209<br>(중위수) 1.1206             |
| 설비 가동률 (1000MW 이상)               | 18%                         | 24%                                     |
| 연령                               | (1965~1994) 15개 발전소         | (1980~2009) 8개 발전소<br>(2010~2024) 5개 공장 |

이 모델의 타당성 평가 결과에 따르면, 보상금이 최대였던 2021년에 참여 그룹의 옵션 행사 결정 건수 중앙값은 1,000회(1,000회 시뮬레이션 중)인 반면, 비참여 그룹의 중앙값은 0회로 명확한 차이를 보였습니다. 이는 모델에 따르면 참여 그룹의 CFPP들이 해당 연도에 조기 퇴직 보상을 받는 것이 예상 운영 이익보다 더 유리하다고 판단했음을 시사합니다. 이후 기간의 옵션 행사 결정에 있어서도, 중앙값 기준으로 참여 그룹은 마지막 해를 제외하고 비참여 그룹에 비해 더 높은 빈도를 보였습니다. 이러한 모델 결과는 참여 그룹이 실제 독일 CFPP 조기 퇴직 경매에 자발적으로 참여한 현상과 일치하는 것으로 해석될 수 있으며, 이는 해당 그룹 발전소의 실제 운영 특성(예: 낮은CF)이 모델에 반영된 결과일 수 있습니다.

**표 7: 독일 CFPP의 리얼 옵션 분석 결과**

| 경매   | 참여          |       | 비선정/비참여     |       |
|------|-------------|-------|-------------|-------|
|      | 평균          | 중앙값   | 평균          | 중앙값   |
| 2021 | 666.6666667 | 1,000 | 461.5384615 | 0     |
| 2022 | 471.8181818 | 487   | 505.8461538 | 340   |
| 2023 | 515.0909091 | 518   | 496.75      | 349.5 |
| 2024 | 476.1818182 | 433   | 460.8333333 | 287   |
| 2025 | 439.2222222 | 456   | 489.0833333 | 319.5 |
| 2026 | 497         | 489   | 491         | 334   |
| 2027 | 507         | 429   | 550.5454545 | 404   |
| 2028 | 468.8333333 | 454.5 | 558.1818182 | 455   |

독일 CFPP 조기 퇴직 경매 분석에서 도출된 주요 관찰 결과는, 기술 통계(표 6 참조 및 Tiedemann & Müller-Hansen (2023) 와 일치)와 마찬가지로, 경매에서 입찰을 성공적으로 확보한 CFPP는 일반적으로 2020년에 더 낮은 CF를 보였다는 점입니다. 그림 22는 또한 높은 CF (20% 이상) 발전소 그룹이 낮은 CF (20% 미만) 발전소 그룹에 비해 시간 경과에 따른 순현금흐름의 기울기가 더 가파르다는 점을 보여줍니다. 높은 CF 발전소 그룹은 초기 연도에 0으로 시작하는 옵션 행사 결정이 더 자주 지연되는 경향이 있는 반면, 낮은 CF 발전소 그룹 대부분은 초기 연도에 1,000으로 시작하며 상대적으로 더 큰 옵션 행사 결정 수치를 보입니다. 이 실증적 결과는 현금흐름이 낮은 발전소일수록

일반적으로 지속 운영 시 미래 이익이 낮을 것으로 예상함을 시사합니다. 결과적으로, 이러한 발전소들의 경우 가동 중단 기회비용(포기된 이익)이 더 작아져, 운영자와 소유주에게 조기 폐쇄 경매에 참여하고 안정적인 퇴출을 보장하기 위해 잠재적으로 낮은 보상 입찰을 수락하도록 하는 더 강력한 재정적 유인이 발생한다는 점을 보여줍니다.

저 CF 발전소의 성공은 경매 입찰 순위 결정 메커니즘의 특정 설계와 더욱 밀접하게 연관되어 있습니다. 이 메커니즘은 '용량 단위당 CO2 배출량' 지표(CO2\_i)를 활용하는데, Tiedemann & Müller-Hansen (2023) 에서 지적한 바와 같이, 이는 최근 발전소 가동률에 크게 영향을 받습니다. 낮은 CF는 최근 총 배출량을 낮추기 때문에 CO2\_i를 낮출 수 있습니다. 경매 규칙은 이 CO2\_i를 기준으로 제출된 입찰가를 조정합니다: CO2\_i가 높은 발전소(일반적으로 용량 MW당 배출량이 높은 곳)의 입찰가는 하향 조정되어 경쟁력이 강화되는 반면, CO2\_i가 낮은 발전소의 입찰가는 상향 조정되어 경쟁력이 약화됩니다.

