자원·환경경제연구 제 31 권 제 2 호
Environmental and Resource Economics Review
Volume 31, Number 2, June 2022 : pp. 261~290
DOI: https://doi.org/10.15266/KEREA.2022.31.2.261

배출권거래제 가격상하한제가 배출량 및 감축비용에 미치는 영향에 대한 정량적 연구†

배경은* · 유태종** · 안영환***

요 약 : 국내 배출권 시장에서는 시장안정화 조치 발동에도 불구하고 배출권 가격의 불확실성 문제가 지속적으로 대두되고 있다. 그리고 2021년 10월 정부가 발표한 2030 감축목표 상향안을 고려해볼 때 배출권 가격의 불확실성 완화를 위한 실질적인 대안 마련의 필요성이 높아지고 있다. 본 연구는 배출권 시장의 가격 불확실성 완화 수단인 가격상하한제가 배출량과 감축비용에 미치는 정량적인 영향을 살펴본다. 분석을 위한 주요 시나리오는 탄소세, 배출권거래제, 가격상하한제하 배출권거래제 3가지로 구분되며, 배출량 불확실성을 반영하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 기반으로 비교 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다: 1) 상하한제 도입 시에는 다른 시나리오 대비 현저히 낮은 감축비용으로 배출목표를 달성할 수 있다. 상향된 감축목표에서는 0.1%의 초과배출이 발생할 수 있으나 상하한 간격이 넓은 경우 안정적인 목표달성이 가능하다. 2) 이월을 제한할수록 감축비용은 상승한다. 이는 이월 제한 정책이 기간 간 효율성을 저해하여 비용효과적인 감축을 어렵게 만들기 때문이다. 3) 상하한제하에서 정부의 배출권 순구매량이 발생해도 순수입은 양이 될 수 있다. 정부는 배출권을 상한가에서 판매하고 하한가에서 구매하기 때문이다.

주제어 : 배출권거래제, 가격상하한제, 이월, 감축비용, 불확실성

JEL 분류 : C6, Q3

접수일(2022년 2월 23일), 수정일(2022년 3월 24일), 게재확정일(2022년 3월 31일)

† 본 연구는 배경은(2021)의 석사학위논문에서 발췌 및 수정한 것이며, "환경부 지식기반 환경서비스 특성화대학원 사업"의 지원으로 수행되었습니다.

* 숙명여자대학교 기후환경에너지학과 기후환경통합모형연구실 석사, 제1저자(e-mail: bv1114@sookmyung.ac.kr)

** 상명대학교 경영학부 부교수, 공저자(e-mail: tju13@smu.ac.kr)

*** 숙명여자대학교 기초교양대학 부교수, 교신저자(e-mail: yh.ahn@sookmyung.ac.kr)

A Quantitative Study of the Effects of a Price Collar in the Korea Emissions Trading System on Emissions and Costs†

Kyungeun Bae*, Taejoung Yoo** and Young-Hwan Ahn***

ABSTRACT : Although market stabilization measures have been triggered in the K-ETS, carbon price is still under uncertainty. Considering Korea's 2030 enhanced reduction target announced in October 2021, it is crucial to have practical stabilization measures to appropriately deal with price uncertainty. This study examines the quantitative effects of a price collar, which is considered as a means of alleviating price uncertainty, on expected cumulative emissions and abatement costs. There are three main scenarios: carbon tax, emissions trading system, and emissions trading system with a price collar. Monte Carlo simulation was conducted to reflect uncertainty in emission. There are several results as follows: 1) In a price collar, domestic emission target is likely to be achieved with a lower expected abatement cost than other scenarios. In addition, there is a small amount of excess emissions in this research and it would be not critical(0.1% excess than target); 2) Prohibiting banking increases the expected abatement cost. This is because firms can not intertemporally reallocate allowances to match the firm's optimal emissions path; 3) With the adoption of a price collar, government's net revenue can be positive even if the government's purchase volume of emissions allowances is more than sales volume. This is because the government sells them at price ceiling and purchases them at price floor.

Keywords : Emissions trading system, Price collar, Abatement costs, Uncertainty

Received: February 23, 2022. Revised: March 24, 2022. Accepted: March 31, 2022.

† This work was supported by the Ministry of Environment's project of graduate school specializing in knowledge-based environmental services.

