Korean Chem. Eng. Res., 64(1), 105144 (2026)
https://doi.org/10.9713/kcer.2026.64.1.105144
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

공정산업의 탄소상쇄 최적화 모델을 이용한 EU-ETS 및 K-ETS의 예상효과 비교

최수형†

전북대학교 화학공학부, 청정에너지연구센터
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
(2025년 8월 15일 접수, 2025년 10월 22일 수정본 접수, 2025년 11월 10일 채택)

A Comparison of Predicted Effects of EU-ETS and K-ETS Using an Optimization Model for Process Industry's Carbon Offsetting

Soo Hyoung Choi†

Division of Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University
567 Baekje-Daero, Deokjin-Gu, Jeonju, 54896, Korea
(Received 15 August 2025; Received in revised from 22 October 2025; Accepted 10 November 2025)

요 약

공정산업의 탄소상쇄 최적화를 위한 수학적 프로그램을 제안하고, 이를 이용하여 EU-ETS와 K-ETS의 탄소감축 실효성을 예측해보았다. 사례연구에서 EU-ETS는 높은 배출권 가격으로 인해 감축효과 면에서 우수한 성능을 보였지만 배출권의 상당한 축적이 수반되었다. 배출권은 잠재적 배출이므로 이는 EU-ETS가 불안한 탄소중립으로 가고 있음을 뜻한다. K-ETS는 배출권 가격이 현재 추세대로만 오른다고 가정하면 감축효과를 보여주지 못했다. 그러나 K-ETS가 공표된 정책 시나리오대로 운영된다면 2030년에는 배출권 가격과 감축효과 둘 다 EU-ETS의 절반에 근접할 것으로 예상되었다. 따라서 미래의 K-ETS는 배출권의 가격과 보유고를 적절히 관리하면서 적당한 감축효과를 낼 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구 결과는 ETS의 실효성은 감축단가 대비 배출권 가격에 달려있으며, 따라서 이를 경제적으로 향상시키려면 감축단가를 낮추는 정부정책이 필요함을 시사한다. 제안된 최적화 모델은 기업의 순배출 제로 달성을 위한 최적계획 수립에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – A mathematical program is proposed for optimization of process industry's carbon offsetting, and applied to prediction of carbon reduction effectiveness of EU-ETS and K-ETS. Case study indicates that EU-ETS shows high performance in reduction effect owing to high carbon prices, but entails significant accumulation of allowances. As allowances are potential emissions, this means that EU-ETS is moving toward insecure carbon neutrality. K-ETS fails to show a reduction effect, if the carbon price is assumed to increase just according to the current trend. However, if K-ETS is operated according to the stated policies scenario, its 2030 status is predicted to get close to half of EU-ETS in terms of both carbon price and reduction effect. Therefore, the future K-ETS is expected to be able to show a moderate reduction effect, appropriately managing the carbon price and allowance holdings. The result of this study indicates that the effectiveness of ETS depends on the carbon price over the reduction cost, and thus in order to economically improve it, governmental policies are required to lower the reduction cost. The proposed optimization model is expected to be also applicable to optimal planning of a company's approach to net zero emissions.

Key words: Carbon offset, Carbon price, Emissions trading system, EU-ETS, K-ETS

1. 서 론

국제연합(United Nations, UN)의 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에 의하면, 지구 온난화를 산업혁명 이전보다 1.5 ℃ 상승으로 제한한다는 2015년 파리협정(Paris Agreement)의 목표를 달성하기 위해서는, 탄소 배출이 2025년에는 최고점에 달하고 이후 감소해서 2050년에는

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: soochoi@jbnu.ac.kr
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

순배출 제로(net zero)가 되어야 한다[1]. 그러나 이 시나리오는 이제 IPCC 입안자들조차 대체로 회의적이다[2]. 최고점 도달 기미는 보이지 않고[3], 미국은 파리협정을 다시 탈퇴했다[4].

공정산업의 탄소중립(carbon neutrality)은 대부분의 경우 탄소감축(carbon reduction)과 함께 배출권 거래제(emissions trading system, ETS)를 이용한 탄소상쇄(carbon offset)를 필요로 한다. 이 제도는 주로 정부가 주도하는 의무 탄소시장(compliance carbon market)에서 운영되지만, 민간이 주도하는 자발적 탄소시장(voluntary carbon market)도 발전하고 있다[3]. 일반적으로 배출권(allowance)이란 의무시장의 탄소 크레딧(carbon credit)을 뜻하며, 자발적 시장의 탄소 크레딧은 상쇄권(offset credit)이라고 부른다[5].