CO2\_i가 실제로 낮을 경우 불리한 입찰가 상향 조정을 받을 수 있음에도 불구하고, 낙찰자 중 낮은 CF 발전소가 관찰되는 현상은 이들이 예외적으로 낮은 초기 입찰가를 제출했음을 시사합니다. 이러한 전략은 포기된 이익이 최소화되기 때문에 실행 가능하며, 이미 저활용되거나 수익성이 낮은 발전소의 과도한 이익을 줄이고 과잉 보상 없이 조기 폐쇄를 촉진하려는 정책 의도와 부합합니다 (Tiedemann & Müller-Hansen, 2023).

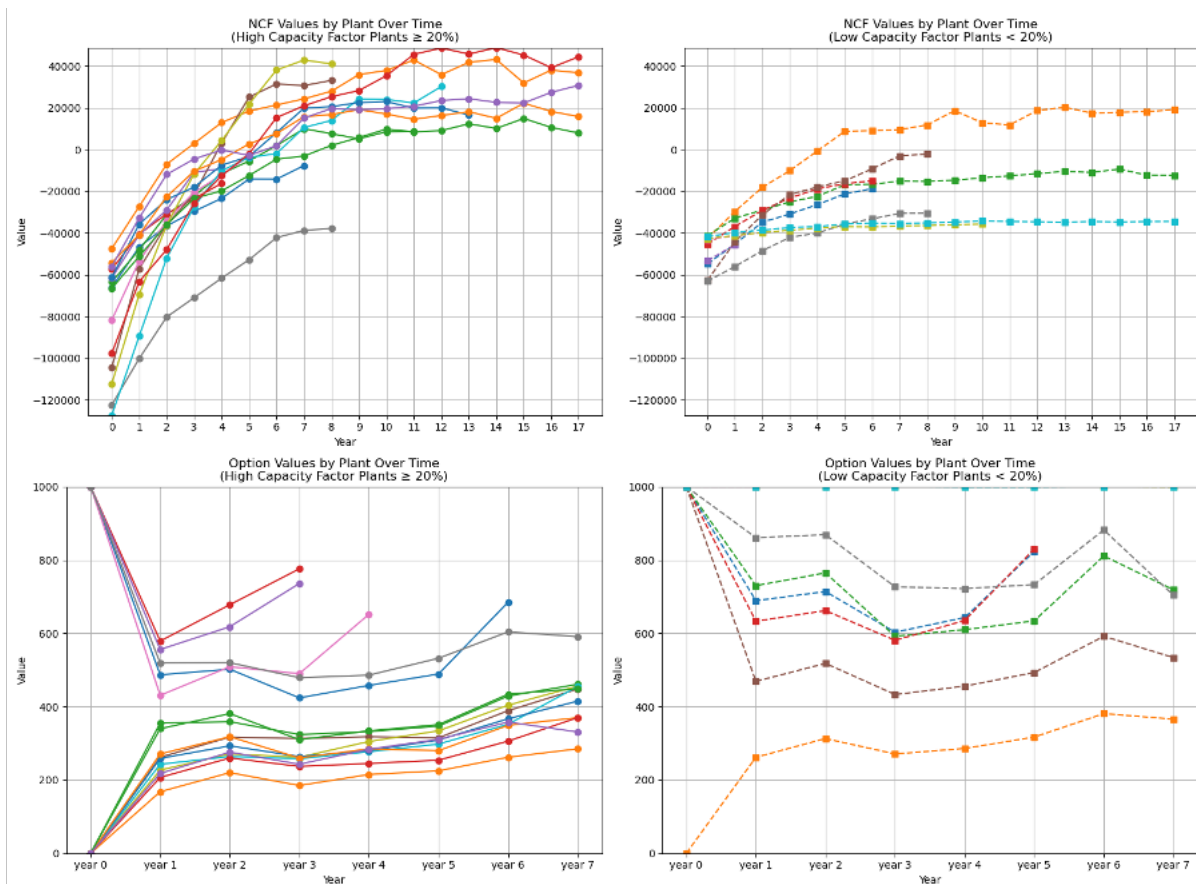


그림 22: 높은 가동률(≥ 20%) 그룹(왼쪽)과 낮은 가동률(<20%) 그룹(오른쪽)의 순현금흐름(위) 및 옵션 행사 결정(아래)

발전소 운영자의 자발적 조기 폐쇄 경매 참여 결정은 조기 폐쇄를 옵션 행사로 간주하는 실물 옵션 프레임워크를 통해 효과적으로 분석할 수 있었습니다. 이 분석적 접근법의 적용 가능성은 정부의 강력하고 신뢰할 수 있는 정책 신호 존재 여부에 달려 있습니다. 예를 들어, 독일의 2038년까지 CFPP에 대한 법적으로 의무화된 최종 조기 폐쇄는 기초 자산의 궁극적 수명을 정의합니다. 또한 법적으로 정의된 경매 기간, 참여 규칙, 투명한 보상 메커니즘은 옵션 행사 조건과 잠재적 행사가격(즉, 수령 보상금)을 구조화합니다. 이러한 명확한 정책 신호는 규제 불확실성을 줄이고, 조기 폐기 결정에 내재된 유연성을 평가할 수 있도록 권리, 의무, 정의된 미래 조건으로 구성된 필수 프레임워크를 창출합니다.