* Master's Degree, Department of Climate, Environment and Energy Studies, Sookmyung Women's University, First author(e-mail: bv1114@sookmyung.ac.kr)

** Associate Professor, Department of Business Administration, Sangmyung University, Coauthor(e-mail: tju13@smu.ac.kr)

*** Associate Professor, College of General Education, Sookmyung Women's University, Corresponding author(e-mail: yh.ahn@sookmyung.ac.kr)

Ⅰ. 서 론

배출권거래제(Emissions trading system: ETS)는 상이한 한계감축비용(Marginal abatement cost: MAC)을 가진 기업들이 배출권 시장에서 자발적으로 배출권을 거래하며 기업들의 한계감축비용을 같게 하여 비용효과적인 감축을 달성하게 한다. 또한 최초 배출권 분배와 관계없이 한계감축비용이 높은 경우에도 거래를 통해 비용효과적으로 감축할 수 있으며 최소비용으로 감축할 동기부여를 제공한다는 이점을 가진다(Aldy et al., 2012).

그러나 ETS시장에서 배출권가격은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 과도한 불확실성이 발생할 경우, 이를 완화할 수 있는 방법이 수반되어야 한다. 가격 불확실성이 지속될 경우, 온실가스 감축을 위한 기업의 장·단기적인 기술 개발 및 투자 의사결정에 부정적인 영향을 주며 비용효과적인 감축이 어려워질 수 있다. 우리나라 정부는 2015년 국내 배출권거래제(Korea emissions trading system: K-ETS)를 설계할 때 시장안정화 조치를 함께 마련하며 가격 불확실성을 완화하고자 하였다.[1] 그러나 도입 이후 예비분 추가공급 및 최저거래가격 설정의 시장안정화 조치에도 불구하고 가격안정 효과는 미흡했다.[2]

시장의 유동성이 부족한 상황에서 가격 안정화를 위해 그동안 정부가 실질적으로 활용해 온 수단은 이월과 차입의 제한이었다. K-ETS는 초기에 이월에 제한을 두지 않았으나 2017년부터 이월을 제한하고 있다. 2017년 1사분기에 시장에서 배출권 공급 물량이 부족하고 배출권 가격이 단기 급등하였는데, 정부는 그 이유를 기업들이 잉여배출권을 시장에 판매하지 않고 이월에 주로 의존하기 때문인 것으로 보고, 이월을 제한하였다.

---

1) 국내 시장안정화 조치는 온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 제23조와 동 시행령 제38조에 명시되어있다. 안정화 조치는 다음의 발동기준 중 하나를 충족할 경우 발동된다. ; “6개월 연속 직전 2개 연도 평균 가격보다 3배 이상 급등”, “최근 1개월의 평균 거래량이 직전 2개 연도의 같은 월의 평균 거래량 중 많은 경우보다 2배 이상 증가하고, 최근 1개월의 배출권 평균 가격이 직전 2개 연도의 배출권 평균 가격보다 2배 이상 높은 경우”, “최근 1개월의 배출권 평균가격이 직전 2개 연도의 배출권 평균 가격보다 60% 이하 또는 시장에서 거래되는 배출권의 공급이 수요보다 현저하게 부족하여 할당대상업체 간 배출권 거래가 어려운 경우”.(밑줄 친 부분을 근거로 안정화 조치가 각 2차례 발동되었음)

2) 정성적 안정화조치가 실시된 것은 2016년 6월과 2018년 6월이며 안정화 조치로 예비분을 추가로 공급함. 정량적인 기준에 의해 안정화 조치가 실시가 된 것은 2021년 4월과 6월이며 안정화 조치로 배출권 최저가격을 설정함. 정성적인 발동기준은 “시장에서 거래되는 배출권의 공급이 수요보다 현저하게 부족하여 할당대상업체 간 배출권 거래가 어려운 경우”임. 정량적인 발동기준은 각주1)에 명시된 정성적인 기준을 제외한 나머지 기준임.

정부는 이월을 제한함으로써 시장에 배출권 공급을 증가시키고, 그 결과로 시장안정화를 꾀한 것이다. 하지만 기업들이 이월을 선호하는 이유는 미래 배출량과 배출권가격의 불확실성 때문일 수 있다. 불확실성이 완화될 경우 정부의 이월 제한과 상관없이 기업들은 자발적으로 잉여 배출권을 시장에 판매하고 부족배출권을 구매하여 시장을 안정화시킬 수 있다. 따라서 정부는 기간 간 효율성을 저해시키는 이월 제한 정책보다 가격 불확실성 완화에 초점을 맞춰 시장안정화 제도를 운영할 필요가 있다.

