

PLANiT

연구 보고서 시리즈

한국 탈탄소 산업전환을 위한 K-MSR 도입 방안

배출권거래제 시장안정화제도 최저가격 도입안

저자

박진수 · 황현성

발행

2026년 8월

문서 번호

PLANiT-RP-2026-01

Discovering transition pathways with model-based solutions

인용 방법: 박진수 (2026). 한국 탈탄소 산업전환을 위한 탄소가격제 보완안. PLANiT.

요약

한국 배출권거래제는 국가 감축목표에 맞춰 배출허용총량을 줄이지만, 시장가격은 비용이 낮은 감축수단부터 반영하기 때문에 철강과 석유화학의 대규모 설비전환에 필요한 탄소비용은 뒤늦게 형성될 수 있다. 제4차 할당계획의 총량과 산업별 감축수단을 고려하면 2040년 예상 배출권 가격은 약 6만 7,000원으로, 9만~12만 원의 산업전환 가격대에 도달하지 못할 가능성이 크다.

본 보고서는 2026년 배출권 경매 최저가격을 4만 원에서 시작해 매년 실질 7%씩 높이며, 그 가격에서 팔리지 않은 배출권을 영구취소하는 한국형 시장안정규칙(K-MSR)을 제안한다. 해당 제도를 도입시, 배출권 가격 경로는 2038년에 9만 원을 넘고 2040년에는 약 10만 3,000원에 도달할 것으로 전망된다. 정부는 다년 탄소가격제 및 유상할당 취소 절차를 법령으로 먼저 정하고, 시행 이후에는 유찰량과 실제 취소량, 경매가격과 2차시장 가격의 차이, 기업의 설비투자 계획을 정기적으로 검토하여야 한다.

키워드: 배출권거래제; 시장안정예비분; 경매 최저가격; 영구취소; 산업전환

2026년 경매 최저가격을 4만 원에서 시작해 물가를 제외한 가격을 매년 7%씩 높이고, 그 가격에서 팔리지 않은 배출권을 영구취소한다. 4만 원·7% 경로는 도입 초기의 경매 충격을 줄이면서 2038년에 탈탄소 가격 시그널인 9만 원을 넘도록 설계한 시나리오다.

목차

요약 2

1. 배출권거래제와 산업 전환 4

2. 빈티지 가격차와 장기 가격전망 6

3. 해외 제도의 가격·공급 조정 9

4. 가격경로 시나리오 분석 11

5. 정책안과 도입 조건 16

부록 A. 분석 구조와 검증 범위 19

부록 B. 참고문헌 22

1. 배출권거래제와 산업 전환

1.1 총량과 가격

기후변화는 온실가스 배출이라는 외부효과를 경제가 비용으로 인식하지 못해 발생하는 전형적인 시장실패다. 탄소가격제는 이 외부효과를 경제활동 안으로 가져와 배출을 줄일 유인을 만드는 정책으로, 정부가 온실가스 1톤당 가격을 정하는 탄소세와 전체 배출허용량을 정한 뒤 기업들이 배출권을 거래하도록 하는 배출권거래제로 구분된다. 탄소세는 정부가 가격을 사전에 정하기 때문에 기업이 미래에 부담할 비용을 비교적 분명하게 알 수 있지만, 그 가격에서 실제 배출량이 얼마나 줄어들지는 시장의 반응에 따라 달라진다. 배출권거래제는 반대로 정부가 배출허용총량을 먼저 정하기 때문에 전체 배출량을 목표 경로에 맞춰 관리하기 쉽지만, 배출권 가격이 시장 여건에 따라 결정되므로 기업이 장기 투자에 활용할 가격신호가 불안정할 수 있다(Weitzman, 1974).

한국 배출권거래제(K-ETS)는 이러한 장단점을 여실히 보여준다. 우선 정부가 국가 온실가스 감축목표에 맞춰 배출허용총량을 줄이면 제도 적용 부문(sector)의 배출량을 목표 경로 안에서 관리할 수 있지만, 총량이 감소하는 속도와 철강·석유화학의 설비전환에 필요한 가격이 형성되는 속도는 서로 다를 수 있다. 일반적으로 배출권시장에서 기업은 같은 양의 온실가스를 줄일 수 있다면 비용이 낮은 방법부터 선택하고, 시장가격은 목표를 달성하기 위해 마지막으로 필요한 한계 감축수단의 비용에 가까운 수준에서 형성될 가능성이 크다. 즉, 에너지효율을 높이거나 연료를 바꾸는 방식처럼 기존 설비를 크게 바꾸지 않고 적용할 수 있는 감축수단이 충분히 남아 있으면 배출허용총량이 계속 줄어들더라도 가격은 상당 기간 낮게 유지되며, 전체 감축비용을 줄인다는 제도의 장점이 대규모 설비전환이 필요한 고탄소 산업에는 탄소가격 신호가 늦게 전달되는 결과로 이어질 수 있다.

제4차 할당계획의 배출허용총량은 2026년 5억 700만 톤에서 2030년 4억 3,500만 톤으로 줄어들며, 본 보고서는 2030년 이후에도 총량이 매년 2%씩 감소하는 경로를 적용했다. 이 경로에서 2040년에 필요한 추가 감축량은 약 1억 300만 톤이지만, 에너지효율 개선과 전기로 확대, 연료전환처럼 비용이 낮은 수단이 상당 부분을 차지하기 때문에 수소환원제철이나 석유화학 전기 크래킹은 시장가격을 결정하는 단계까지 올라가지 않을 가능성이 크다¹

총량과 가격의 간격은 명목 가격과 실제 부담의 간격에서도 확인된다. 배출권의 약 89%가 무상으로 할당되므로 시장가격이 3만 원이어도 할당대상 업체 전체의 평균 실효 부담은 톤당 3,000원 안팎이다. 무상할당도 이론적으로는 배출의 기회비용을 남기지만, 배출효율 기준 할당이 생산 실적과 연동되는 조건에서는 기준을 밑도는 사업장만 부족분을 구매하므로 설비 단위의 유효 탄소비용은 시장가격보다 크게 낮아진다. 따라서 가격신호가 설비전환 결정에 닿으려면 가격의 수준·경로와 함께 유상할당의 범위가 확대되어야 한다.

¹2040년 약 6만 7,000원은 PLANiT 감축비용표와 총량 경로를 통해 추정된 예상 배출권 가격으로, 총량, 기술비용, 감축 가능량과 이월물량 가치가 달라지면 결과도 달라질 수 있다.

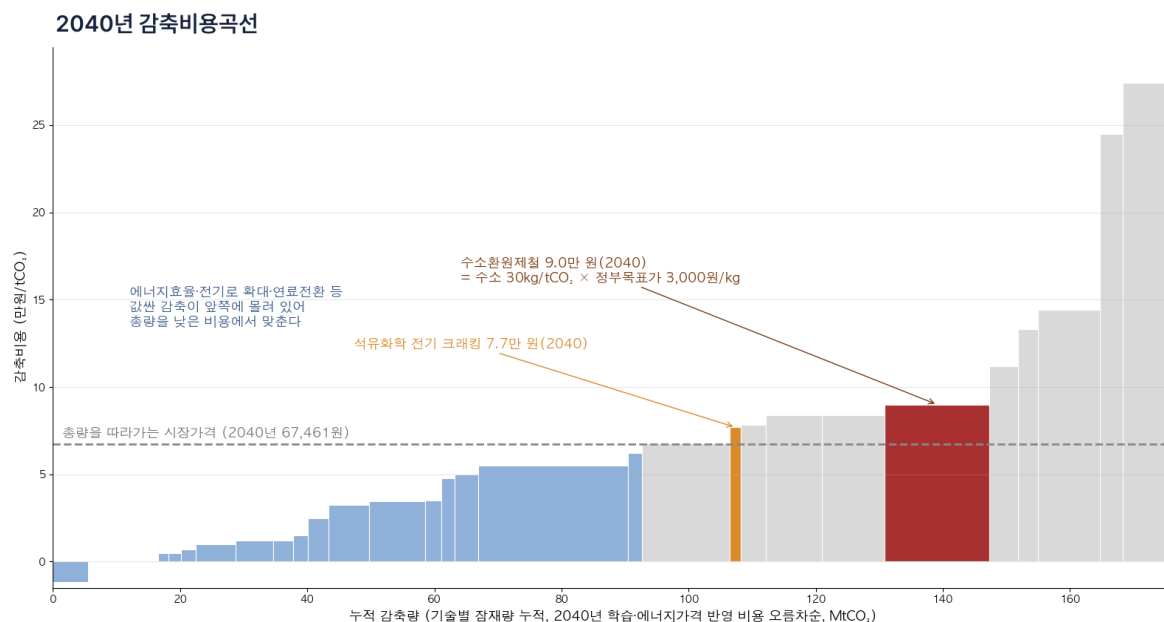


그림 1. 기준 시나리오의 2040년 한계감축비용곡선 예시.