본 연구에서 수행된 ROA의 결과는 탄소 가격이 강력하고 점진적으로 상승할 때 자발적 조기 폐쇄 경매 메커니즘의 효과가 크게 향상됨을 시사합니다. 의미 있는 탄소 가격은 배출 비용을 내재화함으로써 석탄 발전소 운영 지속의 수익성을 직접적으로 훼손합니다. 이는 결과적으로 발전소 가동 유지의 계산된 지속 가치(기다릴 수 있는 옵션의 가치)를 낮추고 경매를 통해 제공되는 보상이 상대적으로 매력적으로 만듭니다. 따라서 감지 가능한 탄소 가격은 강력한 인센티브 역할을 하여 조기 폐기 계획에 대한 자발적 참여를 가속화하고 모델 내에서 평균 행사 시점을 앞당깁니다.

ROA는 또한 시장 변동성이 조기 폐기 결정에 미치는 상당한 영향을 강조합니다. 전력 가격 및 석탄 가격과 같은 주요 확률적 변수의 변동성이 증가할수록 운영 지속 옵션의 가치는 일반적으로 상승했습니다. 이는 높은 변동성이 유리한 시장 변동으로부터의 잠재적 상승 여력을 확대하는 반면, 최종 폐쇄 옵션(의무적 마감 시점 또는 향후 경매를 통해)이 하락 위험을 제한하기 때문입니다. 따라서 모델은 시장 변동성이 높은 조건에서 발전소 운영자들이 운영 유연성 유지에 더 큰 가치를 인식할 것임을 보여주었습니다.

#### 4.4. 한계점

본 연구에는 몇 가지 한계가 존재합니다. 첫째, 결과는 시장 가격(예: 전력 및 석탄)의 확률적 모델링을 뒷받침하는 가정에 매우 민감합니다. 따라서 이러한 가정은 신중한 검토가 필요합니다. 로그 변환된 가격 데이터에서 도출된 확률적 모델링 매개변수는 분석 기간 내 낮은 분산을 보였습니다. 결과적으로 이러한 매개변수를 사용한 분석 결과는 주로 탄소 가격 가정에 의해 영향을 받았습니다. 반면 절대값 가격 데이터에서 도출된 매개변수도 최소값과 최대값을 인위적으로 부과한 데 따른 한계가 있었습니다. 예를 들어, 최소 임계값 아래로 떨어져야 할 값들이 오히려 이 최소값으로 고정되었습니다. 본 연구에서는 이로 인해 순현금흐름과 순현재가치가 다소 왜곡되어 실제 시장 복잡성을 완전히 반영하지 못할 가능성이 있음을 시사합니다. 이를 완화하기 위해 변환된 공간에서 모델링을 수행함으로써 관련 가격 범위 내에서 의도된 확률 과정의 특성을 보다 잘 보존할 수 있을 것입니다.

둘째, 본 연구의 행사가격은 독일 법률에 규정된 경매 입찰 상한가로 설정되었습니다. 그러나 Pay-as-you-bid 역경매에서 발전소 운영자는 현실적으로 계산된 NPV 또는 추정된 포기 수익보다 약간 높은 금액을 입찰할 것입니다. 이는 행사가격이 개별 입찰 전략에 따라 발전소마다 달라질 수 있음을 시사합니다. 실제로 경매 결과 일부 발전소가 0 유로 입찰가로 참여했는데, 이는 당시 수익성이 부족했기 때문으로 추정됩니다. 또한 이 입찰 과정에는 발전소 운영자들 간의 정보 비대칭성에 따른 전략적 의사결정이 개입될 수 있습니다 (예: 성공 확률이 낮다고 판단될 경우 더

높은 보상 금액을 입찰하거나, 성공 확률이 높다고 판단될 경우 더 낮은 금액을 입찰하는 등). 역경매 메커니즘에 내재된 이러한 역학은 현재 모델에서 포착되지 않았습니다. 본 모델은 경매 참여를 결정한 발전소 운영자가 100% 확률로 지정된 최대 보상을 받는다는 단순화 가정을 바탕으로 운영되었기 때문입니다. 향후 연구에서는 개별 발전소의 행사가격을 최적화하고 이를 집계하여 시장 전체의 최적 보상 수준을 결정하는 방법을 탐구할 수 있습니다. 또한 게임 이론을 활용하거나 다양한 입찰 전략에 확률을 할당하는 등 잠재적 행동 역학을 모델에 반영함으로써 현실성을 높일 수 있습니다.

