



## BIS 워킹 페이퍼

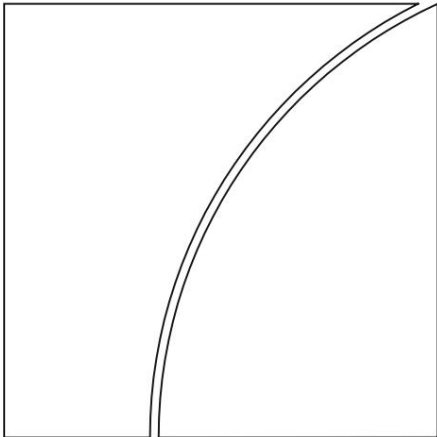
번호 1362

### 포트폴리오 구성에서 탄소 불확실성 수 용

판도라사와 오마르 졸라이카 지음

통화경제부

2026년 6월



JEL 분류: G11, G28, Q54, Q56

핵심어: 탄소 발자국, 국가 부채, 포트폴리오 최적화, 위험 균형

BIS 워킹 페이퍼는 국제결제은행(BIS) 통화경제부 소속 전문가들과 때때로 다른 경제학자들이 작성하며, BIS에서 발간합니다. 이 페이퍼들은 시사적인 주제를 다루며 전문적인 내용을 포함합니다. 본 간행물에 표현된 견해는 저자의 의견이며, BIS 또는 회원국 중앙은행의 견해를 반드시 반영하는 것은 아닙니다.

이 간행물은 BIS 웹사이트 ([www.bis.org](http://www.bis.org))에서 확인할 수 있습니다.

© 2026 국제결제은행. 모든 권리 보유. 일부 발췌 내용은 허용될 수 있습니다.  
출처를 명시하는 경우에 한하여 복제 또는 번역할 수 있습니다.

ISSN 1020-0959 (인쇄판)

ISSN 1682-7678 (온라인)

## 포트폴리오 구성에서 탄소 불확실성을 수용하기

판 도라 샤\* 오마르 줄라이카\*,<sup>1</sup>

\*국제결제은행

추상적인

본 논문에서는 국제 고정수익 포트폴리오 구성을 위한 프레임워크를 제안합니다. 재정적 고려사항과 환경적 고려사항을 통합한 채권 발행. 이는 우리 사업의 핵심입니다. 이 접근 방식은 재정적 개념과 유사한 탄소 반환이라는 개념을 도입하는 것입니다. 수익률은 미래의 내재적인 불확실성을 포착하기 위해 확률변수로 모델링되었습니다. 탄소 배출량. 개인의 재정 및 탄소 수익 프로필을 기반으로 함. 각국의 국채를 평가하기 위해 계층적 위험 분석에서 영감을 받은 알고리즘을 사용합니다. 국가별 기여도의 균형을 맞추는 포트폴리오를 구성하기 위한 HRP(Human Resource Partnership) 포트폴리오의 꼬리 위험은 금융 및 탄소 수익의 예상 부족분으로 측정됩니다. 선진국 국채에 초점을 맞춰 분석한 결과, 다음과 같은 사실이 밝혀졌습니다. 탈탄소화 목표를 효과적으로 조율하는 포트폴리오를 설계하는 것이 가능합니다. 다양한 투자자 선호도를 수용하면서 표본 내외의 재무 성과를 모두 고려합니다.

JEL 분류: G11, G28, Q54, Q56

핵심어: 탄소 발자국, 국가 부채, 포트폴리오 최적화, 위험 균형

---

<sup>1</sup> 저자들(dora.xia@bis.org 및 omar.zulaica@bis.org)은 Andrew Ang, Pierre에게 감사를 표합니다. 카르돈, 잉고 펜더, 루이스 가르시아-페이후, 필립 울드리지 및 제47회 EMEAP-BIS 금융시장 포럼, 스페인 중앙은행 국제준비제도 전문가 회의 참가자들. 경영진, 세계은행-금융분석가저널 공동 공공자산관리 컨퍼런스, 제9차 공공투자자 컨퍼런스의 유익한 의견에 감사드리며, 지미 쉼의 훌륭한 의견에도 감사드립니다. 연구 지원. 본 출판물에 표현된 견해는 저자들의 것이며, 국제결제은행(BIS) 또는 회원국 중앙은행들의 견해를 반드시 반영하는 것은 아닙니다.

## 1. 서론

보호구역 관리자와 같은 기관 투자자들은 기후 위험 요소를 포트폴리오에 통합하는 것의 중요성을 점점 더 인식하고 있습니다. 이는 다음과 같은 점을 반영합니다.

기관 투자자들이 환경, 사회, 지배구조(ESG) 목표를 포괄하는 지속가능성을 포트폴리오 구성에 반영하려는 움직임이 더욱 확대되고 있다. 2020년, (Fender

et al. (2020)은 지속가능성이 적어도 3분의 1에게 중요한 목표임을 보여주었습니다.

중앙은행의 역할에 대해서도 Fender et al.(2022)은 이러한 고려 사항들이 공공 투자자의 포트폴리오에 어떻게 적용될 수 있는지를 강조합니다. 이러한 더 넓은 맥락에서

ESG 의제에서 기후 관련 위험은 가장 측정 가능하고 정책적으로 중요한 위험으로 부상했습니다.

이는 채권 투자자에게 중요한 차원이며, 따라서 우리는 앞으로 이 부분에 집중할 것입니다.

아마도 투자 결정 과정에 기후 관련 사항을 통합하는 것일 겁니다.

이는 두 가지 핵심 요인에 의해 좌우됩니다. 첫 번째는 기후 변화의 위험성입니다.

조치가 필요합니다. 이러한 조치는 빈도 증가와 같은 신체적 위험에서 비롯될 수 있습니다.

극한 기상 현상의 심각성 또는 규제와 관련된 전환 위험으로부터 발생하는 위험

정책, 기술 발전, 그리고 저탄소 경제로 향하는 소비자 선호도의 변화. 두 번째 요인은 기관 투자자들이 미칠 수 있는 영향력입니다.

투자 전략을 통해 기후 변화 대응에 기여하는 방안으로는 자금 조달 등이 있습니다.

환경에 해로운 활동의 비용(Scatigna et al. (2021); Xia 및 Zulaica

(2022)).<sup>3</sup> 이를 설명하기 위해 Swinkels et al. (2025)은 정부 채권 투자자들이

지속가능발전목표(SDGs) 달성을 위한 재정 격차 해소에 도움이 될 수 있습니다.

강력하지만 자금이 부족한 지속가능성 정책을 가진 정부에 자본을 지원하고,

투자자들이 선진국 투자 포트폴리오에 지속가능발전목표(SDG) 점수를 통합할 수 있는 실질적인 사례

그리고 신흥 시장.

실제로 장기적인 투자 목표를 가진 투자자들에게 그러한 목표는 종종 순전히 정당한 이유가 됩니다.

위험 관리 관점에서 볼 때 그렇습니다. 다른 기관의 경우, 권한이 허용하는 범위 내에서 기후 변화에 적극적으로 영향을 미치는 것이 더 광범위한 목표와도 부합할 수 있습니다(Carstens(2024)). 어쨌든, 기관 투자자 포트폴리오에서 국채가 차지하는 중심적인 역할을 고려할 때,

탄소 발자국을 줄이는 것은 시급한 실질적 과제가 되었습니다. 국채에 대한 탈탄소 포트폴리오를 구축할 때 두 가지 핵심 질문이 제기됩니다. 첫 번째는 어떻게 해야 하는가입니다.

첫 번째는 포트폴리오의 탄소 발자국을 측정하는 것이고, 두 번째는 두 가지 개념을 어떻게 조화시킬 것인가입니다.

<sup>2</sup> 최근 외환보유액 관리자를 대상으로 한 또 다른 설문조사에 따르면, 조사 대상 중앙은행의 3분의 1 이상이 지속가능성을 외환보유액 관리의 네 번째 목표로 포함시킨 것으로 나타났습니다.

유동성, 안전성 및 수익의 전통적인 목표(HSBC(2025)).

<sup>3</sup> 기후 관련 위험에 대한 심층적인 논의와 실증적 연구 조사는 de Bandt et al.(2025)을 참조하십시오. 금융 시스템, 특히 은행에 미치는 영향에 대한 분석.

포트폴리오의 재무 성과를 고려한 탄소 발자국.

기존 문헌에서는 국제 포트폴리오의 탈탄소화를 위해 제약 조건 최적화 프레임워크를 자주 활용합니다. 이러한 프레임워크는 일반적으로 벤치마크 또는 지수 대비 추적 오차 최소화와 같은 포트폴리오의 재무 수익률을 우선시하는 동시에 탄소 예산을 통해 탄소 발자국을 고려합니다. 이 예산은 포트폴리오의 탄소 발자국을 제한하는데, 탄소 발자국은 일반적으로 각 국가의 포트폴리오 내 할당량에 비례하는 가중치를 갖는 국가별 탄소 배출량의 가중합으로 측정됩니다. 국가의 탄소 배출량은 원시 값 또는 GDP나 인구와 같은 요소로 스케일링한 값(탄소 집약도)으로 나타낼 수 있습니다. 이러한 할당 방법론을 사용한 연구로는 Cheng et al. (2022), Le Guenedal and Roncalli (2022), Schwaiger et al. (2023) 등이 있습니다.

이 접근 방식의 핵심적인 한계는 개별 국가의 탄소 발자국을 확정적인 값으로 취급한다는 점입니다. 이는 과거 데이터(즉, 미래 행동을 대표한다고 가정되는 최근 탄소 발자국 관측치)에 기반한 값이거나 특정 시나리오와 연관된 미래 예측 값(예: 탄소 발자국 수준에서 확정적인 NGFS 시나리오)에 기반한 값입니다. 이러한 관점은 모든 예측에 내재된 불확실성을 고려하지 못합니다. 이는 마치 각 자산(이 경우 각 국제)에 대해 단일한 미래 수익률 예측 경로에 기반하여 자산 배분을 수행하는 것과 유사하며, 실제 상황이 예측과 완벽하게 일치하지 않는 한 최적의 결과를 얻지 못할 수 있습니다.

본 논문에서는 개별 국가의 탄소 발자국을 확정적 변수가 아닌 확률 변수로 취급하여 국제 배분에 탄소 발자국 고려 사항을 통합하는 새로운 프레임워크를 제안합니다. 이 프레임워크의 핵심 혁신은 개별 국가 국제에 대한 탄소 수익률 개념을 도입한 것입니다.<sup>4</sup> 탄소 수익률은 특정 국가의 탄소 배출량 감소를 의미하며, 채권 가격 변동에 기반한 금융 수익률 개념과 유사합니다. 금융 수익률과 마찬가지로 탄소 수익률은 확률 변수이며, 그 분포는 과거 데이터 또는 예측 모델을 통해 추론할 수 있습니다. 과거 배출량 수준이나 확정적 예측 대신 확률적 탄소 수익률을 사용하는 데에는 두 가지 주요 이점이 있습니다. 첫째, 단순히 현재 배출량이 적은 국가를 선호하는 것을 방지하고 실제 감축에 대한 보상을 제공합니다. 둘째, 수익률 분포는 절대 배출량 수준보다 배출량 측정 방식에 따른 변동성이 적기 때문에 모델의 견고성을 향상시킵니다.

탈탄소화된 국제 포트폴리오를 구축하기 위해, 우리는 다음에서 영감을 받은 접근 방식을 채택합니다.

<sup>4</sup> 본 분석은 국제 포트폴리오의 탈탄소화에 초점을 맞추고 있지만, 이 프레임워크는 다른 자산 유형에도 쉽게 적용될 수 있습니다.

L'opez de Prado(2016)가 제안한 계층적 위험 균형(HRP) 알고리즘.

이 프레임워크는 각국의 재정적 위험과 탄소 위험의 기여도를 균형 있게 고려합니다.

국채, 전통적인 평균-분산 최적화와 달리, HRP 알고리즘은 포트폴리오 구성에 더욱 견고하고 다각화된 접근 방식을 제공합니다. 위험을 배분합니다.

자산의 계층적 구조를 효과적으로 활용하여 편법적인 해결책을 피함으로써 효율적인 결과를 도출합니다. 또한, HRP는 공분산 및 상관관계 추정 오류에 대한 내성이 강합니다.

행렬, 클러스터링 기법과 계층적 가중치 할당을 활용하면 행렬의 크기가 줄어듭니다.

평균-분산 최적화에 필요한 공분산 행렬 역행렬 계산에 비해 잡음이 있는 데이터에 더 민감합니다. 이러한 특징들 덕분에 HRP는 우리의 연구에 특히 적합합니다.

애플리케이션.

본 연구에서는 이 방법론을 선진국 국채에 적용하여 그 결과를 입증합니다.

탈탄소화 목표를 효과적으로 조율하는 포트폴리오를 설계하는 것이 가능하다는 것입니다.

재무 성과(표본 내외 모두 포함)를 분석합니다. 본 연구의 초점은 국가 신용등급에 있습니다.

선진국 채권은 기관 투자자들의 투자 포트폴리오에서 선진국이 차지하는 상당한 비중을 반영합니다.

국채 포트폴리오(예: 세계은행(2025) 참조). 그럼에도 불구하고, 우리의 프레임워크는 모든 국가의 국채에 동일하게 적용될 수 있습니다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성됩니다. 제2절에서는 개념을 소개합니다.

탄소 환원율에 대해 설명하고, 국가별 탄소 환원율 계산에 사용된 데이터를 설명합니다.

제3장에서는 탄소 수익률을 활용하여 국채 포트폴리오의 탈탄소화를 추진하는 방법을 설명합니다.

본 논문에서는 HRP 알고리즘에서 영감을 받은 프레임워크에 중점을 둡니다. 4절에서는 다음 내용을 제시합니다.

HRP 최적화 결과는 표본 내 및 표본 외 모두에서 제시됩니다. 5절에서 결론을 맺습니다.

## 2. 탄소 반환

본 논문에서는 탄소 환원이라는 새로운 개념을 소개하며, 이는 음의 백분율로 정의됩니다.

탄소 발자국 측정치의 변화. 음의 부호는 탄소 발자국 감소의 바람직함을 반영하며, 투자자들이 긍정적인 재정적 수익을 추구하는 방식과 일맥상통합니다.