현재 자발적 시장의 상쇄권은 EU-ETS에서는 인정되지 않고, K-ETS에서는 배출량의 5% 한도 내에서만 사용 가능하다[5]. 한편, EU-ETS에서는 구입한 배출권의 비축이 가능하지만, K-ETS에서는 자력으로 얻은 배출권의 일부만 비축 가능하다. 현재 K-ETS의 배출권 뱅킹(banking)을 위한 차기이월(carryover) 한도는 연간 순매도량(net sales)의 5배이다[6]. 배출권의 차용(borrowing)은 EU-ETS에서는 허용되지 않고, K-ETS에서는 2025년 상환조건으로 의무 감축량의 15%까지 가능했다[5].

배출권 거래제의 탄소감축 효과는 일반적으로 탄소시장의 배출권 가격에 달려있는 것으로 추정된다. 2025년 현재 EU-ETS 및 K-ETS의 배출권 가격은 각각 \$75/tCO$_2$ 및 \$6/tCO$_2$ 수준이다[7]. 2030년 예상 가격은 공표된 정책 시나리오(stated policies scenario, STEPS)에 따르면 각각 \$140/tCO$_2$ 및 \$56/tCO$_2$이다[8]. 국제 자발적 탄소시장의 평균 가격은 현재 \$6/tCO$_2$ 정도이며[9], 신뢰성 향상을 가정한 고품질 시나리오(high quality scenario)에 따르면 2030년에는 \$20/tCO$_2$가 될 것으로 예상된다[10].

공정산업의 탄소감축은 주로 탄소포집 활용 및 저장(carbon capture, utilization and storage, CCUS)을 통해 이루어진다. 이때 포집비용은 대상 CO_2 농도가 높을 경우 \$15–25/tCO$_2$, 낮을 경우 \$40–120/tCO$_2$이며, 육상 파이프라인 수송비는 \$2–14/tCO$_2$, 육상 저장비용은 대개 \$10/tCO$_2$ 미만이다[11]. 한편, 공기중 CO_2의 직접 포집(direct air capture, DAC)에 의한 탄소제거 및 저장 비용은 2023년에는 \$600–1,000/tCO$_2$이었으나, 2030년까지 \$250–300/tCO$_2$로 낮아질 것이라는 전망도 있다[12]. 위 비용들은 국가에서 정책적으로 줄여 주기도 한다[13].

현재 K-ETS의 탄소가격은 위에서 언급한 바와 같이 국제 자발적 탄소시장의 평균 수준으로, EU-ETS에 비해 매우 낮다. 탄소가격이 낮으면 기업은 감축보다 상쇄를 선호하게 된다. 그러나 상쇄는 타 기업의 감축을 반영하므로 상생이 될 수도 있다. 본 연구에서는 공정산업의 탄소상쇄 최적화 모델을 제안하고, 이를 이용하여 EU-ETS와 K-ETS의 감축효과를 예측해보고자 한다. 단, ETS의 실효성은 예상하기 어려운 정치적, 사회적, 경제적 요인에 의해 크게 영향을 받으므로, 본 예측은 엄밀한 분석 대신 단순한 가정과 추정된 시나리오에 기반을 둔다.

2. 제안된 방법

정부의 배출권 할당 및 의무 탄소시장에서의 거래와 비정부 기구의 인증 및 자발적 탄소시장에서의 거래에 의한 탄소 크레딧 흐름을 실제 탄소 흐름과 함께 도식화하면 Fig. 1과 같다. 여기서 기업은 배출을 하되, 정부의 할당량을 초과하면 그만큼 배출권을 구입해서 상쇄시켜야 한다. 해당 배출권은 타 기업의 초과 감축(reduction) 또는 제거(removal) 실적으로부터 나온다. 따라서 본 모델에서 기업은 탄소 포지티브 산업, 파트너는 탄소 네거티브 산업을 대표한다. 예를 들면 전자는 화학회사, 후자는 조림(afforestation) 사업이다. 전자는 CCUS로 감축, 후자는 제품화 또는 BECCS (bioenergy with carbon capture and storage)로 제거를 지속할 수 있다. 정부는 할당량을 줄임으로써 탄소중립을 추진한다($x^c \to 0$, $q \to s$). 이때 기업의 감축 및 상쇄 활동은 비용을 최소화하는 수학적 계획법으로 모델링할 수 있다.