셋째, 순현금흐름 분석의 실용적 정확도를 더욱 높일 수 있습니다. 현금흐름 분석은 비교적 단순한 방정식으로 구성되었으나, 현실의 복잡성을 정확히 반영하는 것은 어려울 수 있습니다. 예를 들어, 단일 자산 분석에서 대표 발전소는 전력에 대한 PPA(전력구매계약)와 석탄에 대한 장기 연료 공급 계약 하에서 운영될 수 있으며, 이는 실제 거래 가격이 모델에서 가정된 현물 시장 가격과 다를 수 있음을 의미합니다. 또한 자본 지출과 관련된 감가상각 및 특정 자본 구조(즉, 부채와 자본)와 같은 재무적 세부 사항이 반영되지 않았습니다. 향후 연구에서는 전문가 인터뷰나 실제 계약 및 협정을 참조하여 이러한 측면을 다룰 수 있습니다.

## 제5장. 결 론

### 5.1. 연구 내용 요약

본 연구는 독일 CFPP 조기폐쇄 정책을 중심으로 ROA 프레임워크를 활용하여 CFPP의 조기폐쇄 의사결정을 분석하였습니다. 주요 목표는 (i) 보상 메커니즘 이해를 위한 ROA의 유용성 평가, (ii) 다양한 시나리오 하에서 독일 CFPP의 경제적 타당성과 최적 폐쇄 시점 도출, (iii) 주요 영향 요인 규명이었습니다. 방법론은 미국식 포기 옵션 모델을 중심으로, 독일의 경매 입찰 상한선을 행사가격으로 설정하였습니다. 전력 및 석탄 가격은 상관관계가 있는 OU 과정으로 모델링되었으며, 옵션 가치 평가에는 DP 및 LSMC 시뮬레이션을 활용하고, 소불 방법 기반 민감도 분석으로 보완하였습니다.

### 5.2. 주요 결과 요약

전반적으로 모든 사례에서 순현재가치(NPV) 분포가 음수였으며, 이는 제시된 보상 수준이 CFPP의 일반적인 포기 이익 수준보다 높을 수 있음을 의미합니다. 그러나 결과는 확률적 가격 모델링 선택과, 더 중요한 탄소 가격 시나리오(정적 대 NDC 연계)가 발전소의 예상 순현재가치, NPV 및 조기 폐기의 경제적 타당성에 중대한 영향을 미친다는 점을 드러냈습니다. 로그 변환된 가격 데이터를 사용한 순현재가치와 NPV는 변동성이 낮았으나, 경계 조건을 적용한 절대 가격 데이터를 사용한 경우 변동성이 현저히 높아 초기 수익성 부족이 시간이 지남에 따라 다소 상쇄될 수 있음을 시사했습니다. 로그 변환 데이터 분석 결과에서는 탄소 시나리오 차이와 무관하게 모든 시뮬레이션 시험에서 매년 최적 실행 결정이 '행사'로 나타났습니다. 따라서 대상 독일 CFPP가 보상금을 수령하며 가능한 한 조기에 폐기하는 것이 경제적 이익이 됨이 매우 명확했습니다. 그러나 절대값 가격 데이터 분석 결과에서는 NDC 시나리오 하에서 조기 폐기 결정이 정적 탄소 가격 시나리오보다 유의미하게 높아 옵션 조기 행사 확률이 더 높았습니다.

민감도 분석 결과, 발전소 가동율(CF)가 프로젝트별 매개변수 중 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 탄소 가격, 장기 전력 가격 평균, 전력 가격 변동성은 환경 및 확률적 변수 중 주요 결정 요인으로 나타났습니다. 독일 내 34 개 CFPP 데이터를 활용한 모델 타당성 평가에서는 경매 참여 여부에 따라 최적 폐기 결정에 뚜렷한 차이가 관찰되었으며, 특히 최대 보상금이 지급된 2021 년에 그 차이가 두드러졌습니다. 특히 낮은 CF 를 가진 발전소의 조기 폐쇄 성향이 더 높다는 점에서 실제 결과와의 일치하는 모델이 핵심 경제적 동인을 포착하는 기능이 있다는 점을 강조합니다. 낮은 CF 발전소는 예상손실 이익이 적을 것으로 예상되므로 경매 참여 유인이 더 크다는 점에서 이는 합리적으로 보입니다. 연구 결과는 또한 신뢰할 수 있는 정책 신호와 견고한 탄소 가격 책정이 이러한 자발적 폐기 제도의 효과적 운영에 중요할 수 있음을 부각시켰습니다.

### 5.3. 연구의 기여도와 중요성

본 연구는 CFPP 조기 폐기 정책에 대한 학문적 이해와 실무적 관리에 몇 가지 뚜렷한 기여를 제공합니다. 학문적으로 본 연구는 독일 역경매 제도를 예시로 삼아, 복잡한 현실 세계 과제인 CFPP 조기 폐쇄 정책 평가에 ROA와 LSMC를 적용하는 유용성을 주로 탐구하고 입증합니다. 이 ROA 접근법의 핵심 장점이자 본 연구의 중추적 기여는 미래 시장 및 정책 불확실성과 경영 유연성의 내재적 가치를 명시적으로 통합한다는 점입니다. 이는 자산의 경제적 생존 가능성과 정책 설계의 잠재적 효과성에 대한 보다 미묘하고 현실적인 통찰을 가능케 하여, 좌초 자산 평가 시 이러한 중요한 동적 차원을 종종 간과하는 전통적 정적 평가 방법의 주요 한계를 극복합니다.