이러한 틀 안에서, 기대 수익률, 변동성, 꼬리 위험 측정치와 같은 모든 표준 지표들이 사용됩니다.

또한 탄소 반환에 대한 상관관계를 계산할 수 있습니다. 이는 분석의 초점을 결정론적 값에서 결과 분포로 전환하는 것으로, 기존 분석 방식에서 크게 벗어난 것입니다.

현재 포트폴리오의 목표 함수에 탄소 발자국을 통합하는 방식  
건설.

우리는 이산화탄소 배출량을 이용하여 국가 국채의 환경 발자국을 측정합니다. 이러한 접근 방식은 두 가지 이유로 타당합니다. 첫째, 이산화탄소 배출량은 일반적으로 환경 발자국의 상당 부분을 차지합니다.

선진국 전체 온실가스(GHG) 배출량의 약 80%를 차지합니다.

이러한 이유로 이산화탄소 배출량은 해당 국가들의 전반적인 탄소 발자국을 나타내는 신뢰할 수 있는 지표가 됩니다. 실제로 이산화탄소 배출량은 한 국가의 전반적인 온실가스 배출량을 시의적절하고 정확하게 보여줍니다(Penninga and Zomerdijk (2024)). 둘째, 다른 온실가스 관련 데이터는 업데이트 빈도가 낮고, 발표 시기가 상당히 지연되는 경우가 많으며, 일부 범주(예: 소비 기반 측정치)는 일반적으로 이용할 수 없습니다. 본문에서는 "이산화탄소 배출량", "탄소 배출량", "탄소 발자국"이라는 용어를 상호 교환적으로 사용합니다.

## 2.1 정의 및 동기

주어진 탄소 발자국 측정값  $C_t$ 에 대해, 생산 기반 탄소 배출량과 같은 것들은 탄소 환원율 ( $R_c$ )은 다음과 같이 정의됩니다.

$$R_c = \frac{C_t}{C_{t-1}} \quad (1)$$

증권 가격의 상승 또는 하락률을 나타내는 금융 수익률과 유사하게, 탄소 수익률은 한 국가의 탄소 발자국 감소 또는 증가율을 나타냅니다. 음의 부호는 배출량 감소를 긍정적인 결과로, 배출량 증가를 바람직하지 않은 상태로 간주하기 위한 것입니다. 따라서 이 지표는 기대 수익률 극대화가 바람직한 목표인 금융 수익률과 유사하게 해석될 수 있습니다.

이는 매우 중요한 기여입니다. 왜냐하면 종종 간과되는 사실은 한 국가의 미래 탄소 발자국을 둘러싼 내재적인 불확실성이며, 이로 인해 다양한 시나리오(예: NGFS(2022)의 CO2 전환 경로)가 정의되었기 때문입니다. 기존 문헌에서는 포트폴리오 탈탄소화 문제를 다음과 같이 자주 정식화합니다(예: Le Guenedal 및 Roncalli(2022) 참조).

$$W = \arg \min \frac{1}{2} (w - b)' \Sigma (w - b) - \gamma (w - b)' \mu$$

$$\text{st } w' \mathbf{1} = 1; c' w \leq c_+,$$

여기서  $w = (w_1, \dots, w_N)$ 는 목표 포트폴리오이고,  $b = (b_1, \dots, b_N)$ 은 벤치마크 포트폴리오입니다.

$\Sigma$ 는 재무 수익률의 공분산 행렬,  $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_N)$ 은 기대 재무 수익률 벡터,  $c = (c_1, \dots, c_N)$ 은 개별 자산의 탄소 발자국을 나타내고,  $c_+$ 는 포트폴리오의 탄소 발자국 상한값입니다. 목표는 벤치마크 포트폴리오  $b$ 를 최대한 추종하면서 탄소 발자국을 상한값  $c_+$  미만으로 유지하는 포트폴리오  $w$ 를 구성하는 것입니다.

탄소 발자국 지표  $c$ 는 일반적으로 과거 데이터를 기반으로 하므로 과거 지향적인 접근 방식입니다. 이러한 한계를 해결하기 위해 Schwaiger 등의 연구자들은 새로운 방법을 제시했습니다.

al. (2023)은 이러한 변수들의 미래지향적 버전을 도입했습니다. 그러나 이러한 접근 방식은 종종 각 경로에 대해 단일하고 결정론적인 시나리오에 의존하여 탄소 발자국 예측에 내재된 불확실성을 사실상 무시합니다. 이는 자산 수익률의 분산과 상관관계를 무시하고 투자 포트폴리오를 구성하는 것과 유사하며, 결과적으로 최적의 성과를 얻지 못할 수 있습니다.

우리는 탄소 배출을 분포에서 추출한 확률 변수로 모델링합니다.

금융 수익률과 유사하게 포트폴리오를 구성하는 것입니다. 이는 탄소 발자국의 불확실성을 명시적으로 고려합니다.

과거 배출량 수준이나 확정적 배출량 예측에서 벗어나 확률적 탄소 수익률에 초점을 맞추는 것은 두 가지 주요 이점을 제공합니다. 첫째, 탄소 발자국 수준에 기반한 접근 방식은 종종 보다 적극적이고 미래지향적인 전환 계획을 가진 국가보다는 현재 배출량이 적은 국가로 포트폴리오를 이동시키는 결과를 초래합니다. 안젤리니(2024)가 주장했듯이, 배출량 수준에만 기반하여 자본을 재분배하는 것은 의미 있는 변화를 이끌어내기 어려울 것입니다. 배출량이 적은 국가는 이미 배출량이 적은 반면, 배출량이 많은 국가는 더 높은 금융 비용에 직면할 수 있으며, 이는 지속 가능한 기술 도입을 저해할 가능성이 있습니다.

반면, 배출량 감축에 기반한 자본 배분은 탈탄소화를 장려합니다.

둘째, 나중에 살펴보겠지만, 탄소 배출량의 절대적인 수준은 배출 유형에 따라 다르지만, 탄소 수익률의 과거 분포는 비교적 일관성을 보이는 경향이 있습니다. 이러한 일관성 덕분에 탄소 수익률을 활용하여 구성된 포트폴리오는 안정적인 결과를 보장합니다.

탄소 배출량 측정 방식의 변동에 더욱 강건합니다.

탄소 수익률을 활용하여 탈탄소 포트폴리오를 구성하는 방법은 무엇일까요? 탄소 수익률은 금융 수익률과 유사한 방식으로 정의됩니다. 따라서 기대 수익률, 변동성, 예상 손실, 상관관계 등 금융 수익률에 일반적으로 사용되는 주요 지표들을 탄소 수익률에도 그대로 적용할 수 있습니다. 나아가 금융 수익률 최적화를 위해 설계된 프레임워크를 탄소 수익률에도 직접 적용할 수 있습니다.

## 2.2 탄소 배출량 데이터

탄소 환원 개념을 적용하기 위해서는 국가 수준의 탄소 발자국을 측정하는 적절한 지표를 선택하는 것이 필수적입니다. 기존 문헌에서는 탄소 배출량을 절대값으로 사용하거나 GDP 또는 인구와 같은 경제 규모를 반영하는 요소로 정규화하는 방식을 흔히 사용합니다. 탄소 집약도라고도 불리는 이 정규화된 측정치는 경제 규모를 고려하여 국가 간 비교를 용이하게 합니다.

기후 위험 평가에 있어 탄소 배출량의 절대적인 수준이 더 직접적으로 중요하기 때문에, 본 분석에서는 원시 배출량 데이터에 초점을 맞춥니다. 탄소 발자국을 백분율 변화로 계산할 경우, 원시 탄소 배출량의 규모 효과가 상당 부분 반영되기 때문입니다. 하지만 본 연구의 탄소 환산 개념은 탄소 집약도에도 적용할 수 있습니다. 이 경우, 결과적으로 산출되는 탄소 환산 값은 탈탄소화 속도뿐만 아니라 GDP 및 인구 증가율도 반영하게 됩니다.

국가의 탄소 배출량을 분석할 때, 어떤 유형의 배출량을 고려할 것인지 결정하는 것도 중요합니다. 본 연구에서는 생산 기반 CO2 배출량에 초점을 맞추는데, 이는 소비 기반 추정치나 토지 이용 변화를 반영한 변형보다 추정치가 적고, 더 길고 일관된 이력을 가지고 있기 때문입니다. 배출량의 절대적인 수준은 회계 방식에 따라 달라지지만, 과거 탄소 배출량 분포는 비교적 일관되게 유지되는데, 이는 본 연구 프레임워크를 사용하는 데 있어 부수적인 이점이 보여줍니다(표 5 참조). 다양한 유형의 탄소 배출량에 대한 자세한 설명은 부록 A를 참조하십시오.

위 정보는 글로벌 탄소 프로젝트(GCP)에서 가져왔습니다. GCP는 전 세계 탄소 배출 및 흡수 추세를 추적하는 가장 포괄적인 데이터베이스로 널리 인정받고 있습니다. 190개국 이상을 대상으로 1800년대부터 생산 기반 배출량에 대한 과거 데이터와 1990년부터 소비 기반 배출량에 대한 데이터를 제공합니다. 5데이터는 Our World in Data(OWID) (링크)를 통해 대량으로 확보했습니다. 분석에 포함된 국가들의 생산 기반 탄소 배출량 시계열은 부록 B의 그림 11을 참조하십시오. 본 분석은 1982년부터 2021년까지 40년간의 23개 선진국의 탄소 배출량 데이터를 활용합니다. 해당 국가는 호주, 오스트리아, 벨기에, 캐나다, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 그리스, 아일랜드, 이탈리아, 일본, 네덜란드, 뉴질랜드, 노르웨이, 포르투갈, 싱가포르, 한국, 스페인, 스웨덴, 스위스, 영국, 미국입니다.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> 널리 사용되는 다른 탄소 배출량 데이터 출처로는 유엔 온실가스 인벤토리, OECD 대기 배출량 데이터베이스, S&P 글로벌 마켓플레이스에서 이용 가능한 트루코스트 환경 데이터 세트 등이 있습니다. 본 연구에서는 광범위한 데이터를 제공하고 무료로 쉽게 접근할 수 있는 GCP를 주요 데이터 세트로 사용했습니다. 이러한 출처들에서 얻은 과거 탄소 배출량 분포는 일관성을 보입니다(표 6 참조).

<sup>6</sup> 탄소 배출 수익률 데이터의 기간과 금융 수익률 데이터의 기간이 다른데, 이는 주로 데이터 가용성의 차이 때문입니다. 그러나 사용된 두 과거 데이터 샘플 모두 해당 수익률의 미래 분포에 대한 유용한 정보를 제공한다고 판단되는 한, 데이터 기간의 불일치는 큰 문제가 되지 않습니다. 이는 특히 투자 관리자가 미래를 가장 잘 대표하는 분포를 선택해야 하는 포트폴리오 최적화 맥락에서 중요합니다.

## 2.3 탄소 환원에 대한 실증적 분석

금융 수익률과 마찬가지로 탄소 수익률을 고려한 포트폴리오 구성은 본질적으로 미래지향적이어야 하며, 이러한 수익률의 미래 분포에 대한 추정에 기반해야 합니다. 본 분석에서는 금융 수익률 자산 배분에서 흔히 사용되는 방식인 과거 데이터를 입력값으로 활용하여 탄소 수익률의 분포를 추정합니다.

그럼에도 불구하고, 우리의 프레임워크는 과거 데이터에 의존하지 않는 미래 예측 추정 결과를 쉽게 수용할 수 있습니다. 다만, 이 논의는 본 논문의 범위를 벗어납니다. 다음으로 과거 탄소 배출량 데이터를 분석하겠습니다.

그림 1의 왼쪽 패널은 서로 다른 회계 방식을 적용한 미국의 과거 탄소 배출량을 보여줍니다. 오른쪽 패널에는 이에 상응하는 탄소 배출량 변화율 분포가 나타나 있습니다. 탄소 배출량 데이터는 연간 단위로 제공되므로 탄소 배출량 변화율은 연간("전년 대비") 변화율임을 유의하십시오.

탄소 배출량 측면에서.

탄소 배출량의 절대적인 수치는 회계 방법에 따라 크게 달라지므로 어떤 요소를 포함해야 하는지에 대한 의문이 제기되지만, 탄소 환급량의 분포는 놀라울 정도로 유사합니다(그림 1, 오른쪽 패널). 이러한 관찰 결과는 탄소 회계 방법의 선택이 탄소 환급량 분포에 미치는 영향이 제한적일 수 있음을 시사합니다.

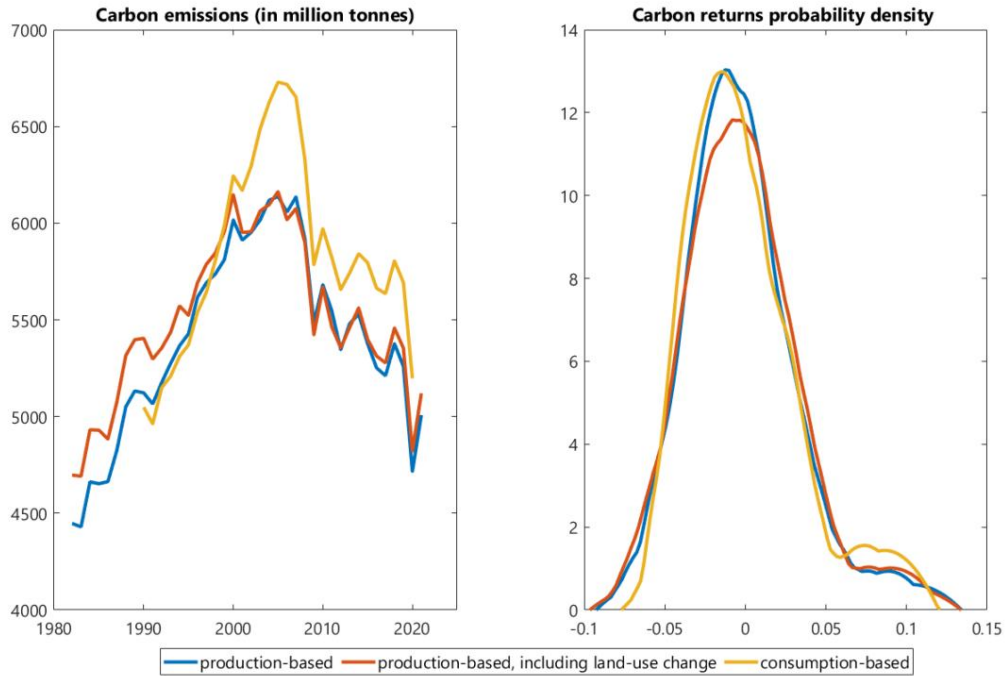
본 연구에서는 부록 B의 표 ??에서 서로 다른 유형의 탄소 배출량을 기반으로 계산된 탄소 환산량이 통계적으로 동일한지 여부를 공식적으로 검정함으로써 이 가설을 평가합니다. 결과는 생산 기반 배출량과 소비 기반 배출량을 기반으로 계산된 탄소 환산량이 동일한 분포에서 추출되었다는 귀무 가설이 표본에 포함된 모든 국가에서 일반적인 신뢰 수준에서 기각될 수 없음을 보여줍니다. 마찬가지로, 토지 이용 변화를 고려한 생산 기반 배출량의 경우에도 호주를 제외한 모든 국가에서 생산 기반 배출량과 소비 기반 배출량의 분포가 동일하다는 귀무 가설이 10% 유의 수준에서 기각되지 않습니다.