자료: PLANiT 분석.

1.2 산업전환의 시간

그림 1에서 보이는 것처럼, 에너지효율 개선과 연료전환은 비교적 낮은 비용으로 상당한 양의 온실가스를 줄일 수 있지만, 수소환원제철과 전기 크래킹은 더 높은 비용구간에 위치한다. 특히, 철강과 석유화학의 생산설비는 한 번 건설하면 수십 년 동안 운영되고 투자비를 회수하는 데도 오랜 시간이 걸리기 때문에 기업은 현재 배출권 가격만 보고 설비전환을 결정하지 않으며, 새로운 설비를 도입했을 때 절감할 탄소비용과 그 효과가 운영기간 동안 유지될 가능성, 앞으로도 비슷한 가격경로가 이어질지를 함께 고려하게 된다. 따라서, 현재 가격이 낮더라도 앞으로의 상승경로가 분명하면 투자를 준비할 수 있지만, 가격이 언제 얼마나 오를지 알 수 없으면 기존 설비의 수명을 연장하면서 투자 결정을 미루는 선택이 기업 입장에서 더 합리적일 수 있다.

이 시간 구조는 설비별 일정에서 실측된다. 가동 중인 고로 11기의 개수 분기점은 2030년(당진 1·2고로), 2033년(광양 1·당진 3고로), 2035~2037년(포항 2·3, 광양 5고로)에 밀집하고, 포항 4고로와 광양 2고로는 2024~2025년 개수를 마쳐 2044~45년까지 현행 공정에 고정되었다. 석유화학은 2025년 8월 자율협약 이후 나프타 분해설비를 최대 370만 톤 줄이는 재편이 진행 중이어서 남은 설비의 탈탄소 투자 판단이 같은 시기에 온다. 투자 결정에서 가동까지 5~7년이 걸리는 점을 고려하면 2040년대 초 상용 가동을 위한 투자 결정은 2033~2037년에 이루어져야 하며, EU 탄소국경조정제도의 유상화가 2030년에 가장 크게 확대되어 2034년에 완결되는 일정도 같은 구간을 가리킨다. 이 창에서 재개수가 선택되면 다음 분기점은 2040년대 중반 이후로 밀려 2050년 탄소중립과 맞추기 어렵다.

수소환원제철과 석유화학 전기 크래킹의 감축비용을 분석한 외부 연구들은 기술조건과 전력·수소가격에 따라 서로 다른 결과를 제시한다. 본 보고서는 이 연구들을 국제 탄소가격 연구와 함께 비교해 9만~12만 원을

철강·석유화학의 산업전환 가격대로 설정한다(Vogl 외, 2018; Wu 외, 2025; Cattry 외, 2025; High-Level Commission on Carbon Prices, 2017). 이 범위는 모든 기업에 동일하게 적용되는 손익분기점이 아니라 주요 전환기술이 현재보다 현실적인 투자대안으로 들어오기 시작하는 가격대이며, 최근 배출권 가격이 2만 원대 초반에 머물고 장기 가격경로도 제시되지 않은 상황에서는 기업이 수조 원 규모의 설비투자를 결정하기 어렵고 기존 설비를 계속 사용하는 선택이 이어질 수 있음을 시사한다.

2. 빈티지 가격차와 장기 가격전망

2.1 빈티지 가격차

배출권에는 온실가스 배출량을 정산할 때 사용할 수 있는 연도가 표시되어 있으며, 이 사용연도에 따라 서로 다른 상품으로 구분된다. 2025년 배출권은 2025년도 배출량을 정산하는 데 사용되고 2026년 배출권은 2026년도 배출량을 정산하는 데 사용되므로 같은 시장에서 거래되더라도 두 배출권의 가격이 항상 같을 필요는 없다. 이처럼 사용연도가 다른 배출권을 빈티지라고 하고, 사용연도가 이어지는 두 배출권 사이의 가격차를 빈티지 가격차라고 한다. 현재 사용할 수 있는 배출권보다 다음 해에 사용할 배출권이 더 비싸게 거래된다면 시장이 미래의 탄소가격 상승을 예상한다고 볼 수 있기 때문에, 선물시장이나 장기계약이 충분히 발달하지 않은 배출권시장에서는 빈티지 가격차를 미래가격에 대한 시장의 기대를 보여주는 지표로 사용하기도 한다.

빈티지 가격차에서 미래가격을 읽으려면 서로 다른 연도의 배출권이 시간의 흐름에 따라 연결되어 있어야 한다. 기업이 현재 배출권을 구입한 뒤 다음 해로 넘겨 사용할 수 있고 미래에 필요한 배출권을 미리 확보하거나 다음 해 물량을 앞당겨 사용할 수 있다면 현재 배출권과 미래 배출권 사이에 거래관계가 형성되며, 현재 배출권을 사서 보유하는 기업이 부담하는 자금의 시간가치와 보유비용도 미래 배출권 가격에 반영된다. 두 빈티지의 거래가 충분히 활발하면 어느 한쪽의 가격이 지나치게 높아졌을 때 기업들이 더 저렴한 배출권을 사고 비싼 배출권을 파는 방식으로 대응하기 때문에 가격차도 일정한 범위 안에서 조정되고, 이러한 관계가 안정적으로 작동할 때 빈티지 가격차는 시장이 예상하는 미래 탄소가격을 보여줄 수 있다(Rubin, 1996).

2.2 한국 시장의 거래구조

한국 배출권시장에서는 서로 다른 빈티지의 가격이 이처럼 자연스럽게 연결되기 어렵다. 사용할 수 있는 기간이 빈티지마다 다르고 배출권을 다음 해로 넘기는 이월과 미래 물량을 앞당겨 사용하는 차입에도 제약이 있으며, 같은 날 시장에 올라오더라도 빈티지별 거래량과 매수·매도 주문의 규모가 크게 다르다. 거래가 활발한 배출권은 새로운 정책이나 기업의 수요 변화가 가격에 빠르게 반영되지만 거래가 거의 없는 배출권은 새로운 정보가 들어와도 이전 가격이 그대로 남을 수 있고, 소수의 주문만으로도 종가가 크게 움직일 수 있다. 실제 거래 없이 종가만 유지되는 날이 많으면 두 빈티지의 가격이 같다는 사실이 미래가격에 대한 기대를 의미하는지, 거래가 없어서 가격이 움직이지 않은 것인지 구분하기 어렵다.

2015년 1월부터 2026년 7월까지 한국거래소에서 관측된 인접 빈티지 가격을 같은 날짜별로 분석한 결과, 두 빈티지의 가격이 같은 날 함께 기록된 조합은 모두 5,693개였으며, 이 가운데 가격차가 정확히 0이었던 경우는 2,841개로 전체의 49.9%를 차지했다. 표면적으로만 보면 시장이 다음 해의 배출권 가격도 현재와 비슷할 것으로 예상했다고 해석할 수 있지만, 두 빈티지가 같은 날 실제로 모두 거래된 경우는 253개로 전체 표본의 4.4%에 그쳤고 이 표본에서 가격차의 중앙값은 0.18%였다. 가격이 같았던 날은 많았지만 그 가격을 뒷받침하는 실제 거래는 많지 않았다는 뜻이다.