또한 실무적 차원에서, 이 프레임워크는 다양한 보상 시나리오 하에서 개별 운영자가 조기 폐쇄를 선택하는 최적 시점을 평가할 수 있게 합니다. 다양한 잠재적 보상 금액(예: 경매 입찰 상한선의 해석 또는 수준 차이)을 모델에 입력함으로써 정책 입안자는 발전소 운영자의 관점에서 경제적으로 합리적인 보상 수준 범위에 대한 초기 통찰력을 얻을 수 있습니다. 이 정보는 경매 입찰 상한선의 적절성 설계 및 평가, 잠재적 보상 지출 예측, 더 광범위하게는 다른 관할권에서의 CFPP 조기 폐기를 위한 효율적이고 효과적인 보상 메커니즘 설계에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있습니다.

본 연구는 독일의 CFPP 역경매 사례에 초점을 맞추고 있으나, ROA의 개념적 프레임워크는 공정 에너지 전환 파트너십(JETP)이나 에너지 전환 메커니즘(ETM)과 같은 더 복잡하고 다각적인 에너지 전환 지원 프로그램 내 특정 구성 요소 평가나 관련 의사결정 문제 분석에 잠재적 시사점을 제공할 수 있습니다. 예를 들어, 실물 옵션의 논리는 JETP 내에서 변화하는 금융 조건에 대응하여 투자 시기를 결정하거나 ETM 하에서 자산 매각 옵션을 평가하는 데 부분적으로 적용될 수 있습니다. 물론, 이러한 프로그램들은 본 연구에서 다루는 단일 국가의 특정 경매 시스템보다 훨씬 광범위한 정치경제적, 사회적, 기술적 요소를 포괄하므로, ROA의 직접적 적용에는 상당한 방법론적 확장 및 다각적 고려가 선행되어야 합니다. 이는 향후 연구를 위한 중요한 방향이 될 수 있습니다.

### 5.4. 정책 및 산업적 함의

CFPP 조기 폐쇄 메커니즘을 설계하는 정책 입안자들은 역동적이고 불확실한 운영 환경을 인식해야 합니다. 독일과 같이 사전 정의된 보상 상한선은 비용 통제를 제공하지만, 발전소 운영자에게는 매

력도는 탄소 가격 책정 및 시장 변동성과 같은 외부 요인에 크게 좌우됩니다. 따라서 효과적인 정책은 강력한 탄소 가격 신호를 통합하고 조기 폐기 일정 및 보상 규칙에 대한 투명성과 신뢰성을 보장해야 합니다.

본 연구 결과는 한국에너지경제원의 김재엽, 조성진(2023) 보고서 등 최근 한국 내 분석과 함께 고려할 때, 한국의 석탄 단계적 폐지 전략에 중요한 시사점을 제공합니다. 김재엽, 조성진 (2023)은 대규모 CFPP 조기 폐지를 위해 "일부 석탄 발전소에 대해 독일의 경매 제도와 유사한 조기 폐지 방식을 채택하면 폐지를 위한 자금을 보다 경제적이고 효율적으로 조달할 수 있을 것"이라고 제안했습니다. 또한 그들은 고립된 전력망, 증가하는 전력 수요, 역사적으로 규제된 요금 체계로 특징지어지는 한국의 독특한 국가적 맥락을 강조하며, 경매와 표적 금융을 포함한 다양한 접근법을 통합하는 한국식 지원 메커니즘의 필요성을 부각시켰습니다. CFPP 운영사는 ROA 프레임워크를 활용해 조기 폐쇄 옵션의 전략적 가치를 정량화할 수 있습니다. 이는 탄소 가격 상승과 시장 변동성이 확대되는 환경에서 자산 관리, 해체 시기, 보상 협상에 대한 정보 기반 의사결정을 가능케 하여 좌초자산 위험 관리를 개선합니다. 확인된 주요 민감도(탄소 가격, 전력 시장 매개변수)는 전략적 계획 수립을 위한 핵심 모니터링 지점을 부각시킵니다. 또한 이 분석은 정부나 규제 기관이 개별 발전소의 경제적 상황을 추론할 수 있는 동적 도구를 제공할 수 있습니다. 이는 정부와 개별 발전소 운영자 간 정보 비대칭성을 부분적으로 완화할 수 있습니다.