뉴질랜드.

포트폴리오 구성 분석을 위해 GCP의 생산 기반 탄소 배출량을 기준 측정치로 선택했습니다. CO2 데이터와 GHG 데이터 중 하나를 선택하는 것과 마찬가지로, 생산 기반 배출량은 더 높은 정확도와 더 긴 시계열 데이터 가용성 때문에 다른 대안보다 선호됩니다.

본 연구에서는 표본으로 선정된 23개국의 탄소 배출권 거래량을 추정했습니다. 표 1은 각 국가의 평균 수익률, 변동성, VaR(Value-at-Risk) 및 예상 손실액(모두 97.5% 신뢰 수준)을 보여줍니다. 분석 대상 국가 중 독일과 같은 유럽 경제권은 다음과 같습니다.

그림 1: 미국의 탄소 배출량 및 탄소 환급량



참고: 왼쪽 패널은 미국의 다양한 배출 유형별 탄소 배출량(백만 톤)을 나타내고, 오른쪽 패널은 해당 탄소 반환의 확률 밀도 함수를 보여줍니다. 파란색, 빨간색, 노란색 선은 각각 생산 기반 탄소 배출량, 토지 이용 변화를 포함한 생산 기반 배출량, 소비 기반 배출량을 나타냅니다.

프랑스, 이탈리아, 영국은 평균적으로 더 높은 탄소 배출량 감소율을 보이는 경향이 있으며(두 번째 열), 극단적인 값(네 번째 및 다섯 번째 열)은 상대적으로 적습니다. 이러한 결과는 유럽의 상대적으로 유리한 탈탄소화 추세를 반영하며, 이는 효과적인 국내 정책과 저탄소 경제로의 구조적 변화에 힘입은 것으로 보입니다. 이는 Crippa et al.(2023)의 연구에서 유럽연합(EU)이 주요 배출국 중 온실가스 배출량 감소폭이 가장 컸다는 관찰 결과와 일치합니다. 1990년과 2024년 사이 EU의 온실가스 배출량은 2024년에 1990년보다 거의 35% 감소했는데, 이는 지역별 배출량과 경제 성장 간의 탈동조화를 보여줍니다.

같은 기간 동안 미국의 배출량은 약 5% 정도만 감소했습니다.

표 1: 국가별 탄소 배출권 요약 통계

국가	평균 수익률	휘발성	위험가치 (97.5%)	예상되는 부족 (97.5%)
호주	-1.36%	2.26%	-6.55%	6.73%
오스트리아	-0.49%	5.06%	-11.69%	15.73%
벨기에	0.52%	4.90%	-9.85%	12.64%
캐나다	-0.64%	3.04%	-6.11%	6.49%
덴마크	1.01%	8.95%	-20.66%	21.51%
핀란드	0.39%	8.98%	-18.71%	19.85%
프랑스	0.94%	3.78%	-7.80%	9.26%
독일	1.05%	3.15%	-5.47%	5.53%
그리스	-0.45%	5.66%	-11.58%	13.94%
아일랜드	-1.01%	4.31%	-8.19%	9.59%
이탈리아	0.24%	4.23%	-8.67%	8.74%
일본	-0.43%	3.93%	-11.27%	13.36%
네덜란드	0.26%	4.90%	-9.05%	11.03%
뉴질랜드	-1.89%	4.44%	-11.68%	13.04%
노르웨이	-0.69%	3.56%	-7.86%	7.96%
포르투갈	-1.30%	7.48%	-19.13%	25.34%
싱가포르	-2.51%	19.11%	-41.27%	54.87%
대한민국	-3.92%	5.30%	-12.94%	13.81%
스페인	-0.49%	5.95%	-11.71%	13.89%
스웨덴	1.53%	4.63%	-10.60%	12.37%
스위스	0.17%	4.41%	-10.71%	12.03%
영국	1.12%	3.82%	-6.03%	6.29%
미국	-0.22%	3.29%	-5.72%	6.18%

참고: 이 표는 생산 기반 탄소를 사용하여 계산한 탄소 환원량 통계를 요약한 것입니다. 1982년부터 2021년까지의 배출량 데이터. 평균 수익률과 위험가치(Value-at-Risk)의 상위 10개 값과 함께 변동성 및 예상 손실액 하위 10개 값이 강조 표시됩니다.

### 3. 탄소 수익률을 고려한 포트폴리오 구성

이 섹션에서는 기존 포트폴리오 구성 방법을 어떻게 적용할 수 있는지 살펴봅니다.

국가 차원의 탄소 배출권 데이터를 통합하기 위해, 먼저 다음 방법의 활용법을 시연합니다.

마코위츠(1952)가 제시한 고전적인 평균-분산 접근법은 가장 널리 사용되는 포트폴리오 구성 방법 중 하나이지만, 본 논문에서는 이 방법의 한계를 강조합니다. 둘째, 로페즈 데 프라도(2016)가 제안한 계층적 위험 균형(HRP)이라는 머신러닝 기반 방법을 소개합니다. 그리고 탄소 수익률과 금융 수익률을 모두 통합하는 포트폴리오를 구성할 수 있도록 HRP를 적용합니다. 금융 수익률 데이터에 대한 자세한 내용은 부록 C에서 확인할 수 있습니다.

### 3.1 평균-분산 최적화

일반적인 평균-분산 설정에서 투자자는 주어진 기대 수익률 수준에서 총 포트폴리오 변동성을 최소화하려고 합니다. 투자자의 목표는 최적의 포트폴리오  $w = (w_1, \dots, w_N)$  (여기서  $w_i$ 는 국가  $i$ 에 적용)를 구성하는 것입니다. 탄소 수익률에 적용할 경우, 이 가중치 벡터  $w$ 의 목표는 기대 탈탄소화 목표 수준을 달성하면서 탄소 수익률의 분산을 최소화하는 것입니다.  $\mu_1, \dots, \mu_N$ , 여기서  $w_i$ 는 해당된 가중치를 나타냅니다.

이 최적화 문제의 수학적 공식은 다음과 같습니다.

$$\min_w \text{Var}[R_{cp,t}] \text{ s.t. } w^T \mathbf{1} = 1, w \geq 0, E[R_c] = \bar{r} = \arg \min_{\bar{r}} \text{Var}[R_{cp,t}]$$

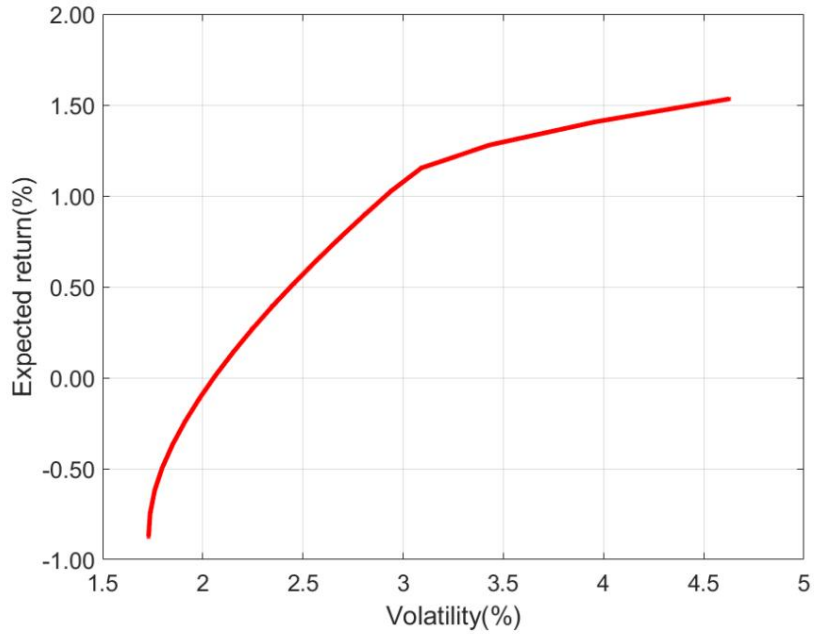
여기서  $\mu = (\mu_{c1,t}, \dots, \mu_{cN,t})$ 는 개별 국가의 예상 탄소 수익률을 나타내는 벡터이고,  $\Sigma$ 는 국가 간 탄소 수익률의 공분산 행렬입니다. 포트폴리오의 예상 탈탄소화는  $E[R_c] = w^T \mu$ 로 주어지며, 분산은  $\text{Var}[R_{cp,t}] = w^T \Sigma w$ 로 주어집니다. 여기서 제약 조건  $w^T \mathbf{1} = 1$ 은 포트폴리오 가중치의 합이 100%가 되도록 보장하는 동시에 롱 포지션만 허용합니다( $w \geq 0$ ).  $\bar{r}$ , 그리고 포트폴리오의 탈탄소화 세 번째 제약 조건은 예상 포트폴리오 탈탄소화의 목표 수준을 지정하며,  $\bar{r}$ 은 전 세계 배출량 감축 목표에 해당합니다.

$\bar{r}$ , 어느

실증 분석 결과(그림 2)는 과거 배출 패턴을 분석했을 때 예상 탈탄소화율이 -1%에서 1.5% 범위에 있음을 보여줍니다(상단 패널, y축). 효율적 투자선의 가장 왼쪽 끝에서는 포트폴리오의 예상 탈탄소화율이 음수 값을 나타내는데, 이는 이러한 투자 배분이 평균적으로 탄소 발자국 증가로 이어진다는 것을 의미합니다. 이러한 포트폴리오는 배출량 변화의 변동성을 최소화하지만, 시간이 지남에 따라 평균적으로 배출량이 악화된다는 점에서 환경적으로 바람직하지 않습니다. 효율적 투자선의 오른쪽에서는 포트폴리오가 더 높은 수준의 예상 탈탄소화를 달성할 수 있지만, 탄소 수익률의 변동성이 커지는 단점이 있습니다.

그림 2: 평균-분산 최적화 결과

(a) 효율적 경계선



(b) 선택된 포트폴리오에 대한 가중치

Australia	59.06	45.69	28.4	7.01	0
Austria	0	0	0	0	0
Belgium	0	0	0	0	0
Canada	2.81	2.84	0.27	1.76	0
Denmark	0	0	0	0	0
Finland	0	0	0	0	0
France	0	4.2	13.33	19.89	0
Germany	6.82	27.71	43.96	56.41	0
Greece	0	0	0	0	0
Ireland	0	0	0	0	0
Italy	0	0	0	0	0
Japan	0	0	0	0	0
Netherlands	0	0	0	0	0
NewZealand	1.88	0	0	0	0
Norway	16.04	11.17	6.58	0	0
Portugal	0	0	0	0	0
Singapore	0	0	0	0	0
SouthKorea	0	0	0	0	0
Spain	0	0	0	0	0
Sweden	0	0.45	7.45	14.94	100
Switzerland	13.39	7.93	0	0	0
UnitedKingdom	0	0	0	0	0
UnitedStates	0	0	0	0	0

$\bar{r}^c = -0.87\%$    
  $\bar{r}^c = -0.37\%$    
  $\bar{r}^c = 0.27\%$    
  $\bar{r}^c = 0.90\%$    
  $\bar{r}^c = 1.53\%$

참고: 위쪽 패널은 평균-분산 최적화를 통해 도출된 효율적 투자선(efficient frontier)을 보여줍니다. 아래쪽 패널은 효율적 투자선을 따라 선택된 포트폴리오에 대해 각 국가에 할당된 포트폴리오 가중치를 나타내며, 이는 예상 탈탄소화율의 다양한 수준에 해당합니다.

그림 2의 하단 패널에 나타난 효율적 투자선 상의 다섯 개 포트폴리오의 가중치를 살펴보면 이러한 자산 배분의 구성에 대한 통찰력을 얻을 수 있습니다. 변동성이 낮은 포트폴리오는 호주와 같이 배출량 프로필이 상대적으로 안정적("저위험")이지만 절대적인 배출량 측면에서는 종종 증가 추세를 보이는 국가에 대한 비중을 높이는 경향이 있습니다. 효율적 투자선의 오른쪽으로 갈수록 스웨덴, 독일, 프랑스와 같은 국가에 대한 투자 비중이 증가합니다. 이러한 국가들은 더 강력한 배출량 감축을 보이지만 연간 변동성이 크다는 특징이 있으며, 이는 반드시 바람직한 것은 아닙니다.

마지막으로, 표에서 명확히 알 수 있듯이, 투자 경계선에 있는 포트폴리오는 단 6개만 포함합니다. 최대 몇 개 국가에 투자하는 것이 바람직합니다. 소수의 자산(이 경우 국가)이 포트폴리오를 지배하는 코너 솔루션은 평균-분산 최적화의 결과로 흔히 나타나는 현상입니다. 그러나 이러한 자산 배분은 환경적 목표와 더불어 분산 투자를 중시하는 실무자들에게는 매력적이지 않거나 비현실적일 수 있습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다음 섹션에서는 탄소 배출량과 재무적 수익을 모두 고려하면서 더 큰 분산 투자를 달성할 수 있는 방법을 소개합니다.