인접 빈티지 가격차 분포

전체 호가쌍과 양쪽 모두 거래된 표본

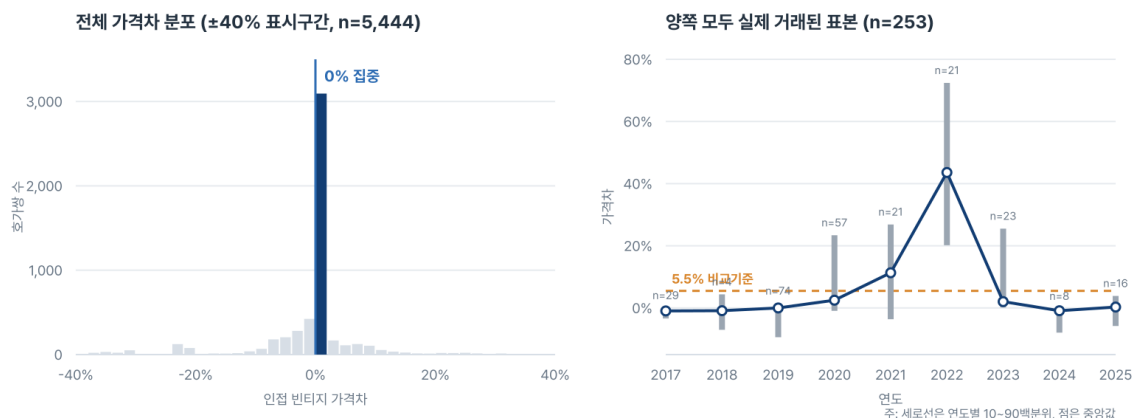


그림 2. 인접 빈티지 가격차 분포와 연도별 변동.

자료: 한국거래소 일별 종가·거래량(2015년 1월~2026년 7월).

2.3 장기 가격정보

그림 2의 왼쪽은 같은 날짜에 가격이 기록된 인접 빈티지 조합 전체를 보여주며 가격차가 0% 부근에 집중되어 있지만, 오른쪽에서 두 빈티지가 같은 날 실제로 모두 거래된 경우만 따로 보면 가격차의 범위가 연도에 따라 크게 달라진다. 두 그림을 함께 보면 한국 배출권시장에서 빈티지 가격차가 작게 나타나는 이유를 미래가격에 대한 안정적인 기대만으로 설명하기 어렵고, 거래가 충분하지 않아 기존 가격이 유지되는 현상과 이월·차입 제약, 거래비용의 영향도 함께 고려해야 한다.

기업이 철강이나 석유화학 설비에 투자할 때 필요한 정보는 다음 해 배출권이 현재보다 조금 비쌀 것인지가 아니라, 설비가 실제로 운영되는 2030년대와 2040년대에 탄소비용이 어느 수준까지 올라갈 것인지에 대한 전망이다. 현재 한국 배출권시장에서 거래되는 인접 빈티지는 길어야 몇 년 뒤의 정산에 사용되는 상품이므로 이 가격차를 단순히 연장해 10년이나 20년 뒤의 가격경로로 사용하기 어렵고, 장기계약이 활발해지거나 기업의 기대가격 조사와 장기 감축정책 발표 전후의 가격반응이 같은 방향을 반복해서 보여줄 때 비로소 시장 안에서 장기 가격정보를 읽을 수 있다. 현재 자료가 보여주는 것은 현물가격과 인접 빈티지 가격차만으로 기업의 설비투자 기간에 맞는 장기 가격경로를 구성하기 어렵다는 사실이다.

3. 해외 제도의 가격·공급 조정

배출권거래제를 먼저 도입한 국가들도 배출허용총량을 줄이는 것만으로 기업에 안정적인 장기 가격신호를 전달하기 어렵다는 문제를 경험했다. 경기침체나 에너지 수요 감소로 기업의 배출량이 예상보다 빠르게 줄면 사용되지 않은 배출권이 시장에 쌓이고, 정부가 장기적으로 총량을 줄이더라도 당장의 배출권 가격은 낮게 유지될 수 있기 때문이다. 가격이 지나치게 낮아지면 기업은 저탄소 투자보다 배출권 구매를 선택하고, 반대로 가격이 짧은 기간에 급격히 오르면 생산비용과 시장 불안정성이 커진다. 유럽연합, 영국과 캘리포니아·퀘벡은 이러한 문제에 대응하면서 서로 다른 제도를 발전시켰으며, 세 사례의 차이는 정부가 가격을 직접 정하는지, 시장에 남은 물량에 따라 공급을 조정하는지, 팔리지 않은 배출권을 나중에 다시 공급하는지에서 나타난다.

3.1 유럽연합

유럽연합 배출권거래제(EU ETS)는 금융위기 이후 경기와 산업생산이 둔화되면서 사용되지 않은 배출권이 빠르게 쌓였고, 배출허용총량이 감소하는 상황에서도 가격이 장기간 낮게 유지되는 문제를 겪었다. 유럽연합은 시장에 유통되는 배출권의 총량을 매년 계산한 뒤 잉여물량이 많으면 다음 경매에서 판매할 배출권의 일부를 시장안정예비분(MSR)으로 옮기고, 시장이 부족해지면 예비분에서 다시 공급하는 방식을 도입했다. 정부가 특정 가격을 정하는 대신 시장에 남아 있는 배출권의 규모에 따라 공급시점을 바꾸는 수량규칙이며, 2025년 유통물량을 기준으로 2026년 9월부터 2027년 8월까지 약 1억 9,000만 개의 배출권이 경매에서 빠져 예비분으로 들어가도록 결정된 것도 이 규칙에 따른 것이다(European Commission, 2026).

유럽연합은 예비분에 배출권이 계속 쌓일 경우 미래에 다시 공급될 수 있다는 기대가 현재가격을 낮출 수 있다고 보고, 2023년부터 예비분이 4억 개를 넘으면 초과 물량을 무효화해 전체 공급량을 줄여 왔다. 2026년 4월 집행위원회는 시장이 예상보다 빠르게 부족해질 가능성에 대비해 무효화를 중단하고 예비분을 다시 사용할 수 있는 완충물량으로 남겨두는 방안을 제안했다. 이 제안은 보관과 영구취소가 서로 다른 정책이라는 점을 다시 보여주며, 예비분을 남겨두면 공급 충격에 대응할 수 있지만 기업은 미래의 재공급 가능성까지 현재가격에 반영하게 된다.²

3.2 영국

영국 배출권거래제(UK ETS)는 경매에서 배출권을 판매할 수 있는 최소가격을 직접 정한다. 영국 정부는 2026년 4월 경매 최저가격을 기존 22파운드에서 28파운드로 높였고 2027년부터 물가변화를 반영해 매년 조정하기로 했으며, 기업이 이보다 낮은 가격으로 입찰하면 배출권을 살 수 없기 때문에 정부가 어느 가격 아래에서는 신규 배출권을 공급하지 않을 것인지 미리 알 수 있다. 배출권 가격이 짧은 기간에 크게 떨어지더라도 더 낮은 가격의

²현행 EU MSR은 예비분이 4억 개를 넘으면 초과분을 무효화한다. 집행위원회는 2026년 4월 이 무효화를 중단하고 완충물량으로 보유하는 개정안을 제안했으며, 2026년 8월 현재 제안 단계다.

신규 물량이 경매를 통해 공급되는 것을 막아주는 장치이며, 기업이 최소한의 탄소비용을 투자계획에 반영하도록 하는 기준으로 사용될 수 있다(UK ETS Authority, 2026).

영국의 경매 최저가격은 배출권이 팔리는 조건을 정하지만 그 가격에서 팔리지 않은 물량을 영구히 없애는 제도는 아니다. 일부 물량이 유찰되면 다음 네 차례의 경매에 나누어 추가하고, 각 경매에 추가되는 물량이 원래 예정 물량의 125%를 넘으면 나머지를 시장안정장치 계정으로 옮긴다.