## 5.5. 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구의 주요 한계점(4.4절 상세 기술)은 시장 가격의 확률적 모델링에 대한 가정(예: 로그 변환 데이터와 절대값 가격 데이터의 영향, 최소/최대 상한 효과)과 독일 경매의 입찰 상한을 균일한 행사가로 단순화한 점으로, 개별 발전소의 입찰 전략이나 경매 역학을 완전히 포착하지 못한다는 점입니다.

이러한 한계는 향후 연구를 위한 몇 가지 방향을 제시합니다. 확률적 가격 모델을 정교화하고 발전소별 입찰 행동(게임 이론이나 에이전트 기반 모델을 통해)을 반영하여 행사가를 모델링하면 현실성을 높일 수 있습니다. 현금 흐름 분석을 확대하여 더 많은 재무 데이터(예: PPA, 상세자본 구조)를 포함시키는 것도 권장됩니다. 또한 이 ROA 프레임워크를 다른 국가 정책이나 보상 메커니즘(JETP 및 ETM)에 적용하고 CCS 개조나 혼소와 같은 다른 실물 옵션을 탐구한다면 에너지 전환 기간 중 CFPP 관리에 대한 보다 포괄적인 관점을 제공할 것입니다.

## 참 고 문 헌

1. 정훈. (2023, 8월). 탈석탄 과정에서의 정의로운 전환과 입법 과제, 석탄화력발전소 폐지지역 지원에 관한 특별법제정 입법토론회. 국회미래연구원.
2. Amram, M., & Kulatilaka, N. (1999). Real Options: Managing Strategic Investment in An Uncertain World. *Financial Management Association Survey and Synthesis Series*.
3. Andreolli, M. & others. (2022). The user-side energy storage investment under subsidy policy: A real options approach. *Renewable Energy*, 189, 1033–1045. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.030>
4. Banda, W. (2021). A real options based framework for assessing the international attractiveness of mining taxation regimes. *Resources Policy*, 74, 102414. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102414>
5. Bank of England. (2024). Measuring Climate-Related Financial Risks Using Scenario Analysis. *Quarterly Bulletin*. <https://www.bankofengland.co.uk/quarterly-bulletin/2024/2024/measuring-climate-related-financial-risks-using-scenario-analysis>
6. Battiston, S., Mandel, A., Monasterolo, I., Schütze, F., & Visentin, G. (2017). A climate stress-test of the financial system. *Nature Climate Change*, 7(4), 283–288. <https://doi.org/10.1038/nclimate3255>
7. Bhat, S., Mann, W., & Murray, A. (2023). *Financing Mechanisms to Accelerate Managed Coal Power Phaseout*. <https://rmi.org/insight/metrics-and-mechanisms-to-finance-managed-coal-phaseout/>
8. Binsted, M., Iyer, G., Edmonds, J., Vogt-Schilb, A., Arguello, R., Cadena, A., Delgado, R., Feijoo, F., Lucena, A. F. P., McJeon, H., Miralles-Wilhelm, F., & Sharma, A. (2020). Stranded asset implications of the Paris Agreement in Latin America and the Caribbean. *Environmental Research Letters*, 15(4), 044026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab506d>
9. Blank, F. F., Samanez, C. P., Baidya, T. K. N., & Dias, M. A. G. (2016). Economic Valuation of a Toll Road Concession with Traffic Guarantees and the Abandonment Option. *Production*, 26(1), 39–53. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.168713>
10. Bodie, Z., Kane, A., & Marcus, A. J. (2001). *Investments*. McGraw-Hill.
11. Bos, K., & Gupta, J. (2018). Climate change: The risks of stranded fossil fuel assets and resources to the developing world. *Third World Quarterly*, 39, 436–453. <https://doi.org/10.1080/01436597.2017.1387477>
12. Breitenstein, M., Anke, C.-P., Nguyen, K. D., & Walther, T. (2020). *Stranded Asset Risk and Political Uncertainty: The Impact of the Coal Phase-out on the German Coal Industry*. U.S.E. Research Institute.
13. Bundesnetzagentur. (2021). German reverse auction. [www.bundesnetzagentur.de/DE/Home](http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Home)
14. Caldecott, B. (2017). Introduction to special issue: Stranded assets and the environment. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 7, 1–13. <https://doi.org/10.1080/20430795.2016.1266748>
15. Carbonara, N., & Pellegrino, R. (2018). Revenue Guarantee in Public–Private Partnerships: A Win–Win Model. *Construction Management and Economics*, 36(10), 584–598. <https://doi.org/10.1080/01446193.2018.1467028>
16. Clark, A., Jindal, A., Shrimali, G., Springer, C., & Rafaty, R. (2023). *Capitalising on coal*. *Early*

*retirement options for China-financed coal plants in Southeast Asia and beyond*. Global Development Policy Centre. Boston University.