그럼에도 불구하고 포트폴리오 집중도에 대한 우려가 적은 투자자라면 평균-분산 알고리즘을 활용하여 재무 수익률과 탄소 수익률을 모두 통합할 수 있습니다. 예를 들어, 투자자는 미리 정해진 재무 수익률 수준(또는 "임계값")을 설정하면서 탄소 수익률에 대한 평균-분산 경계를 분석할 수 있습니다. 또는 특정 수준의 탈탄소화를 보장하면서 재무 수익률에 대한 평균-분산 경계를 검토할 수도 있습니다. 세 번째 옵션은 Pedersen et al.(2021)에서 제안한 것과 유사한 프레임워크를 따르는 것입니다. 이 경우 ESG 점수는 특정 시점의 값으로 대체됩니다.

탄소 반환 분배.

## 3.2 HRP 최적화

앞서 논의한 바와 같이, 평균-분산 최적화는 종종 소수의 자산에 지나치게 집중된 포트폴리오를 만들어내는데, 이는 분산 투자를 추구하는 일부 기관 투자자들의 선호도와 부합하지 않을 수 있습니다. 더욱이, 이 프레임워크가 기대 수익률과 수익률 공분산에 대한 정확한 추정에 의존한다는 점은 특히 탄소 수익률을 다룰 때 상당한 어려움을 야기합니다.

또 다른 대안으로는 López de Prado(2016)가 제시한 HRP 포트폴리오 최적화 프레임워크가 있습니다. 평균-분산 최적화와 달리 HRP는 계층적 클러스터링과 위험 배분을 통해 위험 분산에 초점을 맞춥니다. 이를 통해 소수의 자산에 집중되는 문제나 잡음이 많거나 조건이 불량한 데이터로 인한 불안정성 등의 일반적인 문제를 방지할 수 있습니다.

공분산 행렬. HRP는 머신러닝(계층적 클러스터링) 원리와 위험 기반 할당을 결합하여 이를 달성합니다.

### 3.2.1 표준 HRP

표준 HRP 알고리즘은 세 가지 핵심 블록으로 구성됩니다. 첫째, 수익을 상관관계를 기반으로 거리 행렬을 계산하여 자산 간의 상관관계 구조를 계층적 관계로 변환합니다. 이 거리 행렬을 사용하여 자산을 클러스터링하고, 이를 트리 구조(덴드로그램)로 배열합니다. 둘째, 공분산 행렬을 준대각선 형태로 재정렬하여 상관관계가 강한 자산들이 함께 그룹화되도록 합니다. 마지막으로, 위험을 계층적으로 배분합니다. 즉, 역분산 가중치를 사용하여 클러스터 내 및 클러스터 간에 위험을 분산합니다. 이러한 계층적 접근 방식은 포트폴리오 전체에 위험을 균등하게 분산시켜 정확한 수익률 또는 공분산 추정에 의존하지 않는 분산 투자를 가능하게 합니다. HRP 구현에 대한 자세한 내용은 López de Prado(2018)를 참조하십시오.

HRP는 기존 최적화 기법에 비해 여러 가지 장점을 제공하여 경쟁력을 높입니다.

특히 본 연구의 응용 분야에 적합합니다. HRP는 공분산 행렬의 역행렬 계산을 피함으로써 추정 오차와 수치적 불안정성에 강건하며, 이는 탄소 수익률처럼 과거 데이터가 제한적인 잡음이 많은 데이터를 다룰 때 특히 중요합니다. 또한 HRP는 위험을 계층적으로 클러스터에 분산시켜 분산 효과를 자연스럽게 증진시키고, 소수의 자산에 과도하게 집중되는 위험을 줄입니다. 이러한 특징은 규모가 크고 복잡한 포트폴리오를 관리하는 기관 투자자에게 특히 유용합니다.

또한 HRP는 명시적인 수익 예측에 의존하지 않으므로 예상 수익을 추정하기 어려운 시나리오에서 실용적이고 신뢰할 수 있는 도구입니다. 이는 탄소 수익 예측의 어려움을 고려할 때 중요한 요소입니다.

### 3.2.2 수정된 HRP 알고리즘

HRP 알고리즘에서 영감을 받아, 클러스터링 기법과 위험 기반 할당 방법을 통합한 유사한 접근 방식을 제안합니다. 표준 HRP 알고리즘을 수정하여 위험 측정 기준으로 변동성 대신 기대 손실을 사용했습니다.

탄소 위험은 극단적이지만 드물게 발생하며 상당한 영향을 미치는 사건으로 특징지어지므로, 극단적 위험 관리에 집중하는 것이 기후 위험 관리에서 매우 중요하다고 생각합니다. 따라서 극단적 위험을 포착하는 데에는 극단적 위험 측정 지표인 기대 부족량(ES)이 더 적합합니다.

ES의 경우 위험 기여도는 다음과 같이 계산할 수 있습니다. 포트폴리오의 경우  
가중치  $w$ 를 사용하여 자산  $i$ 의 위험 기여도는 다음과 같이 주어집니다.

$$\text{위험 기여도 ES}_\alpha(w) = \sum_i w_i E[r_i | \text{승 } r \leq \text{VaR}_\alpha(w)],$$

여기서  $\text{VaR}_\alpha(w)$ 는 포트폴리오  $w$ 에 대한 신뢰 수준  $(1 - \alpha)$ 에서의 위험가치입니다.  
위 방정식은 다음과 같이 근사할 수 있습니다.

$$\text{위험 기여도 ES}_\alpha(w) \approx \sum_i w_i [\alpha T] \frac{1}{k_i} \text{정렬 } r$$

$k=1$

여기서  $r_{k_i}$ 는 시간에 따른 자산  $i$ 의 수익률을 오름차순으로 나타낸  $T$  포트폴리오, 포트폴리오 수익률 정렬  
것입니다. 이 계산은 과거 데이터(예: 재무 수익률) 또는 시뮬레이션 데이터(예: 탄소 수익률)를 사용하여 수행할 수 있습니  
다.

#### 수익률 분포 채우기

수정된 HRP 알고리즘을 사용하여 최적화하기 전에 탄소 수익률에 대한 견고한 수익률 분포가 필요합니다. 그러나 탄소  
수익률의 과거 시계열 데이터는 상대적으로 짧으며, 대부분의 국가에서 연간 관측치가 30~40개에 불과한 경우가 많습니다  
(2절 참조). 코플라 방법(예: Embrechts et al.(2001) 및 McNeil et al.(2015))은 각 국가의 탄소 수익률의 주변 분포  
를 국가 간 의존성 구조와 별도로 모델링할 수 있도록 하여, 국가 간 비선형 관계 및 잠재적인 꼬리 부분 동조 현상을 유연  
하게 포착할 수 있는 방법을 제공합니다.

이 접근 방식은 금융 위험 관리, 특히 가용 데이터가 제한적이지만 공동 하방 위험을 이해하는 것이 중요한 상황에서  
널리 사용되고 있습니다(Cherubini et al.(2004) 및 Patton(2012)이 두 가지 예입니다). 이러한 맥락에서 t-코플라는  
가우스 코플라보다 더 강한 공동 꼬리 의존성을 수용할 수 있기 때문에 특히 적합하며, 이는 여러 관할 구역에 걸쳐 동시  
에 발생할 수 있는 전환 위험을 모델링할 때 중요한 특징입니다. 따라서 적합된 코플라를 사용한 시뮬레이션은 경험적으로  
관찰된 국가 간 의존성 패턴(즉, 원래의 경험적 주변 분포)을 유지하면서 그럴듯한 탄소 수익 결과의 더 풍부한 분포를 제  
공합니다. 중요한 것은 목표가 새로운 정보를 생성하는 것이 아니라, 특히 관측치가 드문 꼬리 부분에서 가용 데이터에 의  
해 암시되는 분포에 대한 더 안정적인 추정치를 얻는 것이라는 점입니다.

따라서 우리의 과정은 공동 누적의 매개변수를 추정하는 것에서 시작됩니다.

탄소 반환량의 누적 분포 함수(CDF)를 분석했습니다. 극단적인 사건을 모델링할 때 필수적인 꼬리 의존성을 잘 나타낼 수 있는 t-코플라를 선택했습니다. 최대 우도법을 이용하여 t-코플라의 순위 상관 행렬(스피어만 상관계수  $\rho$ )과 자유도를 추정했습니다. 이렇게 보정된 t-코플라를 사용하여 10,000개의 탄소 반환량 시나리오를 시뮬레이션했습니다.

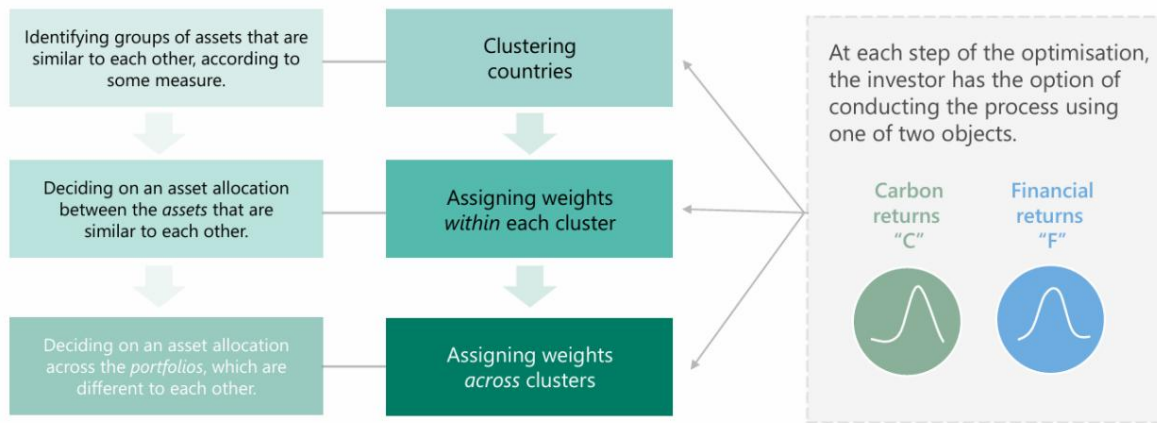
각 국가별 탄소 배출량 분포의 경험적 특성을 보존하기 위해, 원본 표본을 사용하여 비모수 커널 밀도 추정(KDE) 방식으로 주변 분포를 구성합니다. 그런 다음, 각 국가에 대해 코플라를 통해 얻은 시뮬레이션된 결합 분포를 해당 국가의 KDE 기반 분포의 역누적분포(CDF)를 적용하여 주변 분포로 변환합니다. 이를 통해 시뮬레이션된 데이터는 원본 주변 분포의 특성을 유지하면서 훨씬 더 큰 표본 크기를 확보할 수 있습니다. 결과적으로 각 국가의 탄소 배출량 분포의 꼬리 부분을 더 잘 파악할 수 있으며, 이를 통해 예상 탄소 배출량 부족분(또는 본 연구에서는 "탄소 발자국 부족분")을 더 정확하게 추정할 수 있습니다.

#### 수정된 HRP 최적화

탄소 반환 분포가 확립되면 수정된 HRP 알고리즘을 적용하여 다양한 구성을 사용하여 포트폴리오를 구축할 수 있습니다. 최적화 과정은 세 단계로 이루어집니다.

1. 국가 클러스터링: 먼저 국가들을 수익률 상관관계를 기준으로 클러스터링합니다. 일반적으로 사용되는 피어슨 상관계수 대신, 꼬리 의존성을 더 잘 포착하고 앞서 추정한 수익률 분포와 일관성을 유지하는 순위 기반 상관계수를 사용합니다.
2. 클러스터 내 위험 할당: 둘째, 각 클러스터 내에서 다음과 같은 요소에 가중치를 할당합니다. 자산이 클러스터의 전반적인 ES에 동등하게 기여하도록 보장합니다.
3. 클러스터 간 위험 할당: 가중치는 클러스터 간에 동일하게 적용하여 할당됩니다. 전체 포트폴리오에 대한 ES 기여도.

그림 3: 최적화 워크플로



참고: 이 도표는 HRP 알고리즘에서 영감을 받아 클러스터링 기법과 위험 기반 할당 방법을 통합한 제안된 최적화 접근 방식의 워크플로를 보여줍니다.

그림 3에 요약된 세 단계 각각에서 재정적 수익("F"로 표시됨) 또는 탄소 수익("C")을 활용할 수 있습니다. 그 결과 표 2에 나열된 것처럼 탄소 및 재정 데이터에 대한 강조점이 서로 다른 8가지 구현 방식이 생성됩니다.

(F, F, F) 구성은 기후 위험을 고려하지 않고 재무 지표에만 초점을 맞춘 표준 HRP 알고리즘을 나타냅니다. 반대로 (C, C, C)는 탄소 환원 분배를 최우선으로 합니다. 나머지 구성은 재무 환원과 탄소 환원의 균형을 맞춘 조합을 나타냅니다. 이러한 결과는 다음과 같습니다.

다음 절에서는 8가지 최적화 접근 방식에 대해 자세히 설명합니다.

## 4. 최적화 결과

### 4.1 표본 내 결과

먼저, 모든 HRP 최적 포트폴리오를 얻기 위해 최적화 접근 방식을 전체 과거 데이터 세트에 적용합니다. 진행 과정은 다음과 같습니다.

1. 이용 가능한 모든 과거 수익률을 사용하여 국가들을  $J$  그룹으로 분류합니다.
2. 각 그룹  $j \in \{1, \dots, J\}$ 에 대해, 벡터  $w_j$ , 그룹  $j$  내의 국가에 할당된 가중치를 각 요소가 나타내는 가중치를 갖는 ES-패리티 포트폴리오를 구성합니다.

표 2: 가능한 최적화 구현 방법

	클러스터링 클러스터 내 가중치 클러스터 간 가중치		
1	예프	예프	예프
2	예프	예프	가음
3	예프	가음	예프
4	가음	예프	예프
5	예프	가음	가음
6	가음	예프	가음
7	가음	가음	예프
8	가음	가음	가음

참고: 이 표는 당사 시스템에 적용할 수 있는 8가지 최적화 접근 방식을 나열합니다. 프레임워크. "F"는 재정적 수익, "C"는 탄소 수익을 의미합니다. 두 번째부터 네 번째 열은 각각 해당합니다. 최적화 워크플로의 세 단계로 구성됩니다(그림 3 참조).