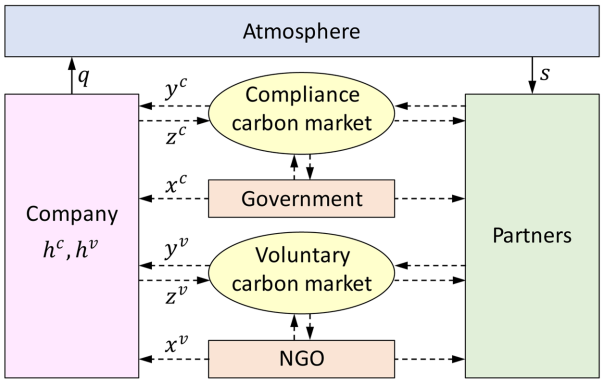

Fig. 1. Carbon (solid) and credit (dashed) flow model.

제안된 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^{n} \gamma_i [r_i q_i + c_i(q_0 - q_i) + p_i^c(y_i^c - z_i^c) + p_i^v(y_i^v - z_i^v)] - \gamma_n(p_n^c h_n^c + p_n^v h_n^v) \tag{1}$$

subject to

$$x_i^c = x_{i-1}^c - \delta_i, x_0^c = q_0 \tag{2}$$
$$h_i^c = h_{i-1}^c + x_i^c + y_i^c - z_i^c - q_i^c, h_0^c = 0 \tag{3}$$
$$h_i^v = h_{i-1}^v + x_i^v + y_i^v - z_i^v - q_i^v, h_0^v = 0 \tag{4}$$
$$q_i = q_i^c + q_i^v \tag{5}$$
$$q_i^v \le \varepsilon_i q_i \tag{6}$$
$$q_{i-1} - q_i \le \alpha_i \tag{7}$$
$$y_i^c - z_i^c \le \beta_i \tag{8}$$
$$h_i^c - h_{i-1}^c \le \lambda_i + \kappa_i \max(z_i^c - y_i^c, 0) \tag{9}$$

여기서 각 변수의 정의는 다음과 같다.

γ_i: discount factor for the i-th year
r_i: carbon tax rate for emissions in the i-th year
q_i: emissions in the i-th year
c_i: average cost of reduction in the i-th year
p_i^c, p_i^v: average price of carbon credits in the i-th year
x_i^c, x_i^v: allowance for the i-th year
y_i^c, y_i^v: carbon credits bought in the i-th year
z_i^c, z_i^v: carbon credits sold in the i-th year
q_i^c, q_i^v: carbon credits consumed in the i-th year
h_i^c, h_i^v: carbon credit balance at the end of the i-th year
δ_i: decrease in allowance for the i-th year
α_i: potential additional reduction in the i-th year
β_i: available allowance in the i-th year

ε_i: allowed voluntary offset fraction for the i-th year

λ_i: base carryover limit for the i-th year

κ_i: additional carryover limit factor for the i-th year

변수 γ_i는 i 번째 해의 미래가치를 현재가치로 환산하기 위한 할인계수로서, 기준 연리를 a라 하면 $\gamma_i = 1/(1+a)^i$이다. 변수 r_i는 탄소세율, q_i는 배출량, c_i는 감축단가, p_i^c 및 p_i^v는 각각 의무 시장 및 자발적 시장의 탄소가격을 나타낸다. 변수 x_i^c 및 x_i^v는 각각 정부 및 비정부 기구로부터 할당받은 배출권, y_i^c 및 y_i^v는 구입량, z_i^c 및 z_i^v는 판매량, h_i^c 및 h_i^v는 잔고를 나타낸다. 변수 r_i, c_i, p_i^c, p_i^v는 초기 감축비용 단가($/tCO_2)로 나누고, 변수 q_i, x_i^c, x_i^v, y_i^c, y_i^v, z_i^c, z_i^v, q_i^c, q_i^v, h_i^c, h_i^v는 초기 연간 배출량(tCO_2)으로 나눔으로써 정규화 (normalization) 할 수 있다. 이렇게 하면 $c_0 = q_0 = 1$이 되며, 모든 변수를 무차원화 할 수 있다.