2021년 10월 우리나라는 2030 국가온실가스 감축목표를 2030년까지 2018년 대비 26.3% 감축에서 40% 감축으로 상향하였다. 목표 상향에 따라 미래의 탄소 가격은 이전보다 상승할 것으로 예상된다. 높은 탄소 가격은 청정기술에 대한 기업의 투자를 촉진시키겠지만, 가격의 불확실성이 줄어들지 않는다면 투자를 저해하는 요인이 될 수 있다. 이러한 이유로 배출권 가격을 일정 범위 안에서 안정적으로 관리하는 것이 필요하다. 시장안정화 조치로서 가격상하한제는 가격관리 측면에 있어서는 유용하지만, 배출량 관리 관점에서는 목표달성이 어려울 수 있다는 관점이 있다(Pizer, 2002; Jacoby and Ellerman, 2004; Philibert, 2008; Burtraw et al., 2010). 이에 본 연구는 K-ETS에 가격상하한제 도입의 영향을 감축비용과 배출량 관점에서 정량적으로 살펴보고자 한다. 가격상하한제의 영향을 정량적으로 분석한 국내 연구는 그동안 없었기 때문에 이 연구의 분석은 중요한 의의를 가진다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 배출권거래제하 가격상하한제 도입이 ETS 전체의 배출량 및 감축비용에 미치는 영향을 살펴보고 그 시사점을 도출하는 것이다. 가격상하한제 도입에 따른 정량적인 영향 분석을 위해 2018년 및 2021년 각각 발표된 2030 국가온실가스 감축목표 수정안 및 2030 국가결정기여(Nationally determined contributions: NDC) 상향안의 두 가지 국가 목표를 기반으로 분석하였다. 각각 약한 목표와 강한 목표를 대표한다고 볼 수 있다. 분석 결과로는 2021년부터 2030년까지의 총 감축비용과 누적배출량 결과를 제시한다. 분석 시나리오는 탄소세,[3] 배출권거래제, 가격상하한제하 배출권거래제 등의 크게 세 종류가 있으며 가격상하한제의 경우 연구결과로 감축비용과 배출량뿐만 아니라 정부 순수입의 결과도 함께 제시한다. 분석 모형은 Fell and Morgenstern(2010)의

3) 온실가스 감축을 위한 수단으로 탄소세와 ETS가 대표적이기 때문에 동일한 가정하 탄소세와 ETS의 결과를 비교하기 위하여 분석에 포함시킴.

대표적 기업 모형(representative firm model)을 따라 기업의 기간 간 거래에 초점을 맞춰 분석하였다. 분석 결과는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 2,000회 실시하여 도출하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 가격상한제 및 시장 안정화 관련 국내외 선행연구를 살펴본다. III장은 연구에서 사용된 분석 모형과 시나리오에 대해 설명하며, IV장은 각 시나리오별 도출된 연구결과와 시사점을 제시한다. V장에서는 결론을 제시하며 마무리한다.

II. 선행연구 분석

국내 문헌에서 가격상하한에 대한 논의는 시장안정화 조치의 일환 또는 가격통제의 필요성을 중심으로 논의되었다. 먼저 한현옥(2014), 조현진 · 김하나(2016)의 연구에서는 ETS 시장안정화 조치의 필요성과 그 종류를 정리하였으며, 시장안정화 조치 중 하나로 가격상하한제에 대해 정리하였다. 시장안정화 조치는 기업의 부담을 줄이기 위한 것이지만 환경건전성을 위해 효과적으로 제한할 필요가 있음을 강조하였다.

심성희 · 이지웅(2015), 김규림 외(2016), 김영도 외(2017)는 배출권 가격의 변동성을 완화시키는 것과 관련된 연구인데, K-ETS시장은 가격 불확실성에 취약하므로 가격 불확실성을 효과적으로 통제해야함을 강조하였다. 또한 김은정(2015)의 연구는 유럽연합 배출권거래제(European Union Emissions Trading System: EU-ETS) 시장안정화 정책에 관한 것으로 EU-ETS의 과다할당에 따른 배출권 가격하락의 경험을 바탕으로 가격상승뿐만 아니라 가격하락 방지의 중요성을 국내 정책에의 시사점으로 제시하였다.