3. 각 그룹에 대한 과거 수익률 시계열을 계산하고 두 번째 ES-패리티 문제를 해결합니다.

최적화를 통해 최종 포트폴리오에서 그룹  $j$ 에 할당되는 최적의 가중치를 얻습니다.

$w$ 로 표시된  $\pi$  제이.

4. 그룹  $j$  내 국가들에 대한 최종 사전 할당량은  $w$ 로 주어진다.

$\pi$  제이 와이.

이러한 가중치는 재정적 수익률과 탄소 배출 수익률을 계산하는 데 사용되며, 이는 다음과 같은 역할을 합니다. 샘플 내 성능 평가의 기준으로서.

본 연구에서는 이러한 표본 내 최적화의 두 가지 극단적인 경우에 대한 결과를 살펴봅니다.

(F,F,F)와 (C,C,C)는 표 2의 맨 위 행과 맨 아래 행에 해당합니다.

(F,F,F)에서 국가들은 클러스터로 묶이고, 클러스터 내 및 클러스터 간에 가중치가 할당됩니다.

재정적 수익만을 기준으로 합니다. 마찬가지로 (C,C,C)의 경우 클러스터링 및 가중치 할당은 모두 탄소 수익을 기준으로 합니다.

재정적 수익 또는 탄소 배출량에 따른 국가 그룹화는 몇 가지 흥미로운 점을 보여줍니다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 대조가 나타납니다. 재무 수익률별로 그룹화했을 때, 일부 예상되는 결과가 나타났습니다.

패턴이 나타납니다. 유럽 국가들은 대체로 함께 그룹화되지만, 노르웨이, 스웨덴, 스위스와 같은 유로존 비회원국들은 (비록 멀지는 않지만) 별도로 그룹화되는 경향이 있습니다.

유로존 국가들 중에서, 호주, 뉴질랜드 등을 포함한 소규모 개방 경제권,

캐나다, 싱가포르, 한국, 영국은 같은 그룹으로 묶여 있습니다.

이러한 통화 클러스터에는 상품 통화도 포함됩니다. 또한, 일본과 미국을 포함하는 소위 안전자산 정부들로 구성된 별도의 클러스터도 있습니다.

반면, 탄소 배출량을 기준으로 한 클러스터링은 매우 다른 그룹화를 초래하며, 각 국가의 환경 발자국에 대한 배경 지식 없이는 이를 합리적으로 설명하기 어렵습니다.

예를 들어 덴마크, 핀란드, 스웨덴은 함께 묶여 있는데, 이는 이들 국가가 탄소 배출량을 상당히 조기에 감축했음을 반영하는 것으로 보인다. 이들 국가는 2000년대 이후 탄소 배출량 감소 추세를 보였으며, 이는 다른 많은 국가보다 훨씬 이른 시점이다(그림 11 참조).

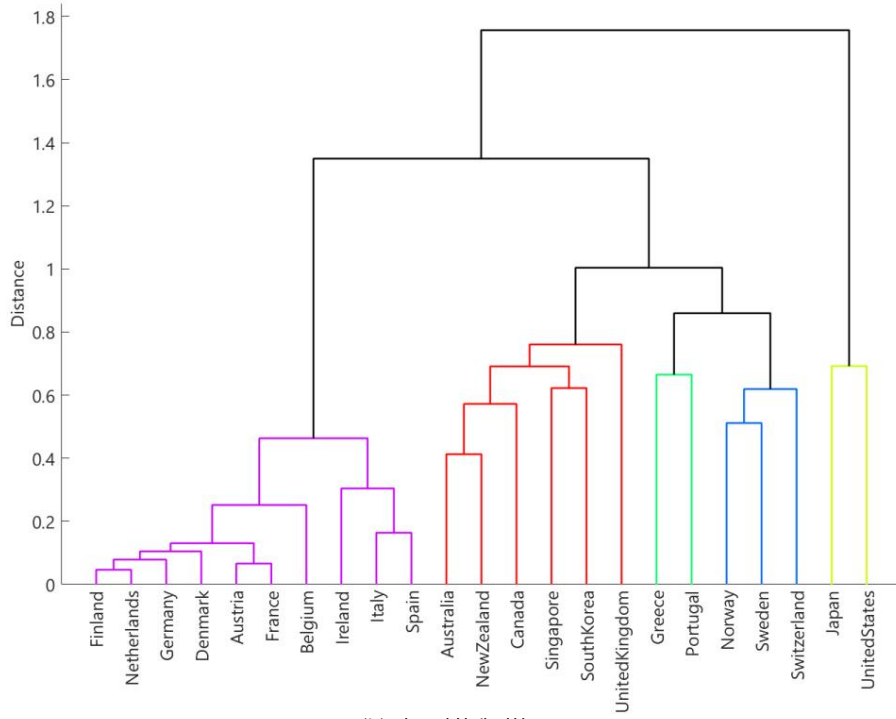
최적화를 재정적 수익률에만 기반할 때와 탄소 수익률에만 기반할 때, 개별 국가에 대한 포트폴리오 가중치는 상당한 차이를 보입니다(그림 5). (F,F,F) 포트폴리오의 경우, 미국, 일본, 스위스가 포트폴리오 점유율 상위 3위를 차지하는 것은 당연하며, 이는 이들 국가가 예상 탄소 배출량 감소에 기여한 정도를 반영합니다. 이 세 나라는 전체 포트폴리오의 거의 50%를 차지합니다. 반면, 최적화를 탄소 수익률에 기반할 경우, (C,C,C) 포트폴리오의 가중치는 더욱 고르게 분포됩니다. 노르웨이, 호주, 스웨덴, 미국이 가장 높은 비중을 차지하며, 이들 국가의 비중은 전체 포트폴리오의 25% 미만입니다.

알고리즘의 목표 달성 여부를 평가하기 위해 포트폴리오 (F,F,F)와 (C,C,C)의 재무 수익률 및 탄소 수익률 프로필을 비교했습니다. 그림 6은 두 포트폴리오의 재무 수익률(왼쪽 패널)과 탄소 수익률(오른쪽 패널) 분포를 보여줍니다. 예상대로 (F,F,F) 포트폴리오(노란색 계열)는 재무 수익률의 경우 좌측 꼬리가 덜 두드러지는 반면, 탄소 수익률의 경우 좌측 꼬리가 더 두드러지는 양상을 보입니다. 반면 (C,C,C) 포트폴리오(녹색 계열)는 이와 반대되는 패턴을 나타냅니다.

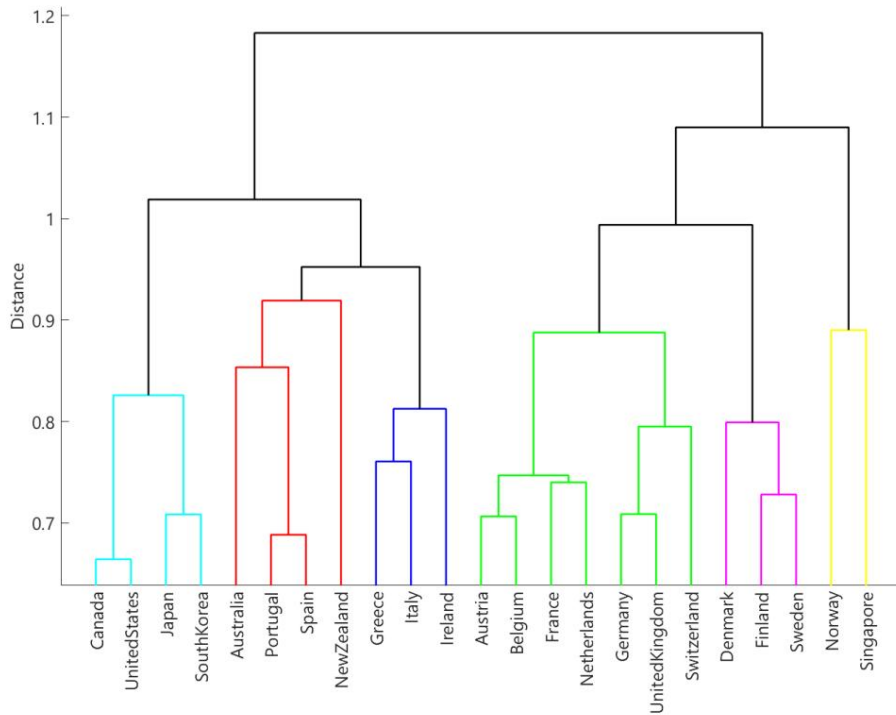
두 포트폴리오의 수익률에 대한 추가적인 요약 통계를 계산하여 표 3에 제시했습니다. 두 포트폴리오는 평균 재무 수익률과 탄소 수익률 측면에서 유사하지만, (F,F,F) 포트폴리오는 재무 수익률의 변동성이 더 낮고, (C,C,C) 포트폴리오는 탄소 수익률의 변동성이 더 낮습니다(분산은 목적 함수에 포함되지 않음을 유의하십시오). 또한, 5번째, 2.5번째, 1번째 백분위수와 음의 수익률 발생 확률로 측정되는 하방 위험에 초점을 맞추면 (F,F,F) 포트폴리오는 재무 수익률에 대한 하방 위험이 더 낮고, (C,C,C) 포트폴리오는 탄소 수익률에 대한 하방 위험이 더 낮습니다. 이러한 결과는 재무(또는 탄소) 수익률을 우선시하는 포트폴리오가 각 영역에서 하방 위험을 완화하는 데 더 효과적임을 확인시켜 주며, 이는 알고리즘 설계 의도와 일치합니다.

그림 4: 수익률 상관관계를 기준으로 국가들을 그룹화함

(a) 재무 수익률에 따라



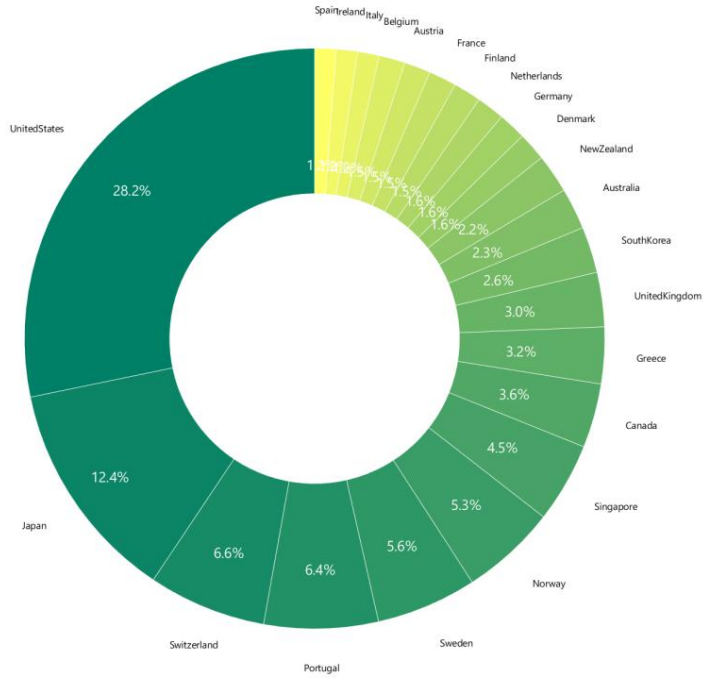
(b) 탄소 반환에 의한



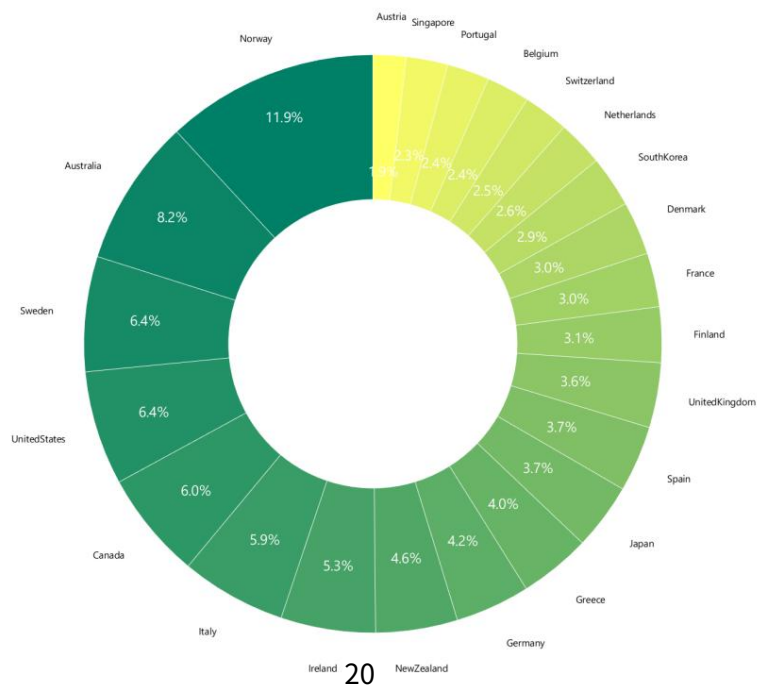
참고: 위쪽 패널은 국가들을 재정적 수익을 기준으로 클러스터링했을 때의 덴드로그램을 보여주고, 아래쪽 패널은 탄소 배출량 수익을 기준으로 클러스터링했을 때의 덴드로그램을 보여줍니다. 19

그림 5: 표본 내 최적화 포트폴리오에 대한 개별 국가의 가중치

(a) (F,F,F) 최적화

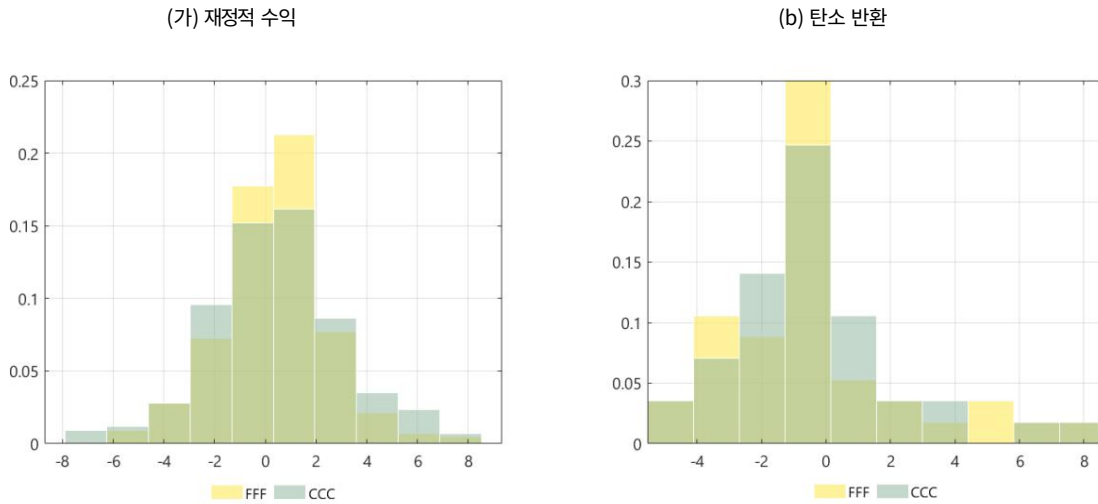


(b) (C,C,C) 최적화



참고: 위쪽 원형 차트는 (F,F,F) 최적화 포트폴리오에서 각 국가의 가중치를 나타내고, 아래쪽 원형 차트는 (C,C,C) 최적화 포트폴리오에서 각 국가의 가중치를 나타냅니다.