3.3 캘리포니아·퀘벡

캘리포니아와 퀘벡이 함께 운영하는 배출권시장은 낮은 가격과 높은 가격에 대응하는 장치를 하나의 체계 안에 두고 있다. 경매에서는 배출권을 판매할 수 있는 유보가격을 정해 그보다 낮은 입찰을 받지 않고, 배출권 가격이 빠르게 오를 때에는 두 단계의 가격으로 마련한 예비물량을 판매하며 그 물량까지 소진된 뒤에는 가격상한에 따라 추가 물량을 공급할 수 있다. 유찰된 물량은 재공급 조건을 충족할 때까지 보관하고 장기간 판매되지 않은 물량은 가격안정 예비분으로 옮기기 때문에, 가격하락을 막는 장치와 가격급등을 완화하는 장치, 유찰물량의 처리방식이 서로 구분되어 있다(California Air Resources Board, 2026).

표 1. 해외 배출권시장의 가격·공급 조정장치.

제도	가격·공급 조정	물량 처리	한국 적용 시 검토사항
EU ETS	시장 잉여량에 따라 경매 공급을 조정	예비분 적립과 무효화를 구분	보관·재공급·영구취소의 범위를 분리
UK ETS	경매 최저가격 £28, 2027년부터 물가 연동	유찰물량을 재배분하고 일부는 안정장치 계정으로 이동	경매 하한과 장기 공급규칙을 함께 설계
캘리포니아·퀘벡	경매 유보가격과 가격급등 대응 장치를 병행	유찰물량과 가격안정 예비분을 별도 관리	가격하락·급등의 대응조건을 함께 마련

자료: European Commission(2026), UK ETS Authority(2026), California Air Resources Board(2026).

3.4 한국에 주는 시사점

세 제도는 서로 다른 문제에서 출발했지만 장기 가격신호를 만들기 위해서는 정부가 신규 배출권을 어느 가격 아래에서 팔지 않을 것인지, 그 가격에서 팔리지 않은 물량을 보관하거나 다시 공급할 것인지 아니면 영구히 없앨 것인지, 시장상황이 예상과 다르게 움직일 때 어떤 조건에서 규칙을 조정할 것인지를 구분해야 한다는 공통된 교훈을 제공한다. 유럽연합의 수량규칙은 시장에 쌓인 잉여물량에 대응하지만 기업이 미리 계산할 가격경로를 제시하지 않고, 영국의 최저가격은 경매의 하한을 공개하지만 장기 공급감소를 보장하지 않으며, 캘리포니아·퀘벡의 가격안정장치는 하한과 상한을 함께 관리하지만 산업 전환에 필요한 장기 가격수준을 대신 결정하지 않는다.

4. 가격경로 시나리오 분석

4.1 비교 구조

경매 최저가격과 유찰물량 취소가 가격에 미치는 영향을 보려면 정책을 도입하지 않는 경우와 다른 공급조정 방식을 같은 조건에서 비교해야 한다. 이 장에서는 아무 조치가 없는 경로, 배출권을 일시적으로 흡수했다가 다시 공급하는 경로, 2035년부터 정해진 물량을 일괄 취소하는 경로, 경매 최저가격에서 팔리지 않은 물량을 영구취소하는 경로를 비교한다. 네 경로는 배출허용총량과 기술비용, 감축 가능량을 동일하게 두고 공급 시점과 취소 방식만 바꾼 시나리오다.

아무 조치가 없는 경로에서 2040년 계산가격은 약 6만 7,000원이며, 배출권을 중간에 흡수했다가 분석기간 안에 다시 공급하는 경로도 2040년 가격은 같은 수준으로 돌아온다. 공급 시점은 달라졌지만 전체 기간에 시장으로 들어오는 배출권의 양이 같기 때문이다. 2035년부터 정해진 물량을 일괄 취소하는 경로에서는 발동 직후 가격이 9만 원대로 오르지만 공급감소 규모가 수요와 관계없이 정해져 있어 가격이 빠르게 오른 뒤 다시 낮아지고, 최저가격에서 팔리지 않은 물량을 취소하는 경로에서는 가격이 2차시장에 전달되는 범위 안에서 공개된 가격경로를 따라 완만하게 상승한다.

네 시나리오의 차이는 배출권을 잠시 보관하는 것과 시장에서 완전히 없애는 것이 장기 가격에 서로 다른 영향을 준다는 데서 생긴다. 최저가격에서 경매수요가 충분하면 예정 물량이 모두 판매되어 취소가 발생하지 않고, 수요가 약하면 유찰량이 늘면서 취소량도 함께 증가하므로 가격규칙의 공급감소 규모는 시장의 반응에 따라 정해진다. 정해진 물량을 한 번에 줄이는 수량규칙과 달리 가격규칙은 정부가 가격경로를 먼저 제시하고, 그 가격에서 확인된 수요가 실제 공급감소 규모를 결정한다.

가격규칙 시나리오의 경로는 최저가격이 2차시장에 충분히 전달되고 유찰물량이 실제로 영구취소될 때 성립한다. 경매가격만 오르고 2차시장 가격이 따라오지 않거나 유찰물량이 이후 경매에 다시 공급되면 같은 경로가 만들어지지 않는다. 따라서 그림 3은 K-MSR을 도입하면 가격이 자동으로 이 경로를 따른다는 결과가 아니라, 가격전달과 영구취소가 이루어졌을 때 다른 운영방식과 어떤 차이가 생기는지 보여주는 시나리오 비교다.

운영안별 조건부 가격경로

개입 없음·흡수 뒤 재공급·가격규칙·수량규칙

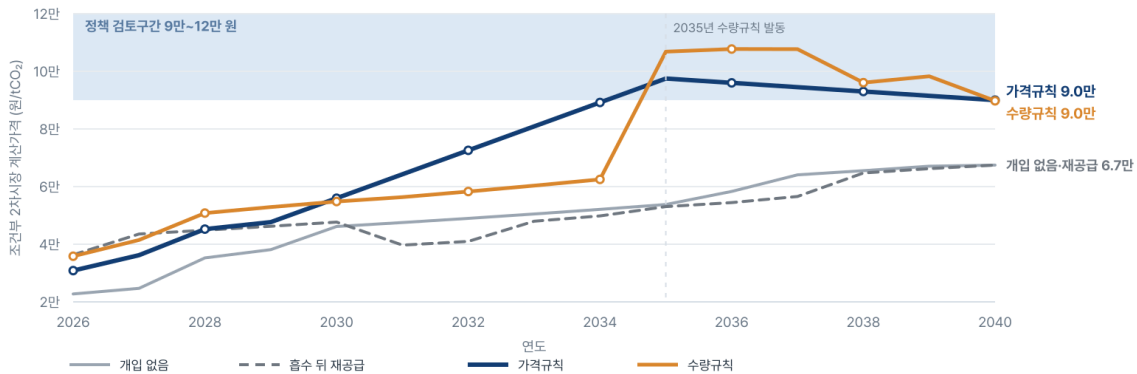


그림 3. 운영안별 조건부 2차시장 가격경로.

자료: PLANiT 분석.

최저가격이 2차시장으로 전달되는 조건은 해외 제도의 실증에서 네 가지로 정리된다. 경매가 공급에서 차지하는 비중이 커야 하고, 유찰물량이 재공급되지 않고 취소되어야 하며, 이월재고가 소진될 시간이 필요하고, 가격규칙이 사전에 공표되어 신뢰를 얻어야 한다. 한국의 경매비중은 총량의 약 11%에서 발전부문 유상할당 확대(2030년 50%)에 따라 높아지는 중이고, 유찰물량을 다음 경매로 이월하는 현행 관행은 취소가 아니라 재공급이며, 실측 이월 9,210만 톤과 예비분 8,528만 톤은 필요 공급조정량(연 최대 5,070만 톤)과 견주면 2년 안팎의 전달 지연을 만들 수 있고, 현행 낙찰하한가는 계산식이 공개되지 않는다. 즉, 네 조건 가운데 유찰물량의 영구취소와 다년 가격식의 사전 공표는 경매 최저가격제가 실효성을 위한 핵심 조건들이다.