17. Colín, F. C., Soliño, A. S., & Galera, A. L. L. (2017). Default and Abandonment Option in Motorway Concessions. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(1), 04016022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000309)
18. Collan, M., Fuller, R., & Mezei, J. (2009). A fuzzy pay-off method for real option valuation. *2009 International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering (BIFE)*.
19. Cui, R. Y., Hultman, N., Edwards, M. R., He, L., Sen, A., Surana, K., McJeon, H., Iyer, G., Patel, P., Yu, S., Nace, T., & Shearer, C. (2019). Quantifying operational lifetimes for coal power plants under the Paris goals. *Nature Communications*, 10(1), 4759. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12618-3>
20. Das Gupta, S. (2021). Using real options to value capacity additions and investment expenditures in renewable energies in India. *Energy Policy*, 148, 111916. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111916>
21. Daumas, L. (2023). Financial stability, stranded assets and the low-carbon transition – A critical review of the theoretical and applied literatures. *Journal of Economic Surveys*. <https://doi.org/10.1111/joes.12551>
22. Dixit, A. K., & Pindyck, R. S. (1994). *Investment Under Uncertainty*. Princeton University Press.
23. Dulong, A. von. (2023). Concentration of asset owners exposed to power sector stranded assets may trigger climate policy resistance. *Nature Communications*, 14(1), 6442. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42031-w>
24. Edwards, M. R., Cui, R., Bindl, M., Hultman, N., Mathur, K., McJeon, H., Iyer, G., Song, J., & Zhao, A. (2022). Quantifying the regional stranded asset risks from new coal plants under 1.5°C. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024029.
25. Elias, R. S., Wahab, M. I. M., & Fang, L. (2018). Retrofitting carbon capture and storage to natural gas-fired power plants: A real-options approach. *Journal of Cleaner Production*, 192, 722–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.019>
26. Fatica, M., & Phillips, E. (2013). *Pricing American options with least squares Monte Carlo on GPUs*. <https://doi.org/10.1145/2535557.2535564>
27. Fisch-Romito, V., Guivarch, C., Creutzig, F., Minx, J. C., & Callaghan, M. W. (2021). Systematic map of the literature on carbon lock-in induced by long-lived capital. *Environmental Research Letters*, 16(5), 053004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba660>
28. Gray, M., & Sundaresan, S. (2020). *Political decisions, economic realities: The underlying operating cashflows of coal power during COVID-19*. Carbon Tracker Initiative.
29. Guo, Y., & Hawkes, A. (2019). Asset stranding in natural gas export facilities: An agent-based simulation. *Energy Policy*, 132, 132–155. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.002>
30. Herman, J., & Usher, W. (2017). SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis. *The Journal of Open Source Software*, 2(9), 97. <https://doi.org/10.21105/joss.00097>
31. Hickey, C., O'Brien, J., Caldecott, B., McInerney, C., & Ó Gallachóir, B. (2021). Can European electric utilities manage asset impairments arising from net zero carbon targets? *Journal of Corporate Finance*, 70, 102075. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2021.102075>

32. Frontier Economics. (2023) *How (not) to auction the phase-out of coal*.
33. Iwanaga, T., Usher, W., & Herman, J. (2022). Toward SALib 2.0: Advancing the accessibility and interpretability of global sensitivity analyses. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 4, 18155. <https://doi.org/10.18174/sesmo.18155>
34. Jeong, H., Yun, H., & Son, J. (2023). Stranded asset risk assessment on ship investments. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 124, 103949. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103949>
35. Jaeyup Kim & Sungjin Cho. (2023). Exploring the feasibility of implementing international strategies to support the closure of domestic coal-fired power plants. Korea Energy Economics Institute
36. Kefford, B. M., Ballinger, B., Schmeda-Lopez, D. R., Greig, C., & Smart, S. (2018). The early retirement challenge for fossil fuel power plants in deep decarbonisation scenarios. *Energy Policy*, 119, 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.018>
37. Kim, C.-Y. (2008). *Real Option Approach to Ship Investment Valuation* [Master's thesis]. Korea Maritime University.
38. Leaton, J., Campanale, M., & Leggett, J. (2011). *Unburnable Carbon: Are the world's financial markets carrying a carbon bubble?* Carbon Tracker Initiative. <https://carbontracker.org/reports/carbon-bubble/>
39. Lee, H. (2011). *A Real Option Approach to Valuating Infrastructure Investments*.
40. Longstaff, F. A., & Schwartz, E. S. (2001). Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach. *Review of Financial Studies*, 14(1), 113–147. <https://doi.org/10.1093/rfs/14.1.113>
41. Luo, T., Cheng, Y., Falzon, J., & others. (2023). A framework to assess multi-hazard physical climate risk for power generation projects from publicly-accessible sources. *Communications Earth & Environment*, 4, 117. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00782-w>
42. Ma, Y., Swandi, K., Chapman, A. C., & Verbiè, G. (2020a). Multi-stage compound real options valuation in residential PV-Battery investment. *Energy*, 191, 116537. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116537>
43. Ma, Y., Swandi, K., Chapman, A. C., & Verbiè, G. (2020b). Multi-stage compound real options valuation in residential PV-Battery investment. *Energy*, 191, 116537. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116537>
44. Marques, N. L., Sanchez, L. D. M., Brandão, L. E. T., & Bastian-Pinto, C. D. L. (2024). Valuation of Infrastructure Projects: Review of the Real Options Literature. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2678(5), 174–183. <https://doi.org/10.1177/03611981231188372>
45. McGlade, C. (2015). The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature*, 517.
46. Mercure, J.-F., Pollitt, H., Viñuales, J. E., Edwards, N. R., Holden, P. B., Chewpreecha, U., Salas, P., Sognnaes, I., Lam, A., & Knobloch, F. (2018). Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets. *Nature Climate Change*, 8(7), 588–593. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0182-1>
47. Mo, J., Cui, L., & Duan, H. (2021). Quantifying the implied risk for newly-built coal plant to become stranded asset by carbon pricing. *Energy Economics*, 99, 105286. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105286>
48. Moon, Y., & Baran, M. E. (2018). Economic analysis of a residential PV system from the timing perspective: A real option model. *Renewable Energy*, 125, 783–795.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.020>