그림 6: 표본 내 최적화 포트폴리오의 수익률 분포 히스토그램



참고: 왼쪽 패널에는 (F,F,F) 및 (C,C,C)의 재무 수익률 히스토그램이 표시됩니다. 오른쪽 패널은 최적화된 포트폴리오를 보여주고, 오른쪽 패널은 동일한 포트폴리오에 대한 탄소 수익률의 히스토그램을 나타냅니다. 포트폴리오. 노란색 막대는 (F,F,F) 최적화 포트폴리오를 나타내고, 녹색 막대는 (C,C,C) 최적화된 포트폴리오.

표 3: 표본 내 최적화 포트폴리오의 수익률 요약 통계

	재정적 수익		탄소 반환	
	(F,F,F)	(C,C,C)	(F,F,F)	(C,C,C)
평균 수익률 변동성	0.4%	0.4%	-0.4%	-0.4%
95%	2.0%	2.7%	2.9%	2.7%
VaR(Value-at-Risk) 97.5%	-3.2%	-3.9%	-4.2%	-4.2%
VaR(Value-at-Risk) 99%	-4.1%	-5.8%	-5.0%	-4.8%
VaR(Value-at-Risk) 음의 수	-4.7%	-6.4%	-5.5%	-5.1%
익률 발생 확률	41.4%	44.1%	70.0%	67.5%

참고: 이 표는 (F,F,F) 및 (C,C,C)의 재정적 수익률과 탄소 배출량에 대한 요약 통계를 나타냅니다. 표본 내 최적화를 기반으로 최적화된 포트폴리오.

## 4.2 표본 외 결과

이제 우리 알고리즘의 표본 외 성능을 평가하여 그 타당성을 검증해 보겠습니다.

견고성과 예측력을 평가합니다. 2008년 1월부터 재무 데이터를 사용하여 분석을 시작합니다.

2007년 12월까지의 수익률 데이터와 2006년까지의 탄소 배출량 데이터를 사용하여 설명합니다.

1년의 보고 지연 기간을 고려하여 다음과 같은 단계를 반복적으로 수행합니다.

1.  $t$ 월까지 이용 가능한 모든 과거 수익률 데이터를 사용하여 국가들을  $J$ 개의 그룹으로 분류합니다. 탄소 수익률의 경우,  $t$ -코폴라를 사용하여 다변량 수익률 분포의 더 풍부한 버전을 생성합니다(섹션 3.2.2 참조).

용법.

2. 각 그룹  $j \in \{1, \dots, J\}$ , 우리는 가중치 벡터  $w_j$  를 사용하여 사전 ES-균형 포트폴리오를 구성합니다. 여기서 각 요소는 그룹  $j$  내의 국가에 할당된 가중치를 나타냅니다.

3. 각 그룹에 대한 과거 수익률 시계열을 계산하고 두 번째 ES-패리티 ( $p$ ) 최적화를 수행하여 그룹  $j$ 에 대한 사전 포트폴리오 가중치( $w$ )를 구합니다.

제이.

4. 그룹  $j$  내 국가에 대한 최종 사전 할당은  $w_j$ 입니다. 이러한 가중치는 1개월 후 수익률을 계산하는 데 사용되며, 이는 표본 외 성과를 평가하는 기초가 됩니다.

5. 기간을 한 달 앞으로 조정하고 1~4단계를 반복합니다. 이 절차는 다음과 같습니다.

매달 재정적 수익 관측치 하나와 탄소 수익 관측치 하나를 추가합니다.

매년 연말마다.

먼저 (F,F,F) 최적화 포트폴리오와 (C,C,C) 최적화 포트폴리오를 비교합니다. 시간에 따라 변화하는 포트폴리오 가중치를 자세히 분석하는 대신, 두 포트폴리오의 수익률 성과(F 및 C 공간 모두에서)에 초점을 맞춥니다. 두 포트폴리오의 재무 수익률은 비슷한 규모이며, (C,C,C) 포트폴리오는 변동성이 약간 더 높지만 전체적으로 더 높은 수익률을 보입니다(그림 7, 왼쪽 패널). 재무적 꼬리 위험과 관련하여, 결과는 표본 내 분석 결과와 일치합니다. 수익률 분포 히스토그램(그림 8, 왼쪽 패널)은 (C,C,C) 포트폴리오의 꼬리가 약간 더 두껍다는 것을 보여줍니다. 이러한 관찰은 누적 분포(그림 9, 왼쪽 패널)에서도 더욱 뒷받침됩니다. (C,C,C) 포트폴리오는 (F,F,F) 포트폴리오에 비해 부정적인 재무 수익에 대한 누적 확률이 지속적으로 더 높습니다(즉, 꼬리가 더 두껍습니다).

회전.

탄소 수익률 측면에서 보면, (C,C,C) 최적화 포트폴리오는 우수한 성과를 보여줍니다. 이 포트폴리오는 수익률이 크게 하락할 가능성(국가별 탄소 배출량 증가)이 적고, 상당한 수익 증가(즉, 탈탄소화)를 달성할 가능성이 높아 누적 탄소 수익률이 훨씬 높습니다(그림 7, 오른쪽 패널).

꼬리 위험과 관련하여 탄소 수익 분포 히스토그램과 누적 분포 함수 모두 (C,C,C) 포트폴리오가 더 낮은 왼쪽 꼬리 위험을 가지고 있음을 나타냅니다(그림 8 및 그림 9, 오른쪽 패널). 이는 포트폴리오 최적화에서 탄소 배출을 우선시할 때 바람직한 속성입니다.

표 4는 두 포트폴리오의 수익률 통계를 요약 비교하여 제시하며, 우리의 연구 결과를 뒷받침합니다. (F,F,F) 포트폴리오는 사후 재무 수익률 측면에서 변동성이 낮고 하방 위험이 감소된 것으로 나타났습니다. 반면, 탄소 수익률에 초점을 맞추면 (C,C,C) 포트폴리오가 이 측면에서 (F,F,F) 포트폴리오보다 우수한 성과를 보입니다.

나머지 포트폴리오의 성과도 비교했습니다. 간결성을 위해 97.5% VaR(Value-at-Risk)만 보고합니다(그림 10). 대체로 재무 수익에 더 큰 비중을 두는 포트폴리오(즉, "F"가 많은 포트폴리오)는 재무적 꼬리 위험이 낮은 반면, 탄소 수익에 더 중점을 두는 포트폴리오(즉, "C"가 많은 포트폴리오)는 탄소적 꼬리 위험이 낮은 것으로 나타났습니다.

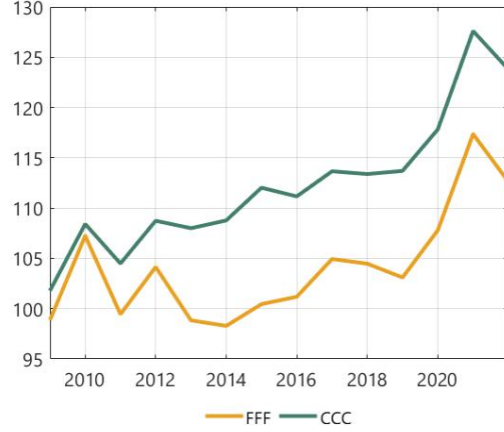
이러한 결과들을 종합해 보면, 우리 알고리즘은 표본 내외에서 모두 우수한 성능을 보인다는 것을 알 수 있습니다. 재정적(또는 탄소) 수익률의 하방 위험을 완화하도록 설계된 포트폴리오는 이러한 목표를 달성합니다. 따라서 투자자는 정책 목표 및/또는 투자 선호도와 가장 잘 부합하는 포트폴리오와 같은 보다 주관적인 기준에 따라 8가지 가능한 구현 방식 중에서 선택할 수 있습니다. 예를 들어, 재정적 수익률에 주로 관심을 두는 투자자는 "F"가 더 많은 포트폴리오(예: F, F, F)를 선호할 수 있는 반면, 탄소 수익률에 중점을 두는 투자자는 "C"가 더 많은 포트폴리오(예: C, C, C)를 선호할 수 있습니다.

그림 7: 표본 외 최적화 포트폴리오의 누적 수익률

(가) 재정적 수익



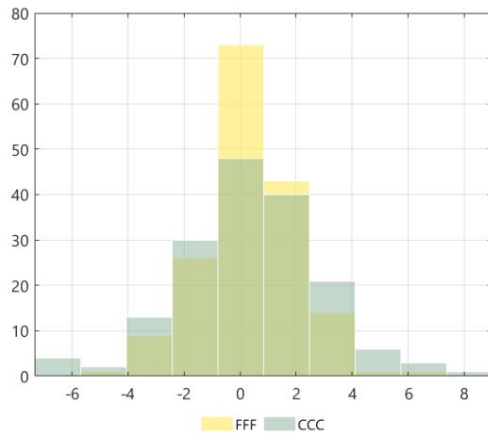
(b) 탄소 반환



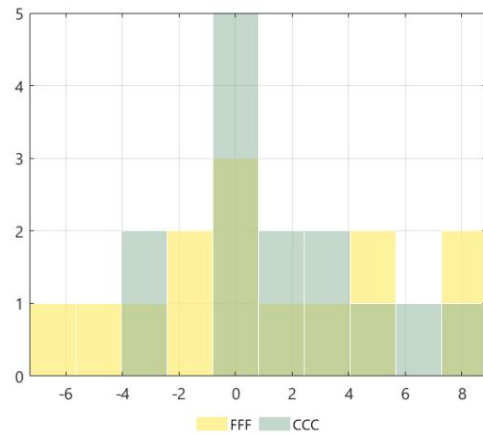
참고: 왼쪽 패널은 (F,F,F) 및 (C,C,C) 최적화 포트폴리오의 표본 외 누적 재무 수익률을 나타내고, 오른쪽 패널은 동일한 포트폴리오의 표본 외 누적 탄소 수익률을 나타냅니다. 노란색 선은 (F,F,F) 최적화 포트폴리오를, 녹색 선은 (C,C,C) 최적화 포트폴리오를 나타냅니다.

그림 8: 표본 외 최적화 포트폴리오의 수익률 분포 히스토그램

(가) 재정적 수익

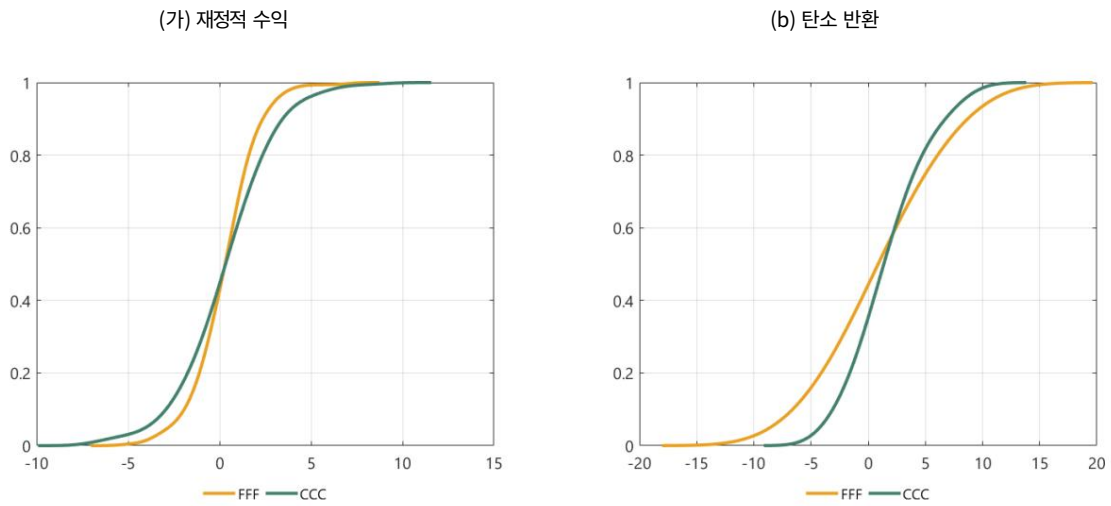


(b) 탄소 반환



참고: 왼쪽 패널은 (F,F,F) 및 (C,C,C) 최적화 포트폴리오의 재무 수익률에 대한 표본 외 히스토그램을 보여주고, 오른쪽 패널은 동일한 포트폴리오의 탄소 수익률에 대한 표본 외 히스토그램을 보여줍니다. 노란색 막대는 (F,F,F) 최적화 포트폴리오를 나타내고, 녹색 막대는 (C,C,C) 최적화 포트폴리오를 나타냅니다.