4.2 출발가격과 상승률

경매 최저가격을 처음부터 철강과 석유화학의 전환비용 수준으로 높이면 장기 가격신호는 빠르게 만들어지지만, 최근 2만 원대 초반에서 형성된 시장가격과의 차이가 커져 첫째 경매수요가 크게 줄어들 수 있다. 현재가격과 비슷한 수준에서 시작하면 기업의 초기 부담은 작아지지만 수소환원제철과 전기 크래킹의 투자시점이 결정되는 2030년대 중반까지 필요한 가격수준에 도달하기 어렵다. 출발가격은 제도 도입 직후 경매에 미치는 영향을 정하고, 이후의 상승률은 산업 전환을 검토할 가격에 언제 도달할 것인지를 정한다.

가격경로 시나리오는 2026년 출발가격을 4만 원, 4만 5,000원, 5만 원으로 나누고 물가를 제외한 연간 상승률을 5.5%와 7%로 나누어 비교한다. 4만 원·7% 경로는 최근 2만 원대 초반의 시장가격과 9만~12만 원의 산업전환 가격대 사이의 간격을 10년 이상에 걸쳐 좁히는 경로로 설정했다. 물가를 제외한 가격을 F_t , 2026년 출발가격을 F_{2026} , 연간 실질 상승률을 g 라고 하면 각 연도의 최저가격은 다음과 같이 계산된다.

$$F_t = F_{2026} \times (1 + g)^{t-2026}$$

4만 원·7% 경로에서 경매 최저가격은 2030년 약 5만 2,000원, 2035년 약 7만 3,000원에 도달하고 2038년에 9만 원을 넘어서 뒤 2040년에는 약 10만 3,000원이 된다. 같은 4만 원에서 시작해 상승률을 5.5%로 낮추면 2040년 가격은 약 8만 5,000원에 머물고, 5만 원에서 시작해 7%씩 높이면 2035년에 9만 원을 넘어 2040년에는 약 12만 9,000원에 도달한다. 출발가격은 도입 직후의 경매수요와 비용부담을 좌우하고, 상승률은 산업전환 가격대에 들어서는 시점을 좌우한다.³

최저가격 경로와 정책 검토구간

출발가격·실질 상승률별 2026~2040년 경로

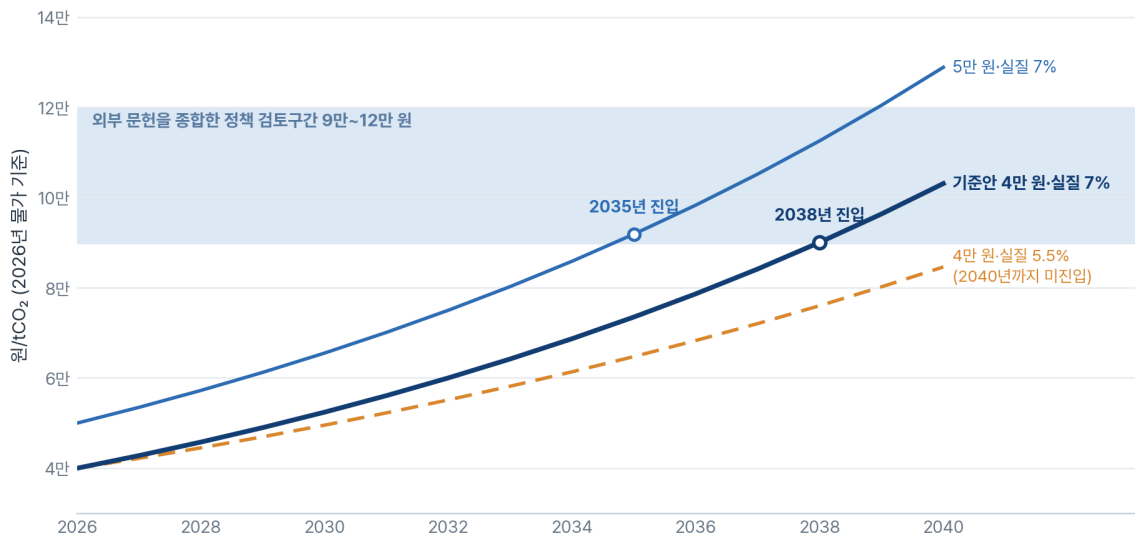


그림 4. 경로별 최저가격과 산업전환 가격대.

자료: PLANiT 계산.

9만~12만 원은 한국 배출권의 적정가격을 하나의 연구에서 가져온 값이 아니라 국제 탄소가격과 철강·석유화학의 주요 전환기술을 분석한 외부 연구를 함께 비교해 정한 정책가격 범위다. Vogl 외(2018)는 전력가격이 40유로/MWh인 조건에서 수소환원제철이 기존 고로공정과 경쟁할 수 있는 탄소가격을 34~68유로/tCO₂로 분석했고, Wu 외(2025)는 한국과 일본의 탄소포집 철강공정에서 46~75달러/tCO₂의 감축비용을 제시했으며, Cattry 외(2025)는 전력가격과 설비비가 유리한 조건에서 석유화학 전기 크래킹의 감축비용이 100달러/tCO₂ 이하로 내려갈 수 있다고 보았다. High-Level Commission on Carbon Prices(2017)가 2030년 탄소가격으로 제시한 50~100달러/tCO₂도 이 범위의 국제적 배경을 제공한다.⁴

³4만 원의 시작가격과 연 7% 상승률은 9만~12만 원에서 거꾸로 계산한 시장 추정치가 아니다. 시작가격은 도입 초기의 경매수요를, 상승률은 산업전환 가격대에 도달하는 시점을 고려해 선택한 정책값이다.

⁴Vogl 외(2018)는 수소환원제철 34~68유로/tCO₂, Wu 외(2025)는 한국·일본 철강공정 46~75달러/tCO₂, Cattry 외(2025)는 유리한 조건의 전기 크래킹에서 100달러/tCO₂ 이하의 감축비용을 제시했다. High-Level Commission on Carbon Prices(2017)는 2030년 50~100달러/tCO₂를 제시했다. 9만~12만 원은 이 연구들의 범위를 비교해 정한 정책가격 범위이며 모든 기업에 동일한 투자 손익분기점을 뜻하지 않는다.

연구마다 분석한 기술과 에너지가격, 설비조건과 통화기준이 다르기 때문에 숫자를 단순히 평균하면 실제 기업의 투자비를 설명하지 못한다. 본 보고서는 주요 전환기술이 현재보다 현실적인 선택지로 들어오기 시작하는 가격대와 국제 탄소가격 연구를 함께 비교해 9만~12만 원을 정책가격 범위로 설정했다. 수소와 전력이 가격이 낮아지고 설비비와 금융비용이 줄거나 저탄소 제품에 가격 프리미엄이 형성되면 같은 기술도 더 낮은 탄소가격에서 경쟁력을 가질 수 있고, 에너지 인프라가 낮아지면 더 높은 가격이 필요해지므로 정부는 정해진 검토시점마다 산업의 기술비용과 기업의 투자계획을 반영해 이 범위를 갱신할 필요가 있다.

4.3 산업별 전환 경로

배출권 가격이 올라간다고 해서 모든 감축기술이 동시에 도입되는 것은 아니다. 기업은 기존 설비를 크게 바꾸지 않고 적용할 수 있는 에너지효율 개선과 연료전환부터 선택하고, 이러한 수단으로 줄일 수 있는 배출량이 감소하면서 탄소가격이 더 높은 수준에 도달해야 수소환원제철이나 전기 크래킹과 같은 대규모 설비전환을 시작한다. 현재와 같이 2만 원대에서 완만하게 오르는 가격경로에서는 저비용 감축수단이 오랫동안 시장가격을 결정하므로 고비용 전환기술의 도입이 뒤로 밀리고, 4만~5만 원에서 시작해 실질 7%씩 오르는 경로에서는 탄소가격이 기술별 운전비 기준에 더 일찍 도달하면서 설비전환도 앞당겨진다.