목적함수 (1)은 주어진 기간 n년 동안 투입할 비용에서 획득가치를 뺀 순비용의 순수 현재가치(net present value, NPV)를 나타낸다. 등식 제약조건 (2)는 정부의 배출권 할당정책, 식 (3) 및 (4)는 기업의 배출권 및 상쇄권 잔고, 식 (5)는 배출권 및 상쇄권의 합계 소요량을 나타낸다. 부등식 제약조건 (6)은 상쇄권 허용량을 나타낸다. 매개변수 값은 현재 EU-ETS에서는 $\varepsilon_i = 0$, K-ETS에서는 $\varepsilon_i = 0.05$이다. 식 (7) 및 (8)은 기업의 추가감축 역량 및 배출권 구매한도를 각각 매개변수 α_i 및 β_i로 나타낸다. 본 연구에서는 정부에서 부과하는 의무 추가 감축량 δ_i는 평균 역량의 기업이 달성 가능하도록 설정된다는 가정 하에 다음 식을 제안한다.

$$\alpha_i \approx \delta_i \tag{10}$$

또한, 배출권 구매한도는 공급물량에 비례하며, 배출권 가격은 수요와 감축단가에 비례하고 공급물량에 반비례해서 결정된다는 가정 하에 다음 식을 제안한다.

$$\beta_i \approx \delta_i c_i / p_i^c \tag{11}$$

식 (9)는 배출권의 차기이월 한도를 나타낸다. 매개변수 값들은 현재 EU-ETS에서는 $\lambda_i = \infty$ 및 $\kappa_i = 0$, K-ETS에서는 $\lambda_i = 0$ 및 $\kappa_i = 5$이다. 따라서 위 문제는 γ_i, r_i, c_i, p_i^c, p_i^v 들이 상수이고 $\kappa_i = 0$이면 linear program, 아니면 nonconvex program이 된다.

본 연구에서는 감축단가와 탄소가격을 가정된 시나리오에 따라 예상되는 값의 상수로 다룬다. 따라서 EU-ETS는 linear program, K-ETS는 nonconvex program이며 최적화 결과의 타당성은 시나리오의 현실성에 의존한다. 제안된 모델은 기업의 감축역량이 정부의 감축요구에 부합한다고 가정하고, 배출권 구매한도를 단순한 가격 모델을 기반으로 추정하였다. 이 또한 실현이 보장되지 않는 시나리오에 해당한다. 따라서 제안된 모델은 특정 시나리오에 기반을 둔다는 한계가 있다. 단, 실제결과 또한 서론에서 언급한 바와 같이 정치적, 사회적, 경제적 요인에 따라 크게 영향을 받으므로, 보다 정밀한 해석을 위해서는 상세 모델링보다는 제안된 방법을 다양한 시나리오에 적용하는 것이 더 효과적일 것으로 예상된다.

3. 사례연구

대한민국 정부는 UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)에 제출한 NDC (nationally determined contribution)의 2021년 업데이트에서 2030년까지 연간 배출량을 2018년 수준의 40%만큼 감축하겠다고 선언했다[14]. 그러나 중요한 도구인 K-ETS는 산업계의 압력을 받으며 소극적으로 운영되고 있다[15]. 따라서 본 연구에서는 사례연구 예제로서, 정부가 원년에는 산업계의 배출량에 맞춰 배출권을 할당하고 이후 5년동안 할당량을 해마다 원년 할당량의 5%만큼씩 줄일 경우, 산업계의 대응을 시뮬레이션 한다.

공정산업의 대표적 감축방법은 CCS (carbon capture and storage)다. 특히 SMR (steam methane reforming)에 의한 수소생산에 적용하면 해당 공정은 탄소중립에 접근하게 된다. 이 경우 포집비용은 $50–80/$tCO_2$이다[11]. 따라서 평균 포집비용은 약 $65/$tCO_2$이라 하고, 서론에서 인용한 수송비와 저장비용을 함께 고려하면, 그레이 수소를 블루 수소로 변화시키는 CCS 평균비용은 약 $80/$tCO_2$로 산정된다. 본 연구에서는 이 값을 감축비용과 탄소가격을 정규화 하는 기준으로 사용한다.