그림 9: 표본 외 최적화 포트폴리오의 누적 수익률 분포 함수



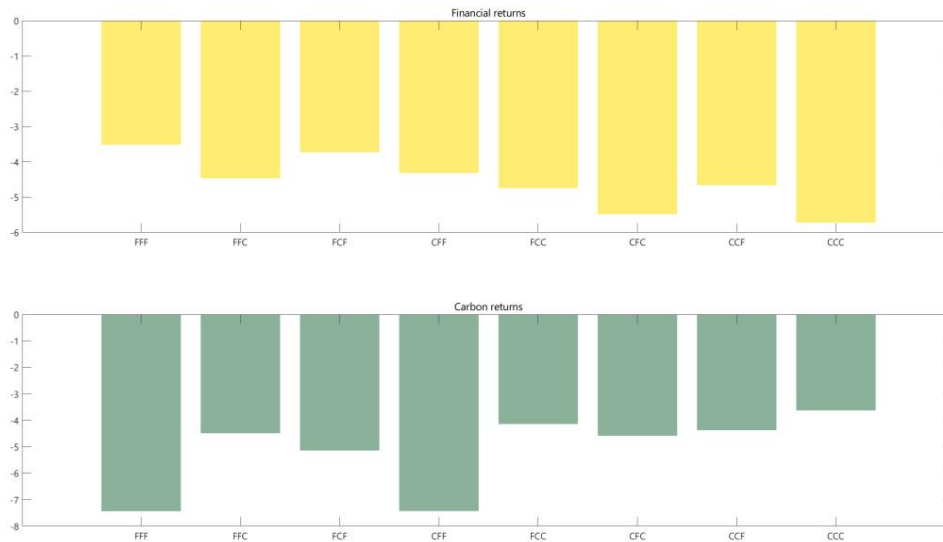
참고: 왼쪽 패널은 표본 외 누적 재무 수익률 분포를 보여줍니다. (F,F,F) 및 (C,C,C) 최적화 포트폴리오를 나타낸 그림이며, 오른쪽 패널은 동일한 포트폴리오에 대한 표본 외 누적 탄소 수익률 분포를 보여줍니다. 노란색 선은 (F,F,F) 최적화 포트폴리오를 나타내며, 녹색 선은 (C,C,C)로 최적화된 포트폴리오를 나타냅니다.

표 4: 표본 외 최적화 포트폴리오의 수익률 요약 통계

	재정적 수익		탄소 반환	
	(F,F,F)	(C,C,C)	(F,F,F)	(C,C,C)
평균 수익률 변동성	0.2%	0.3%	0.9%	1.6%
95%	1.7%	2.5%	4.6%	3.2%
VaR(Value-at-Risk) 97.5%	-2.6%	-3.8%	-7.2%	-3.6%
VaR(Value-at-Risk) 99%	-3.5%	-5.7%	-7.4%	-3.6%
VaR(Value-at-Risk) 음의 수	-3.9%	-6.9%	-7.4%	-3.6%
익률 발생 확률	42.9%	44.6%	50.0%	35.7%

참고: 이 표는 (F,F,F) 및 (C,C,C)의 재정적 수익과 탄소 배출량에 대한 요약 통계를 나타냅니다. 표본 내 최적화를 기반으로 최적화된 포트폴리오.

그림 10: 다양한 표본 외 최적화 포트폴리오에 대한 97.5% VaR(Value-at-Risk, %)



참고: 이 수치는 표본 외 최적화 포트폴리오의 97.5% VaR(Value-at-Risk) 값을 나타냅니다. 최적화 방법은 표 2에 정의되어 있습니다. 상단 패널은 재무 수익률, VaR(Value-at-Risk)을 보여줍니다. 하단 패널에는 탄소 수익률 위험가치(Value-at-Risk)가 표시됩니다.

## 5. 결론

본 논문은 국제 포트폴리오의 탈탄소화를 위한 실용적인 프레임워크를 제시합니다.

탄소 환급이라는 개념을 통해 재정적 목표와 환경적 목표를 통합합니다. 탄소 환급을 국가의 탄소 발자국 변화로 정의함으로써, 우리는 다음과 같은 방향으로 나아갑니다.

국가의 탄소 발자국을 결정론적 투입 요소로 취급하는 탄소 예산 접근법을 넘어서

(최근의 역사적 관찰에 기반하든 단일 시나리오 경로에 기반하든 상관없이). 대신에,

우리는 전환 결과를 확률 변수로 취급하는데, 이는 전환 위험이 불확실하고, 상태에 따라 달라지며(따라서 경로에 대한 논의가 있다), 잠재적으로 변동성이 크다는 개념과 일관됩니다.

꼬리 이벤트가 특징입니다.

방법론적으로, 우리는 계층적 위험 균형 접근법을 국제 포트폴리오에 적용하고, 예상 손실을 위험 지표로 사용하여 극단적 위험 관리에 중점을 둡니다.

이 프레임워크는 클러스터링과 위험 기반 배분을 3단계로 결합하고 각 단계에서 재무 또는 탄소 수익률 입력값을 수용하여 실행 가능한 8가지 포트폴리오 변형을 생성합니다. 탄소 수익률에 대한 제한적인 과거 정보 문제를 해결하기 위해,

우리는 코플라 기반 시뮬레이션을 사용하여 반환 공간을 풍부하게 하고 순위 기반 의존성에 의존합니다.

클러스터링에서 밀도 측정은 비선형 의존성 구조를 더 잘 포착합니다. 이는 특히 세계 상황이 불리할 때 동조 현상이 강화될 수 있는 전환 위험과 관련하여 중요합니다.

선진국 국채를 이용한 실증 분석을 통해, 본 연구에서 제시하는 프레임워크가 표본 내외에서 의도한 위험 감소 효과를 제공함을 보여줍니다. 재무적 수익에 더 큰 비중을 둔 포트폴리오는 재무 부문에서 하방 위험을 줄이는 반면, 탄소 수익에 더 큰 비중을 둔 포트폴리오는 탄소 부문에서 하방 위험을 줄입니다. 더 나아가, "재무(F)" 요소가 많은 포트폴리오는 재무적 하방 위험을 낮추는 경향이 있고, "탄소(C)" 요소가 많은 포트폴리오는 탄소 하방 위험을 낮추는 경향이 있습니다. 이러한 결과는 본 프레임워크가 투자자가 선택한 하방 위험 개념(재무적, 환경적, 또는 이 둘의 조합)에 맞춰 견고하고 분산된 국채 포트폴리오를 설계하는데 활용될 수 있음을 입증합니다.

안전성, 유동성 및 수익률에 대한 강력한 제약 조건을 가진 중앙은행 준비금 관리자 및 기타 투자자에게 이 프레임워크는 평균-분산 코너 솔루션이나 복잡한 벤치마크 엔지니어링(예: 추적 오차 기반 최적화 방법 사용)에 직면하지 않고도 기후 목표를 내재화할 수 있는 실용적인 방법을 제공합니다. 이러한 유형의 투자자에게는 다음과 같은 세 가지 이점이 있습니다. (i) HRP 구조는 분산된 자산 배분을 지원하고 불확실성이 큰 추정치에 대한 민감도를 줄입니다. (ii) 기대 손실 목표는 매우 부정적인 전환 결과에 대한 관심을 집중시킵니다. (iii) 8가지 구성은 다양한 운용 지침을 포트폴리오에 반영할 수 있는 선택지를 제공합니다.

본 연구 결과는 두 가지 실질적인 우선순위를 제시합니다. 첫째, 기후 목표에 부합하는 포트폴리오 방법론과 벤치마크 프레임워크는 (a) 확정적 정렬 제약 조건과 (b) 전환 불확실성에 대한 분포적이고 위험 기반의 접근 방식을 명확하게 구분함으로써 강화될 수 있습니다. 둘째, 탄소 수익률 프레임워크는 불완전한 측정과 실행 가능한 포트폴리오 구성 사이의 가교 역할을 합니다. 탄소 발자국에 대한 논쟁은 종종 생산 대 소비 회계, 토지 이용 조정, 분모 선택(GDP, 인구)과 같은 수준에 따라 좌우됩니다. 이러한 선택은 국가별 수준 순위를 크게 바꿀 수 있으며, 포트폴리오 결과가 방법론적 관례에 민감하게 반응하게 만듭니다. 탄소 수익률 프레임워크는 수준에서 변화(즉, 탈탄소화율 및 그 분포)로 초점을 전환함으로써, 결과가 단일 회계 관례에 의해 좌우되는 정도를 줄이고, 대신 경제적으로 직관적인 목표, 즉 국가들이 시간이 지남에 따라 배출량을 얼마나 안정적으로 줄이고 있는지에 초점을 맞추도록 합니다.

향후 연구를 위한 몇 가지 방향이 남아 있습니다. 첫째, 분석 대상을 더 광범위한 국가, 만기, 통화 및 자산 유형으로 확장하면 결과를 일반화하는 데 도움이 될 것입니다.

첫째, 본 연구의 분석 틀은 선진국 국채에 적용되었지만, 다른 자산군(예: 회사채)이나 다른 지역(예: 신흥 시장)에도 쉽게 확장될 수 있습니다. 둘째, 시나리오 분석과 수익률 분포를 결합하여 탄소 배출량과 금융 수익률 모두에 대한 미래 예측 정보를 보다 체계적으로 통합하면 각 포트폴리오 대안의 유용성을 높일 수 있습니다. 셋째, 유동성 및 거래 비용과 같은 포트폴리오 차원을 통합하면 이러한 방법론의 실용성을 향상시킬 수 있습니다. 마지막으로, 포트폴리오 구성과 정책 변화 간의 상호작용을 연구하면 투자자의 선호도와 자산 배분 선택이 어떻게 신뢰할 수 있는 탈탄소화 경로를 지원할 수 있는지에 대한 통찰력을 얻을 수 있습니다.

전반적으로, 투자자들은 재무적 측면이나 탄소 배출량 감축 측면에서 하방 위험을 크게 줄이면서도 견고한 성과를 유지하는 다각화된 국채 포트폴리오를 구성할 수 있다는 증거가 있습니다. 배출량 감축 결과의 불확실성을 수용하고 전환 위험을 분포의 꼬리 부분에 민감한 대상으로 취급함으로써, 본 연구의 프레임워크는 국채 투자 탈탄소화를 위한 실현 가능하고 투명하며 적응력 있는 경로를 제시합니다.

멘트.

## 총수

### 다양한 유형의 탄소 배출

국가의 탄소 배출량을 측정하는 방법은 다양하며, 각 방법은 고유한 접근 방식과 초점을 가지고 있습니다. NGFS(2024)는 배출량을 세 가지 유형으로 분류합니다.

배출량 할당량.

가장 일반적으로 적용되는 배분 방식은 생산 기반 탄소 배출량입니다. 이는 한 국가 영토 내에서 생산되는 모든 재화와 서비스에서 발생하는 탄소 배출량을 측정합니다.

해당 재화와 서비스는 국내에서 소비되거나 수출을 통해 해외로 수출될 수 있습니다. 이 지표는 유엔기후변화협약(UNFCCC)에 부합하고 교토의정서에서 권장하는 사항이지만, 탄소 배출량이 많은 산업을 이전한 선진국에 유리하게 작용합니다.

생산 관련 배출량은 토지 이용 변화로 인한 배출량을 포함하는 경우와 제외하는 경우, 두 가지 유형으로 보고됩니다. 토지 이용 변화를 포함한 생산 기반 배출량은 기존 생산 기반 배출량을 조정된 것입니다. 이 조정은 삼림 벌채, 재조림, 조림, 농업 방식 변경 등 토지 이용 방식을 바꾸는 활동이 탄소 배출량에 미치는 영향을 반영합니다. 이러한 활동은 토지에서 배출되거나 흡수되는 이산화탄소 및 기타 온실가스의 양에 상당한 영향을 미칠 수 있습니다. 토지 이용과 관련된 이러한 배출 및 흡수량을 고려하면 한 국가의 국경 내 활동으로 인한 총 배출량을 종합적으로 파악하는 데 도움이 됩니다. 이러한 배출량이 국가 전체 배출량에서 차지하는 비중은 크지 않은 경우가 많지만, 특정 국가에서는 무시할 수 없는 수준일 수 있습니다. 예를 들어 캐나다와 핀란드는 넓은 삼림 지대를 보유하고 있어 탄소 흡수원 역할을 합니다. 그러나 토지 이용 변화는 이러한 역할을 상쇄할 수 있습니다. 탄소 회계 재무 파트너십(PCFA) 기준에 따르면, 데이터 제공업체와 기후 전문가들은 토지 이용과 관련된 배출량을 수집하는 방법에 대해 의견 차이를 보입니다.

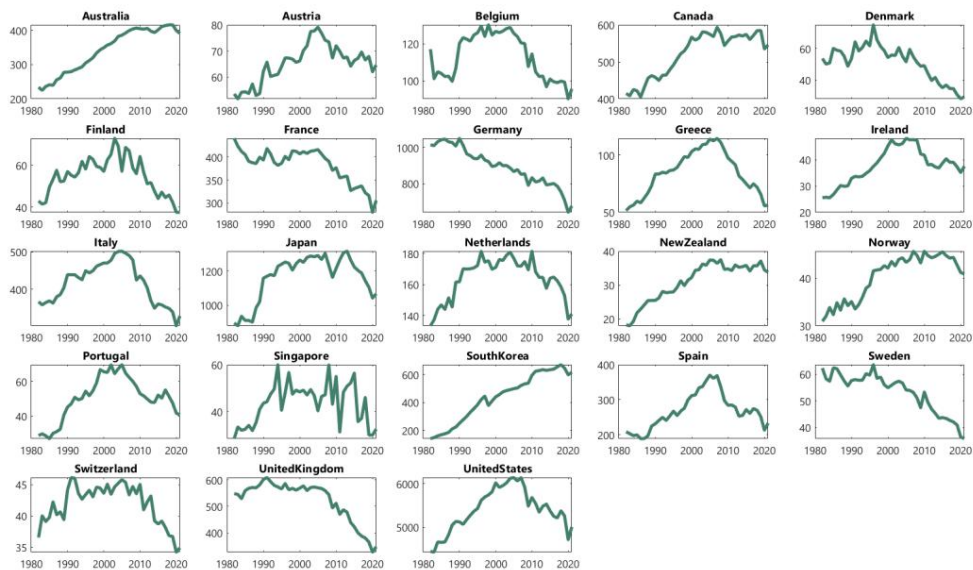
다른 할당 유형은 소비 기반 탄소 배출량입니다. 이는 한 국가의 영토 내에서 소비되는 모든 재화와 서비스에서 발생하는 탄소 배출량을 나타냅니다. 여기에는 국내에서 생산된 재화와 서비스 및 수입품에서 발생하는 배출량이 모두 포함됩니다. 이 데이터는 무역을 고려하여 조정된 생산 기반 배출량을 조정하여 계산됩니다. 즉, 소비 기반 배출량은 생산 기반 배출량에서 수출에 내재된 배출량을 빼고 수입에 내재된 배출량을 더한 값입니다. 소비 기반 배출량 데이터는 생산 기반 배출량 데이터보다 범위가 좁은 경향이 있습니다. 이를 기록하는 국가는 소수에 불과하며, 데이터 제공자들이 추정하는 경우가 많습니다. 고품질 데이터의 부족이 문 제점으로 작용합니다.