산업별 기술비용과 도입속도를 반영한 계산에서 수소환원제철은 가격경로에 따라 2036~2039년 사이에 도입되기 시작한다. 철강과 석유화학의 2023년 배출량 1억 5,500만 톤을 출발점으로 두고 기술별 가격기준에 도달한 뒤 해당 기술이 10년에 걸쳐 생산설비에 적용된다고 보면, 4만~5만 원에서 시작해 실질 7%씩 오르는 경로의 2050년 배출량은 약 1억 400만~1억 500만 톤으로 계산된다. 2만 5,000원에서 시작해 매년 5%씩 오르는 비교경로에서는 대규모 설비전환이 늦어지면서 2050년 배출량이 약 1억 2,600만 톤에 머물며, 가격경로에서 발생한 몇 년의 차이가 기술 도입시점과 2040년대의 배출경로를 함께 바꿀 수 있다.

철강·석유화학 부문 배출경로

가격경로별 조건부 기술 도입 결과

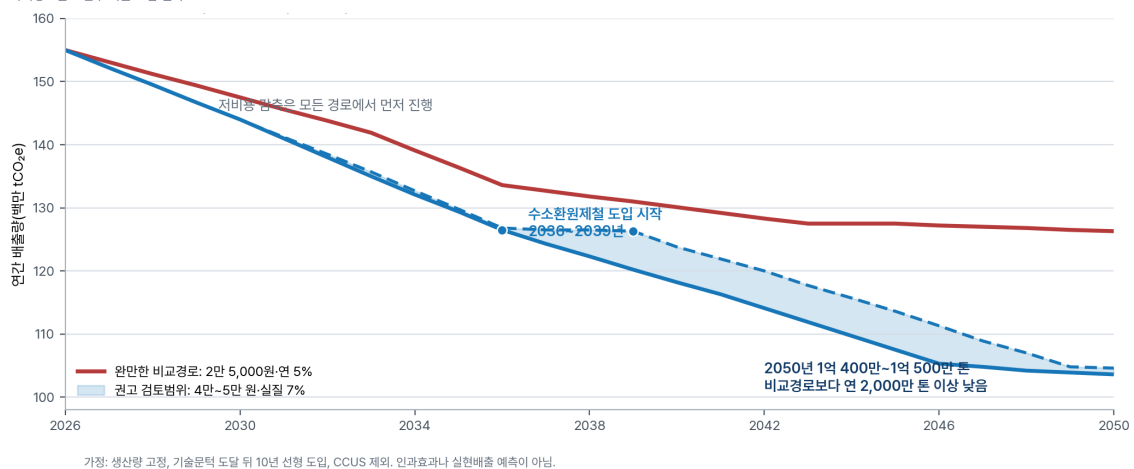


그림 5. 가격경로별 철강·석유화학 부문 배출경로.

자료: PLANiT 2026년 7월 18일 모형.

5. 정책안과 도입 조건

5.1 정책안

본 연구 시나리오 분석은 국가 감축목표에 따라 배출허용총량이 줄어들더라도 저비용 감축수단이 남아 있는 동안에는 배출권 가격이 철강과 석유화학의 설비전환 비용보다 낮게 형성될 수 있고, 배출권을 잠시 보관했다가 다시 공급하는 방식만으로는 이 장기 가격수준을 바꾸기 어렵다는 점을 보여준다. 기업이 20년에서 30년 이상 운영되는 생산설비를 결정할 때 미래 탄소비용을 반영하도록 하려면, 총량 경로와 함께 경매 최저가격의 장기 경로를 공개하고 그 가격에서 팔리지 않은 물량을 실제 공급에서 제외해야 한다.

본 보고서는 비교한 가격경로 가운데 2026년 4만 원에서 시작해 물가를 제외하고 매년 7%씩 높이는 경로를 정책안으로 제시한다. 4만 원은 5만 원에서 시작하는 경로보다 도입 첫해의 경매수요와 기업 부담에 미치는 충격이 작고, 7% 상승률은 5.5% 경로와 달리 2038년에 9만 원을 넘어 산업전환 가격대에 들어선다. 이 가격에서 팔리지 않은 배출권을 영구취소하면 발표한 가격경로가 실제 공급감소로 이어지며, 출발가격은 초기 경매충격을, 상승률은 산업전환 시점을, 영구취소는 배출권의 장기 희소성을 각각 결정한다.

5.2 법적·행정적 조건

현행 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」 제23조 제2항 제3호는 시장안정화 방법으로 유상할당 배출권의 공급량 조정을 명시하고, 시행령 제38조 제6항은 일시적인 최저 배출권 매매가격을 정할 수 있도록 한다. 경매가격이 낮을 때 신규 공급을 조정할 법적 토대는 이미 마련되어 있지만, 이 조문만으로 2026년부터 2040년까지 적용할 다년 가격식과 유찰물량의 영구취소 절차가 정해지는 것은 아니다.

K-MSR을 도입하기 전에 정부는 최저가격 계산식과 물가 반영방식, 유찰물량의 취소 시점과 배출권등록부 처리방법, 취소된 물량을 배출허용총량과 국가 감축목표의 이행실적에 반영하는 방법, 규칙을 변경하거나 종료할 수 있는 조건을 법령과 하위 규정에 명시해야 한다. 장관이나 할당위원회가 매년 가격을 새로 결정하면 기업은 다음 해의 정책 결정을 기다리게 되므로, 정기적인 검토시점과 검토자료, 가격을 유지하거나 조정할 기준과 공표방식까지 사전에 정해야 장기 가격경로가 투자계획에 반영될 수 있다.

5.3 조정·중단 조건

K-MSR의 작동 여부는 배출권 가격이 정부가 정한 경로까지 올라갔는지만으로 판단할 수 없으며, 경매에서 발생한 유찰량과 실제 취소량, 경매가격과 2차시장 가격의 차이, 기업의 투자계획이 함께 움직이는지를 통해 확인해야 한다. 경매 최저가격이 올라가면서 유찰량이 늘어나는 현상은 제도가 작동하는 과정에서 나타날 수 있지만 필요한 유찰량이 예정 경매물량에 가까워지면 현재의 유상할당 비중만으로 가격경로를 유지하기 어려워지므로, 이 상황에서는 가격을 계속 올리기보다 출발가격과 상승률, 경매비중, 기업이 이미 보유한 배출권의 규모를 다시 검토해야 한다.

경매에서 물량이 유찰되었는데도 등록부에서 취소되지 않거나 다음 경매에 다시 공급되면 K-MSR의 가격규칙과 공급규칙이 분리되고 시장은 발표된 최저가격보다 미래의 재공급 가능성을 더 중요하게 받아들인다. 유찰물량의 영구취소가 법령에 정해진 시점과 방식에 따라 집행되지 않으면 다음 연도의 최저가격 인상을 중단하고 취소되지 않은 원인과 등록부 처리결과를 공개해야 하며, 취소가 정상적으로 이루어진 뒤에 가격경로를 다시 적용해야 기업과 시장이 장기 공급감소를 신뢰할 수 있다.

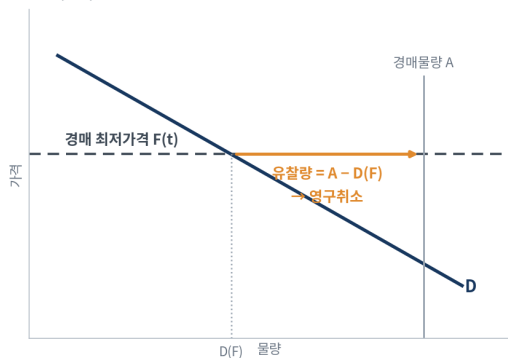
경매가격이 최저가격을 따라 움직여도 2차시장 가격이 장기간 그보다 낮게 유지되면 신규 경매물량이 전체 시장에서 차지하는 비중이 작거나 기업이 과거에 이월한 배출권을 충분히 보유하고 있거나, 2차시장의 거래량이 부족해 경매가격이 전달되지 않는 상황일 수 있다. 정부는 두 가격의 차이만 보고 최저가격을 추가로 인상하기보다 이월물량과 예비분, 시장의 거래량과 매수·매도 주문, 유상할당 비중을 함께 확인해 공급경로가 어디에서 단절되는지를 찾아야 한다.