시뮬레이션 대상 ETS로는 EU-ETS, 공표된 K-ETS, 현상유지 K-ETS를 선정했다. 두 K-ETS의 차이는 예상되는 배출권 가격에 있다. 각 ETS의 배출권 가격은 서론에서 인용한 2025년 현재가격부터 2030년 예상가격까지 선형적으로 상승한다고 가정한다. 즉, EU-ETS에서는 $p_0^c = 75$ $/tCO_2 및 $p_5^c = 140$ $/tCO_2, 공표된 K-ETS에서는 $p_0^c = 6$ $/tCO_2 및 $p_5^c = 56$ $/tCO_2, 현상유지 K-ETS에서는 $p_0^c = 6$ $/tCO_2 및 $p_5^c = 20$ $/tCO_2$이다. 자발적 탄소시장의 상쇄권 가격도 같은 방법으로 구한다. 여기서 얻은 배출권 및 상쇄권 가격을 위에서 구한 감축단가로 나누어 정규화 하면, 1차년도와 5차년도 예상가격은 각각 Table 1의 p_1^c, p_5^c 및 p_1^v, p_5^v 값들이 된다. EU-ETS와 K-ETS의 제도적 차이는 Table 1의 매개변수 ε_i, λ_i, κ_i 값들로 나타난다. 또한 본 연구에서는 배출권 거래효과 비교에 집중하기 위해, 기업이 상쇄권 운용으로 얻을 수 있는 이익은 무시한다. 즉, $x_i^v = z_i^v = h_i^v = 0$으로 설정해서 $y_i^v = q_i^v$가 되도록 한다.

제안된 최적화 문제에서 사업기간은 $n = 5$년이며, 할인계수는 연리 5%를 적용하여 $\gamma_i = 1/1.05^i$로 계산한다. 탄소세는 아직 도입되지 않았으므로 $r_i = 0$으로 놓아 제외한다. 감축단가는 기술이 발전하면서 낮아질 것으로 예상되지만 공정산업이 탄소중립에 접근하면서 제거대상 CO_2의 농도가 낮아지면 오를 수도 있다. 따라서 잠정적으로 상수, 즉 $c_i = 1$로 둔다. 이제 목적함수와 제약조건에 Table 1의 데이터와 의무 감축량 $\delta_i = 0.05$를 대입하면 최적화 문제가 완성된다. 풀이도구로는 MATLAB의 fmincon을 이용했다[16].

제안된 방법으로 비교대상 세 가지 ETS를 시뮬레이션 한 결과, 기업의 배출량 및 배출권 보유고의 변화추세는 각각 Fig. 2 및 3과 같이 예측되었다. 최종상태는 Table 2에 요약하였다. 결과를 종합하면 EU-ETS는 감축효과가 높게 나타났지만(Fig. 2의 녹색 점선,

Table 1. Parameter values for case study

	p_1^c	p_5^c	p_1^v	p_5^c	ε_i	λ_i	κ_i
EU-ETS	1.10	1.75	0.11	0.25	0	∞	0
K-ETS stated	0.20	0.70	0.11	0.25	0.05	0	5
K-ETS status quo	0.11	0.25	0.11	0.25	0.05	0	5

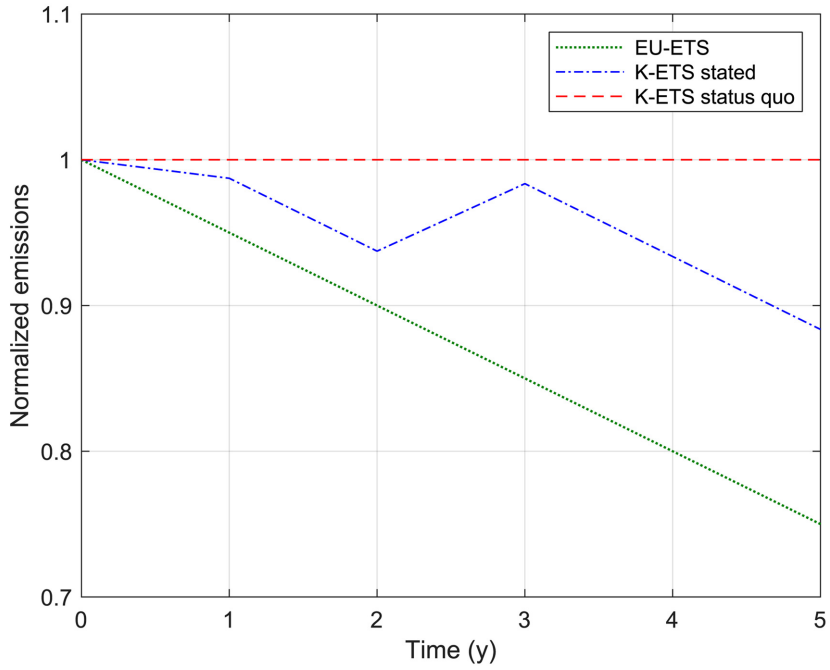

Fig. 2. Predicted emissions for different ETS policies.