무역 데이터.

세 번째 할당 유형은 정부 배출량입니다. 이는 정부 활동에서 발생하는 배출량으로, 국가 정부의 직접적인 통제를 받습니다. 이 유형의 배출량은 PCFA에서 발행자 수준의 탄소 배출량을 측정하기 위해 권장하는 지표에 포함되지 않으므로 본 분석에서는 제외했습니다.

## B. 추가 수치 및 표

그림 11: 생산 기반 탄소 배출량(백만 톤)



참고: 이 차트는 1982년부터 2021년까지 국가별 생산 기반 탄소 배출량(백만 톤)을 보여줍니다.

표 5: 다양한 유형의 탄소 배출에 따른 탄소 환급량 비교

국가	생산 vs 생산, 토지 생산 vs 비용	생산 vs 비용, 토지 vs 비용	생산 vs 비용, 토지 vs 비용
호주	0.06	0.80	0.06
오스트리아	0.90	0.70	0.62
벨기에	0.97	0.17	0.19
캐나다	0.30	0.27	0.72
덴마크	0.80	0.24	0.37
핀란드	0.61	0.78	0.40
프랑스	0.87	0.98	0.87
독일	0.84	0.90	0.80
그리스	0.41	0.65	0.66
아일랜드	0.32	0.70	0.85
이탈리아	0.63	0.80	0.91
일본	0.96	0.78	0.50
네덜란드	0.85	0.85	0.85
뉴질랜드	0.02	0.53	0.04
노르웨이	0.60	0.60	0.84
포르투갈	0.45	0.40	0.39
싱가포르	0.97	0.94	0.94
한국	1.00	0.80	0.78
스페인	0.61	0.79	0.91
스웨덴	0.54	0.61	1.00
스위스	0.80	0.88	0.85
영국	0.97	0.58	0.60
미국	0.89	0.62	0.49

참고: 이 표는 서로 다른 유형의 탄소 배출을 기준으로 계산된 탄소 회수율을 비교하는 Mann-Whitney U 검정(Mann and Whitney(1947))의 p값을 나타냅니다. p값이 0.05 미만이면 통계적으로 유의하지 않습니다.

빨간색으로 강조 표시됨. Prod: 생산 기반 배출량; Prod, land: 생산 기반 배출량(포함)

단점: 토지 이용 변화; 소비 기반 배출량.

표 6: 서로 다른 데이터 출처에서 얻은 생산 기반 탄소 배출량 비교

국가	GCP vs UN	GCP vs OECD	GCP vs S&P
호주	0.77	0.88	0.09
오스트리아	0.98	0.96	0.86
벨기에	0.99	0.99	0.23
캐나다	0.85	1.00	0.09
덴마크	0.95	0.98	0.77
핀란드	0.99	0.99	0.76
프랑스	0.85	0.90	0.62
독일	0.90	0.94	0.76
그리스	0.83	0.93	0.33
아일랜드	0.79	0.81	0.13
이탈리아	0.76	0.94	0.31
일본	0.93	0.94	0.42
네덜란드	0.96	0.95	0.45
뉴질랜드	0.81	0.98	0.20
노르웨이	0.89	0.99	0.25
포르투갈	0.97	0.98	0.86
싱가포르			
한국		0.96	0.16
스페인	0.70	0.90	0.16
스웨덴	0.86	0.86	0.46
스위스	0.87	0.77	0.54
영국	1.00	0.84	0.29
미국	0.88	1.00	0.14

참고: 이 표는 Mann-Whitney U 검정(Mann and Whitney(1947))에서 얻은 p값을 비교한 결과를 나타냅니다. 서로 다른 탄소 배출량 데이터 소스를 기반으로 계산된 생산 기반 탄소 수익률. P값 0.05 미만의 값은 빨간색으로 표시됩니다. 빈 칸은 관측치 수가 부족함을 나타냅니다.

## C. 재무 수익률 관련 데이터

금융 수익률 데이터의 경우, 먼저 블룸버그에서 월별 국채 수익률 데이터를 수집합니다. 가격 데이터는 2001년부터 시작하며, 표본에는 23개 선진국을 포함하여 균형 잡힌 패널 데이터를 확보합니다. 그런 다음 표준 부트스트래핑 절차를 적용하여 관측 데이터로부터 무이자 채권 수익률 곡선을 구축합니다. 이 방법은 증권의 쿠폰 효과를 제거하여 수익률 계산을 단순화합니다. 이 절차는 표본에 포함된 모든 국가에 체계적으로 적용됩니다.

분석의 용이성을 위해 각 국가를 수익률 곡선 상의 단일 증권으로 나타냅니다. 5년 만기 채권을 선택한 이유는 많은 국가 채권 수익률 곡선에서 유동성이 높은 벤치마크로 널리 인식되기 때문입니다. 5년 만기 고정금리 채권의 월별 수익률을 계산하기 위해 각 국가의 5년 및 4년 11개월(약 4.92년) 무이자 채권 가격을 매월 산출합니다. 국가  $i$ 의 5년 만기 채권 수익률은 다음과 같습니다.

$$t \text{는 다음과 같이 계산됩니다: } R_{t,i}^{5\text{년}} = \frac{P_{t,i}^{4.92\text{년}}}{P_{t,i}^{5\text{년}}} - 1, \text{ 여기서 } P \text{는 } 5 \text{의 가격을 나타냅니다.}$$

(4.92)년 만기 제로쿠폰 채권이  $t$ 월에 지배적입니다. 이 접근 방식을 통해 각 국가의 기본 수익률 곡선의 변화를 포착하는 월별 수익률 시계열을 생성할 수 있습니다.

본 분석은 글로벌 투자자의 관점에서 수행되므로 모든 현지 통화 수익률은 단일 기준 통화로 환산됩니다. 글로벌 국채 지수 분석의 표준 관행에 따라 미국 달러(USD)를 기준 통화로 채택했습니다. 이를 위해 블룸버그에서 표본에 포함된 각 통화의 월별 환율 데이터를 수집했습니다. 그런 다음 현지 통화 채권 수익률에 환율 조정을 적용하여 통화 손익을 반영합니다. 이러한 조정은 글로벌 분산 투자(및 헤지하지 않은) 투자자가 경험할 수 있는 잠재적 손익을 보다 정확하게 나타냅니다.

표 7은 2001년 9월부터 2023년 5월까지 23개국의 무이자, 5년 만기, 고정 만기 국채에 대한 월별 수익률(미국 달러 기준)의 수익률 및 위험 특성을 요약한 것입니다.

표 7: 국가별 월별 재무 수익률 요약 통계

국가	평균 수익률	휘발성	위험가치 (97.5%)	예상되는 부족 (97.5%)
호주	0.51%	3.40%	-7.60%	-8.91%
오스트리아	0.35%	2.86%	-6.00%	-7.12%
벨기에	0.37%	2.91%	-5.91%	-7.38%
캐나다	0.37%	2.54%	-5.13%	-6.39%
덴마크	0.34%	2.88%	-5.51%	-7.19%
핀란드	0.35%	2.81%	-5.51%	-6.89%
프랑스	0.35%	2.84%	-5.84%	-6.93%
독일	0.33%	2.81%	-5.60%	-6.78%
그리스	1.29%	14.93%	-20.97%	-27.49%
아일랜드	0.46%	3.76%	-6.94%	-11.03%
이탈리아	0.46%	3.45%	-8.90%	-9.56%
일본	0.06%	2.79%	-5.85%	-6.90%
네덜란드	0.34%	2.82%	-5.76%	-6.92%
뉴질랜드	0.60%	3.67%	-8.23%	-10.03%
노르웨이	0.29%	3.38%	-6.30%	-7.50%
포르투갈	0.56%	4.55%	-9.03%	-13.04%
싱가포르	0.35%	2.01%	-4.24%	-5.19%
대한민국	0.42%	3.65%	-8.07%	-9.50%
스페인	0.43%	3.37%	-6.79%	-9.60%
스웨덴	0.29%	3.21%	-6.00%	-6.93%
스위스	0.43%	3.02%	-5.29%	-6.70%
영국	0.24%	2.67%	-5.85%	-7.87%
미국	0.30%	1.34%	-2.74%	-3.23%

참고: 이 표는 무이자 채권 수익률 곡선을 사용하여 계산한 금융 수익률 통계를 요약한 것입니다.  
2001년 9월부터 2023년 5월까지의 데이터입니다.

## 참고 자료

파올로 안젤리니, "포트폴리오 탈탄소화 전략: 질문 및 제안"

이탈리아 은행 임시 보고서, 2024, (840).

Carstens, Agustín, "현재의 경제 및 금융 환경에서 외환보유액 관리 목표의 균형 유지", 2024년 4월 사우디아라비아 리야드에서 개최된 지역 고위급 외환보유액 관리 회의 연설.

Cheng, Gong, Eric Jondeau 및 Benoît Mojon, "탄소 발자국이 감소하는 국제 포트폴리오 구축", BIS Working Papers No 1038, 2022.

Cherubini, Umberto, Elisa Luciano, Walter Vecchiato, Copula 방법  
금융, 와일리, 2004.

Crippa, Monica, Diego Guizzardi, Federico Pagani, Manjola Banja, Marilena Muntean, Edwin Schaaf, Wolfgang Becker, Fabio Monforti-Ferrario, Roberta Quadrelli, A Risquez Martin 외, "모든 세계 국가의 GHG 배출", 유럽 연합 간행물 사무소, 룩셈부르크, 2023, 10, 953322.

de Bandt, Olivier, Laura-Chloé Kuntz, Nora Pankratz, Fulvio Pegoraro, Haakon Solheim, Gregory Sutton, Azusa Takeyama 및 Fan Dora Xia, "기후 변화 관련 위험이 은행에 미치는 영향: 문헌 검토", Journal of Economic Surveys, 2025, 39(4), 1553–1594.

Embrechts, Paul, Alexander J. McNeil, Daniel Straumann, "모델링 드-  
"코폴라와 위험 관리에 대한 응용" (Svetlozar T. Rachev 편집, 금융 분야의 두꺼운 꼬리 분포 핸드북, Elsevier, 2001, pp. 329–384).

Fender, Ingo, Mike McMorrow, 및 Omar Zulaica, "중앙은행 외환보유고의 지속가능한 관리", INSPIRE 지속가능한 중앙은행 도구 상자, 정책 브리핑 문서 06, 그랜섬 기후변화환경연구소, 2022.

—, —, Vahe Sahakyan 및 Omar Zulaica, "보유고 관리 및 지속가능성: 녹색 채권의 필요성", BIS 워킹 페이퍼 No. 849, 2020.

Guedal, Théo Le 및 Thierry Roncalli, "기후 위험을 고려한 포트폴리오 구성"  
측정 방법," SSRN 3999971에서 이용 가능, 2022.

HSBC, "HSBC 외환보유액 관리 동향: 글로벌 불안정이 중앙은행의 자원을 시험하고 있다", HSBC 시장 및 규제 인사이트, 2025.

L´opez de Prado, Marcos, "시장 수익률을 증가하는 다각화된 포트폴리오 구축" 샘플," 포트폴리오 관리 저널, 2016.

— , 금융 머신러닝의 발전, John Wiley & Sons, 2018.

Mann, Henry B 및 Donald R Whitney, "두 확률 변수 중 하나가 다른 하나보다 확률적으로 더 큰지 여부에 대한 테스트에 관하여", 수학 통계학 연보, 1947년, 50~60쪽.

Markowitz, Harry, "포트폴리오 선택", The Journal of Finance, 1952, 7(1), 77-91.

McNeil, Alexander J., Rüdiger Frey, and Paul Embrechts, Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques and Tools, revised edition ed., Princeton University Press, 2015.

NGFS, "중앙은행 및 감독기관을 위한 NGFS 기후 시나리오", NGFS 웹사이트에서 이용 가능, 2022.

— , "국가 투자에 있어서 기후 관련 위험과 영향: 데이터, 지표 및 영향-" "중앙은행의 구현 문제", 금융 시스템 녹색화 네트워크 기술 문서, 2024.

Patton, Andrew J., "경제 시계열을 위한 코플라 모델 검토", 다변량 분석 저널, 2012, 110, 4-18.

Pedersen, Lasse Heje, Shaun Fitzgibbons 및 Lukasz Pomorski, "책임 투자: ESG 효율적 경계", 금융경제학 저널, 2021, 142(2), 572-597.

Penninga, Olaf 및 Casper Zomerdijk, "위험에 주의하세요 - 정부 채권 포트폴리오의 스마트 탈탄소화", Rebeco Quant Chart, 2024.

Scatigna, Michela, Fan Dora Xia, Anna Zabai 및 Omar Zulaica, "ESG 시장의 성과와 과제", BIS 분기별 보고서, 2021년 12월.

Schwaiger, Katharina, Riyadh Ali 및 Andrew Ang, "넷제로 국채 포트폴리오", 공공 투자 관리의 진화하는 관행, 2023, 167~184쪽.

Swinkels, Laurens, Jan Anton van Zanten, Bruno Rein 및 Rikkert Scholten, "지속 가능한 개발 목표 자금 조달: 정부 채권 투자자의 역할 탐구", *Financial Analysts Journal*, 2025, pp. 1-15.

세계은행, "2025년 외환보유액 관리 설문조사 보고서: 공공자산에 대한 통찰"  
경영 관리 - 제5판, 세계은행 그룹, 2025.

샤, 도라, 오마르 즐라이카, "탄소 프리미엄의 기간 구조", 학술대회 논문집  
제8회 공공투자자 컨퍼런스, 2022년.