판단 기준값은 해외 사례에서 가져올 수 있다. 캘리포니아는 경매 판매율이 11%로 떨어진 달에도 현물가격이 하한보다 0.30달러(하한의 약 2%) 낮은 수준에 머물렀고, 뉴질랜드는 유찰물량을 연말에 소각하는데도 민간 이월재고가 커서 2025년 네 차례 경매가 전부 유찰된 해에 현물가격이 하한의 81%에 머물렀다. 이 양 끝을 참고하면, 2차시장 가격이 최저가격의 80%에 미치지 못하는 상태가 2년 이상 이어질 때를 경매비중과 이월재고를 재검토하는 기준으로 삼을 수 있다(그림 6).

경매 최저가격의 현물가격 전달 경로

유찰물량 영구취소가 누적 공급을 줄이는 수량 경로 · 이월재고가 소진되기 전에는 경매에서만 구속

경매(1차)시장 · 유찰의 발생



현물(2차)시장 · 가격의 수렴

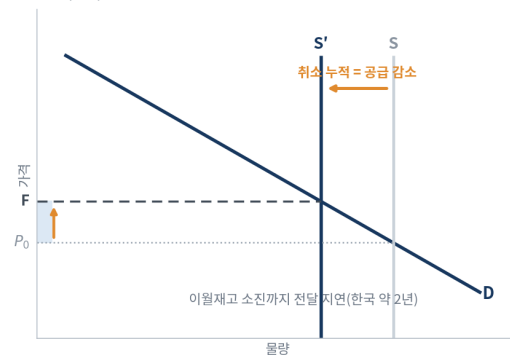


그림 6. 경매 최저가격의 현물가격 전달 경로.

자료: PLANIT 작성. 개념도이며 축의 눈금은 없음.

경매가격과 2차시장 가격이 공개된 경로를 따라 상승한 이후에도 철강과 석유화학 기업의 투자계획이 달라지지 않으면 탄소가격 이외의 조건이 설비전환을 막고 있다는 의미다. 수소와 저탄소 전력의 공급이 확보되지 않거나 기술의 상용화 시점이 늦어지고 대규모 설비투자에 필요한 금융과 인허가가 준비되지 않은 상황에서는 탄소가격만 높여도 실제 투자가 이루어지기 어렵기 때문에, 가격상승 속도를 높이기보다 기업이 공개한 투자계획과 기술 도입일정, 에너지 인프라와 금융조건을 확인해 전환을 지연시키는 원인을 먼저 해결해야 한다.

5.4 산업전환 지원

해당 연구는 탄소가격제를 강화하는 제언이지만, 본질적인 탈탄소 산업지원은 기업이 부담하는 탄소가격을 다시 보전하는 방식보다 저탄소 설비의 기술비용과 투자위험을 낮추는 방식으로 설계해야 한다. 단, 배출권 구매비용을 생산량이나 배출량에 비례해 그대로 지원하면 기업이 설비를 전환할 유인이 약해지고 고탄소 생산방식과 저탄소 생산방식의 비용차이를 만들려는 제도의 기능도 약화될 수 있다. 기술개발과 실증, 수소환원제철과 전기 크래킹의 초기 설비투자, 저탄소 전력과 수소의 공급망, 장기 저리금융과 저탄소 제품의 수요창출 등과 같은 정책은 기업이 탄소가격에 대응해 실제 투자를 선택할 수 있도록 전환비용을 낮추는 실질 지원수단이 될 수 있다.

배출권 가격이 오르는 과정에서 국내 철강과 석유화학 생산이 줄고 같은 제품의 수입이 늘어나면 국내 배출량은 감소하더라도 세계 전체의 온실가스 배출량은 줄지 않을 수 있다. 정부는 산업 전환의 성과를 배출량만으로 평가하지 않고 국내 생산량과 수입량, 제품 1톤당 탄소집약도, 저탄소 제품의 생산비중과 신규 설비투자를 함께 추적해 배출 감소가 기술전환에서 발생했는지 생산시설의 해외 이전이나 수입 증가에서 발생했는지를 모니터링할 필요가 있다.

무상할당과 EU 탄소국경조정제도(CBAM)의 상호작용도 같은 관점에서 확인할 필요가 있다. CBAM의 공제는 수출국에서 실제로 납부한 탄소비용에만 적용되므로, 철강의 무상할당이 100%로 유지되면 국내 납부액이 없어 공제도 없고, 대EU 수출에 부과되는 탄소비용은 전액 EU 국경에서 납부된다. 따라서 무상할당의 유지는 국내 산업의 탄소비용을 없애는 것이 아니라 그 납부처를 국내에서 EU로 옮기는 결과가 될 수 있다. 국내 가격신호가 서고 유상할당이 확대되어야 같은 비용이 경매수입으로 남아 산업전환 지원의 재원이 된다. 다만 대EU 수출은 철강 수출의 약 15%이므로 CBAM만으로 설비 전환의 결정을 움직이기는 어렵고, 국내 가격신호를 보완하는 장치로 이해해야 한다.

5.5 가격경로 재검토

9만~12만 원의 산업전환 가격대는 수소와 전력가격, 설비비와 금융비용, 기술의 상용화 수준과 저탄소 제품의 가격 프리미엄이 달라지면 함께 변한다. 수소환원제철과 전기 크래킹의 실제 투자비와 운전비가 낮아지면 기업은 더 낮은 탄소가격에서도 설비전환을 시작할 수 있고, 저탄소 에너지 인프라가 늦어지거나 금융비용이 높아지면 이 가격대에 도달한 뒤에도 투자가 지연될 수 있다. 정부는 산업별 기술비용과 기업의 투자계획을 정기적으로 갱신하고, 새로운 자료가 기존 가격경로를 바꿀 만큼 충분한 근거를 제공할 때 공개된 절차에 따라 출발가격과 상승률을 조정해야 한다.

K-MSR의 성과는 배출권 가격이 높은 수준에 도달했는지보다 공개된 가격경로가 유찰물량의 영구취소를 통해 실제 공급감소로 이어지고, 기업이 그 경로를 장기 투자계획에 반영해 저탄소 설비의 도입시점을 앞당겼는지를 통해 평가된다. 유찰량과 취소실적, 경매가격과 2차시장 가격의 차이, 기업의 투자계획과 산업별 배출경로를 함께 공개하면 정부는 제도가 작동하는 과정과 조정이 필요한 지점을 확인할 수 있고, 기업은 정책이 유지되거나 변경되는 조건을 사전에 계산할 수 있다.

부록 A. 분석 구조와 검증 범위

A.1 계산 구조

연도별 계산가격은 정책이 없을 때의 예상 배출량과 공급량의 차이를 감축 필요량으로 보고, 이를 감축수단을 비용이 낮은 순서로 배열한 표에 넣어 구한다. 총량·예상 배출량·기술비용·감축 가능량·이월물량 가정이 달라지면 계산가격도 달라지며, 본문의 2040년 6만 7,000원은 이 구조로 계산한 값이다.

$$P_t = MC_t(E_t^0 - S_t)$$

이 모형은 값싼 감축수단만으로 목표를 채울 수 있는 기간과 고비용 전환기술이 가격결정 구간에 들어오는 시점을 비교하는 데 사용한다. 인접 빈티지 가격차는 관측값이지만 장기 기대수익률로 사용하지 않았고, 시작가격과 연 7%는 모형이 추정한 값이 아니라 정부가 선택하는 가격규칙이다.