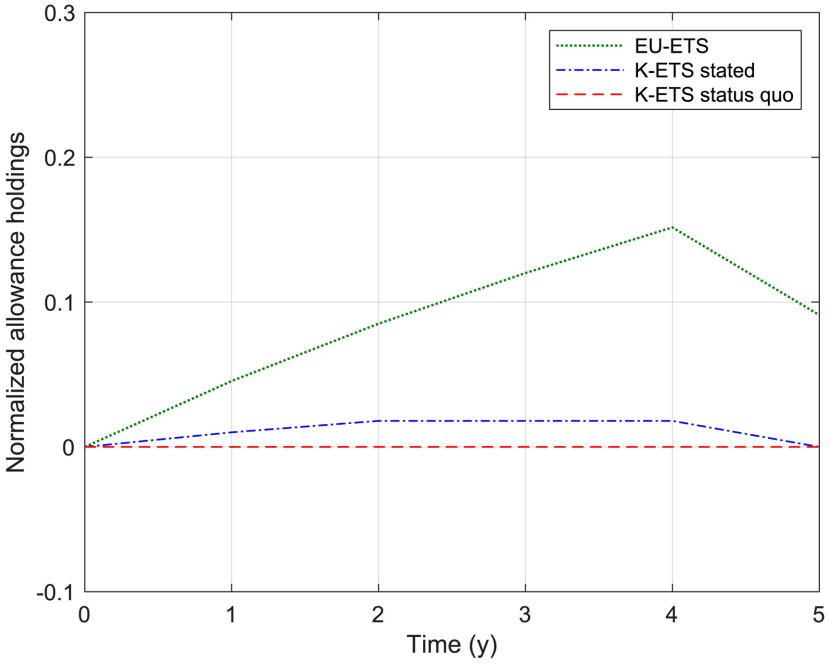

Fig. 3. Predicted allowance holdings for different ETS policies.

100%) 배출권 축적이라는 위험요소도 확인되었다(Fig. 3의 녹색 점선, 최고 q_0의 15.2%). 공표된 K-ETS는 감축효과가 초기에는 진동하다가 배출권 가격이 오르면서 안정되었다(Fig. 2의 청색 쇄선). EU-ETS와 달리 배출권 가격이 기준 감축단가보다 낮았지만(c_0의 20–70%) 최종 감축효과는 의무 감축량의 약 절반(46.5%)이었고, 나머지는 배출권 구입(28.6%), 상쇄권 구입(17.7%), 보유 배출권 사용(7.2%)으로 상쇄되었다. 배출권 보유고는 낮게 운용되었다(Fig. 3의 청색 쇄선, 최고 q_0의 1.8%). 현상유지 K-ETS에서는 감축효과가 나타나지 않았다(Fig. 2의 적색 파선). 이는 만약 K-ETS의 배출권 가격이 국제 자발적 탄소시장과 함께 동일한 수준으로만 오른다면 (c_0의 11–25%) 감축효과는 감축단가가 기준치보다 현저히 낮은 산업에만 국한될 것임을 시사한다. 따라서 공표된 K-ETS는 비교적 낮은 배출권 가격으로 감축효과를 내면서 과도한 배출권 축적을 막을 수 있는 적절한 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

본 사례연구에서는 현재부터 2030년까지 5년 동안의 EU-ETS와 K-ETS의 상황을 예상해보았다. 한편 유럽연합과 한국을 포함한 많은 국가들이 2050년 탄소중립 달성을 선언했으므로 25년 후까지의 시뮬레이션도 요구된다. 이때는 많은 기업이 탄소중립에 접근하면

Table 2. Predicted final states of case study

	Total cost	Holdings	Emissions	Reduction (%)
EU-ETS	0.598	0.091	0.750	100
K-ETS stated	0.377	0	0.884	46.5
K-ETS status quo	0.126	0	1	0

서 발생할 것으로 예상되는 ETS 규정변경과 탄소시장 동향변화를 함께 고려해야 한다. 이 또한 정치적, 사회적, 경제적 요인에 의해 좌우되므로 또다른 시나리오를 필요로 한다. 따라서 본 연구는 단기 예측에 집중하고, 장기 예측은 향후 과제로 제안하고자 한다.