49. Nedopil, C., Ang, L., Carpio, M., & Yue, M. (2024). Can investors benefit from the early retirement of coal plants: A plant-level analysis of Chinese-sponsored coal stations in Vietnam and Pakistan. *Energy Policy*, *193*, 114291. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114291>
50. Penizzotto, F. & others. (2019). Real options valuation of photovoltaic power investments in existing buildings. *Renewable Energy*, *134*, 1117–1130. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.030>
51. Pfeiffer, A., Millar, R., Hepburn, C., & Beinhocker, E. (2016). The "2°C capital stock" for electricity generation: Committed cumulative carbon emissions from the electricity generation sector and the transition to a green economy. *Applied Energy*, *179*, 1395–1408. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.093>
52. Pomaska, L., & Acciaro, M. (2022). Bridging the Maritime-Hydrogen Cost-Gap: Real options analysis of policy alternatives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *107*, 103283. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103283>
53. Pringles, R., Olsina, F., & Garcés, F. (2015). Real option valuation of power transmission investments by stochastic simulation. *Energy Economics*, *47*, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.11.011>
54. Rust, J. (2019). *Has dynamic programming improved decision making?* *11*, 833–858.
55. Saygin, D., Rigter, J., Caldecott, B., Wagner, N., & Gielen, D. (2019). Power sector asset stranding effects of climate policies. *14*, 4.
56. Scott, J., Thuy, N. N., Litz, P., Koenig, H., & Ribansky, S. (2022, 6월). *Coal Phase-Out in Germany. The role of coal exit auctions. Version 1.2.* Agora Energiewende.
57. Sgarciu, S., Scholz, D., & Müsgens, F. (2023). How CO2 prices accelerate decarbonisation – The case of coal-fired generation in Germany. *Energy Policy*, *173*, 113375. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113375>
58. Shimbar, A. (2021). Environment-related stranded assets: An agenda for research into value destruction within carbon-intensive sectors in response to environmental concerns. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *144*, 111010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111010>
59. Srivastav, S., & Zaehring, M. (2024). The economics of coal phaseouts: Auctions as a novel policy instrument for the energy transition. *Climate Policy*, *24*(6), 754–765. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2358114>
60. *These 10 Countries Are Phasing Out Coal the Fastest.* (2024).
61. Tiedemann, S., & Müller-Hansen, F. (2023). Auctions to phase out coal power: Lessons learned from Germany. *Energy Policy*, *174*, 113387. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113387>
62. Trigeorgis, L. (1996). *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation.* The MIT Press.
63. Wang, Y., Wang, K., Liu, J., Wang, T., Yang, Q., & Zhuang, S. (2022). *Stranded Assets and Credit Default Risk in China's Coal Power Transition.* Renmin University of China. <https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20221104/Stranded-Assets-and-Credit-Default-Risk-in-China's-Coal-Power-Transition.pdf>
64. Wu, Z., Wu, Q., Yu, X., & Wang, Q. (2023). Real Option Analysis of Stranded Coal Power Assets in

China Considering Carbon Pricing. *2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 3131–3136. <https://doi.org/10.1109/EI259745.2023.10512385>

65. Yue, Y., & Ying, Y. (2021). Real option analysis for emission reduction investment under the sulfur emission control. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101055. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101055>
66. Zhang, W., Ren, M., Kang, J., Zhou, Y., & Yuan, J. (2022). Estimating stranded coal assets in China's power sector. *Utilities Policy*, 75, 101352. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101352>
67. Zhang, X., & Yin, J. (2023). Assessment of investment decisions in bulk shipping through fuzzy real options analysis. *Maritime Economics & Logistics*, 25(1), 122–139. <https://doi.org/10.1057/s41278-021-00201-x>

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