A.2 공급 처리

분석기간의 공급은 예정 공급량, 예비분 유입과 재공급, 영구취소량과 예비분 잔고로 나눈다. 보관과 재공급은 공급시점만 바꾸지만 영구취소는 누적 공급을 줄이므로, 분석 종료 때 예비분 잔고가 처음 수준으로 돌아오고 영구취소가 없다면 중간의 보관·재공급은 장기 공급량을 바꾸지 않는다.

$$\sum_{t=1}^T S_t = \sum_{t=1}^T A_t - (M_T - M_0) - \sum_{t=1}^T C_t$$

유찰·취소량은 경매 최저가격에서 기업이 사려는 양과 예정 경매물량의 차이이다. 아래 식은 정부 경매에서 없앨 물량만 계산하며, 2차시장 가격의 하한을 보장하지 않는다.

$$C_t = \max\{0, A_t^a - D_t^a(P_t^f)\}$$

실제 전달 여부는 경매 낙찰가와 2차시장 가격의 차이, 유찰량과 취소량을 통해 확인하며, 이 관계가 반복해서 성립하지 않으면 가격 전달 가정과 경매비중을 다시 설정해야 한다.

A.3 설비투자자 해석

되돌리기 어려운 설비투자자는 오늘의 가격보다 설비 운영기간의 예상 탄소비용과 정책 지속성에 좌우되며, 규칙이 자주 바뀔 것으로 보이면 기업은 투자 결정을 미룬다. 일시적인 가격상승보다 미리 계산할 수 있는 장기 규칙이 투자 판단에 유용하다는 해석은 실물옵션 이론과도 일치한다(Dixit & Pindyck, 1994).

시작가격과 상승률은 정부가 선택하는 정책값이고, 9만~12만 원은 서로 다른 외부 연구를 종합한 정책가격 범위다. 산업별 배출경로는 생산량 고정, 기술별 가격기준 도달 뒤 10년 선형 도입, CCUS 제외라는 가정 아래 가격경로의 차이를 비교한 결과이므로 실제 배출량이나 K-MSR의 인과효과로 해석하지 않는다.

A.4 자료와 가정

본문의 자료 범위와 핵심 가정은 표 A-1에 요약했다. 공개자료와 내부 마스터 자료를 결합해 수치의 출처와 해석 범위를 구분했으며, 코드와 원자료가 공개되지 않아 제3자가 같은 결과를 다시 계산하는 외부 재현 단계에는 이르지 못했다.

모형 출력은 2026년 7월 12일판, 산업·기술 자료는 8월 9일판이며 계산에는 실측 이월재고 9,210만 톤을 반영했다. 한국거래소 일별 자료는 2015년 1월 12일부터 2026년 7월 8일까지, 등록부는 2015~2024년 집계로 기준시점이 다르기 때문에 같은 시점의 자료로 읽어서는 안 된다.

인접 빈티지 가격차와 이월·예비분은 관측값이고 할인율, 2차시장 전달 정도와 기술 도입 속도는 계산 가정이며, 계산가격과 산업별 배출경로는 그 가정에 따른 결과다. 시작가격과 연간 상승률은 정부가 선택하는 정책값이고, 9만~12만 원은 외부 문헌을 종합한 정책가격 범위다.

표 A-1. 주요 수치·가정과 해석 범위.

검증 항목	핵심 값·가정	연구 자료
자료 범위	KRX 2015.1.12~2026.7.8; 등록부 2015~2024; 산업·기술 자료 2026.8.9판	공개자료와 내부 마스터 자료를 결합
관측과 계산 가정	관측: 이월 9,210만 톤·예비분 8,528만 톤; 가정: 할인율 5.5%, 2차시장 가격 전달률 $\lambda=\{0, 0.575, 0.9\}$; 시나리오 P0·P1·A·B	이월·예비분은 실제값; 할인율· λ 는 계산 가정; A는 완전 전달을 가정
2040년 계산결과	P0의 2040년 계산가격 67,461원	총량·기술비용·감축 가능량·이월 가정에 따라 달라짐
산업전환 가격대	철강 34~68유로 및 한국·일본 46~75달러; 전기 크래킹 100달러 이하 가능; 정책가격 범위 9만~12만 원	산업 연구와 국제 탄소가격을 비교해 정한 범위이며 모든 기업에 동일한 투자 손익분기점이 아님
비교한 가격경로	2026년 4만 원·4만 5,000원·5만 원에서 시작하는 경로; 연 5.5%~7%; 2040년 84,600~128,900원	정부가 선택하는 값이며 미래시장 예측이 아님
산업별 감축경로	2050년 철강·석유화학 1억 400만~1억 500만 톤(완만한 비교경로 1억 2,600만 톤)	2026.7.18 동결 모형; 생산량 고정·문턱 도달 뒤 10년 선형 도입·CCUS 제외
검증 한계	내부 일관성은 확인했으나 코드·원자료는 미공개	외부 재현, 경매수요와 투자반응의 실제 검증은 후속과제

부록 B. 참고문헌

B.1 학술 문헌

- Cattry, A., Vuppanapalli, C., & Mallapragada, D. S. (2025). Comparative reactor, process, techno-economic, and life cycle emissions assessment of ethylene production via electrified and thermal steam cracking. *Green Chemistry*, 27, 13357–13374. doi:10.1039/D5GC02960K
- Dixit, A. K., & Pindyck, R. S. (1994). *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press.
- High-Level Commission on Carbon Prices (2017). *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. Washington, DC: World Bank.
- Kollenberg, S., & Taschini, L. (2019). Dynamic supply adjustment and banking under uncertainty: The Market Stability Reserve. *European Economic Review*, 118, 213–226. doi:10.1016/j.eurocorev.2019.05.013
- Kydland, F. E., & Prescott, E. C. (1977). Rules rather than discretion: The inconsistency of optimal plans. *Journal of Political Economy*, 85(3), 473–491.
- Perino, G., & Willner, M. (2019). Rushing the impatient: Allowance reserves and the time profile of low-carbon investments. *Environmental and Resource Economics*, 74(2), 845–863. doi:10.1007/s10640-019-00350-x
- Rubin, J. D. (1996). A model of intertemporal emission trading, banking, and borrowing. *Journal of Environmental Economics and Management*, 31(3), 269–286. doi:10.1006/jeem.1996.0044
- Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736–745. doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.279
- Weitzman, M. L. (1974). Prices vs. quantities. *Review of Economic Studies*, 41(4), 477–491. doi:10.2307/2296698
- Wu, X., Meng, J., Liang, X., et al. (2025). Technological pathways for cost-effective steel decarbonization. *Nature*, 647, 93–101. doi:10.1038/s41586-025-09658-9

B.2 국내외 1차 자료

- 기후에너지환경부 (2026. 4. 21.). 온실가스 배출권거래법 시행령 일부개정안 국무회의 의결 보도자료(시장안정예비분 제도 법제화, 2026. 4. 29. 시행).
- 온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률[시행 2026.4.29] 제23조 및 같은 법 시행령[시행 2026.4.29] 제38조. 국가법령정보센터.
- 환경부 고시. 배출권거래제 유상할당 등에 관한 경매지침(낙찰 하한가 산정방식).
- 제4차 배출권거래제 기본계획·국가 배출권 할당계획(예비분 8,528만 톤, 잠정치).

한국거래소(KRX) 배출권시장 일별 시세·거래량 및 경매 결과(2015–2026).

배출권 등록부 집계: 연도별 할당량·인증배출량·이월·차입·상쇄(2015–2024).

European Commission (2026). Proposal COM(2026) 153 to amend Decision (EU) 2015/1814 concerning the Market Stability Reserve (MSR), including the proposal to discontinue invalidation above the 400 million allowance threshold.

European Commission (2026). Market Stability Reserve. Climate Action, European Commission.

UK ETS Authority (2026). UK Emissions Trading Scheme (UK ETS): a policy overview. GOV.UK.

UK ETS Authority (2026). Taking part in the UK Emissions Trading Scheme markets. GOV.UK.

California Air Resources Board (2026). Auction Information; Cost Containment Information; 2026 Annual Auction Reserve Price Notice.