4. 결 론

현재 K-ETS는 배출권의 무상할당과 비축제한 정책으로 인해 배출권 가격이 EU-ETS에 비해 훨씬 낮으며, 이로 인해 감축효과가 없다는 비판을 받고 있다. 그러나 K-ETS가 공표된 정책 시나리오에 따라 운영될 경우, 2030년이 되면 배출권 가격과 함께 감축효과도 EU-ETS의 절반에 근접할 것으로 예상된다. EU-ETS는 감축효과가 우수한 것처럼 보이지만 배경에는 배출권의 높은 보유고가 있다. 배출권은 잠재적 배출이므로 EU-ETS는 불안한 탄소중립으로 가게 된다. 또한 높은 배출권 가격은 산업경제에 악영향을 미친다. 따라서 공표된 K-ETS는 배출권 가격과 보유고를 적절히 관리하면서 감축효과를 내는 합리적인 도구가 될 수 있을 것으로 예상된다. 결론적으로 ETS의 감축효과는 감축단가 대비 배출권 가격으로 결정됨을 알 수 있다. 따라서 ETS의 실효성을 경제적으로 향상시키기 위해서는 배출권 가격상승 유도보다는 감축단가 하락 효과를 내는 정부의 지원정책이 요구된다. 한편, 제안된 탄소상쇄 최적화 모델은 기업별로 주어진 상황에 맞게 매개변수를 조절하면 각 기업의 순배출 제로 달성을 위한 최적계획 수립에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 논문은 대한민국 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호: 2022R1F1A1062901)의 결과로서 전북대학교에서 후속 지원하였습니다.

References

1. UN, "1.5°C: What it Means and Why it Matters," *Climate Action Fast Facts* (2024).
2. Wynes, S., Davis, S. J., Dickau, M., Ly, S., Maibach, E., Rogelj, J., Zickfeld, K. and Damon Matthews, H., "Perceptions of Carbon Dioxide Emission Reductions and Future Warming Among Climate Experts," *Communications Earth & Environment*, **5**, 498 (2024).
3. ClimatePartner, "2025 in Climate Action: VCM 2.0, CSRD, and Peak Emissions," *ClimatePartner GmbH* (2025).
4. Haskett, J. D., "U.S. Withdrawal from the Paris Agreement: Process and Potential Effects," *Congressional Research Service*, R48504 (2025).
5. ICAP, "Compare ETS," *International Carbon Action Partnership* (2025).
6. ICAP, "Korea Emissions Trading System (K-ETS)," *International Carbon Action Partnership* (2025).
7. ICAP, "ICAP Allowance Price Explorer," *International Carbon Action Partnership* (2025).
8. IEA, "Global Energy and Climate Model Documentation – 2024," *International Energy Agency* (2024).
9. Tiseo, I., "Average Price of Voluntary Carbon Market (VCM) Credits Worldwide from 2023 to 2024," *Statista* (2025).
10. Tiseo, I., "Forecast Voluntary Carbon Offset (VCO) Prices Worldwide in 2030 and 2050, by Scenario," *Statista* (2025).
11. Baylin-Stern, A. and Berghout, N., "Is Carbon Capture Too Expensive?," *IEA Commentary* (2021).
12. Ozkan, M., "Atmospheric Alchemy: The Energy and Cost Dynamics of Direct Air Carbon Capture," *MRS Energy & Sustainability*, **12**, 46-61(2025).
13. Olmstead, S. M., Leibowicz, B. D., Mason, C. F., Waxman, A. R., Grubert, E., Huber-Rodriguez, H. R. and Stemmler, J., "How to Design Better Incentives for Carbon Capture and Storage in the United States," *PNAS*, **122**(29), e2404677122(2025).
14. Republic of Korea, "The Republic of Korea's Enhanced Update of its First Nationally Determined Contribution," *UNFCCC NDC Registry* (2021).
15. Hatchley, K. and Lee, S., "New Briefing: South Korea's Emissions Trading Scheme Weakened by Pressure from Major Industries," *InfluenceMap* (2025).
16. MathWorks, "fmincon – Find Minimum of Constrained Nonlinear Multivariable Function," *MATLAB Help Center* (2025).

Authors
Soo Hyoung Choi: Professor, Division of Chemical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea; soochoi@jbnu.ac.kr