유종민 · 이지웅(2019, 2020)은 차입과 이월이 배출권 가격에 미치는 영향을 분석한 것으로, 차입과 관련하여 차입한도를 완화시켜 일시적으로 가격상승을 억제할 수 있지만 마지막 이행연도에 다시 상승함을 연구결과로 제시하였다. 또한 이월과 관련하여 이월 제한에 따른 해당 이행연도 배출권 가격은 하락하지만 미래 배출권 가격은 이전과 동일한 추세로 상승한다는 점을 결과로 제시하였다.

국외 문헌에서 가격상하한에 대한 논의는 Roberts and Spence(1976)의 연구에서 배출부과금(effluent charges)과 배출권(effluent licenses)을 결합한 형태를 처음 제시하면

서 시작되었다. 이후 Philibert(2008)는 가격상하한이 비용 불확실성을 낮춰 더 의욕적인 환경정책 채택을 가능하게 한다는 점을 주목하였으며, Burtraw et al.(2010)은 가격상한(safety valve)에 대한 논의를 연장시켜 상한을 대칭하여 상하한을 설정할 경우 환경과 사회적 후생이 개선될 수 있음을 보였다. 또한 미국의회 예산처(2010)는 가격상한에서는 배출량이 상승할 수 있으나 높은 가격을 방지할 수 있으며, 가격하한의 경우 법적 구속력이 있다면 배출량을 감소시킬 것으로 분석하였다. 그리고 하한에서 기업의 기술투자 촉진 등에 따라 단기적으로 가격이 상승하는 효과가 있으나 장기적으로는 하락하는 것으로 분석하였다.

Wood and Jotzo(2011), Fell(2016), Cason et al.(2021)은 가격하한의 효과에 주목하여 분석하였으며 주요 결과로 가격 안정화 및 절감을 위해 가격하한이 중요하다는 점과 하한 적용 시 기술투자 동기부여를 촉진시킬 수 있음을 도출하였다. 또한 Fell and Morgenstern(2010)은 가격상하한제를 포함한 시장안정화 조치별 배출량과 감축비용 결과를 제시하였으며 가격상하한제하 배출권거래제는 다른 안정화 조치보다 낮은 비용으로 배출목표를 달성할 수 있음을 보였다.

Abrell and Rausch(2016)는 EU-ETS에 가격상하한제가 있는 하이브리드 배출권거래제를 적용할 경우 배출저감 목표달성에 필요한 비용을 89%까지 줄일 수 있음을 보였다. Borenstein et al.(2019)은 가격상하한제의 유의점으로써 상하한이 시장에 강한 신호를 제공하여 배출권 가격이 상한선 또는 하한선에서 귀결될 가능성이 높으며 상한과 하한 사이에서 가격이 형성될 수 있는 확률을 높일 수 있도록 관련 방안을 마련해야 한다고 강조하였다. Jian-Xin Guo et al.(2019)은 감축비용과 배출량의 불확실성이 감축비용에 각 7%, 5% 증가 영향을 미쳤으며, 이러한 불확실성이 클수록 미래위험을 낮추기 위해 초기 감축량이 단기적으로 증가함을 보였다.

가격상하한제에 관한 논의를 심화시킨 연성제도(soft price collar)와 경성제도(hard price collar)에 대해서도 다수 연구가 진행되었다(Roberts and Spence, 1976; Murray et al., 2009; Fell et al., 2011).[4] 관련 연구들에서 정리한 연성 및 경성제도의 특징은 다음과 같다. 경성제도의 가격상한은 상한에서 예비분을 무제한으로 공급하여 배출권 가격이

4) Robert and Spence(1976)의 연구에서는 개념 상 경성제도를 제시하고 있으나 용어는 등장하지 않음. 이후 Fell et al.(2011)에서 연성제도라는 용어와 개념을 제시하면서 Robert and Spence(1976)의 연구가 경성제도로 정리됨.

상한가 보다 높아지는 현상을 막는 것을 목적으로 한다. 그러나 경성제도는 상한에서 가격상승을 막기 위해 무제한으로 예비분을 공급하므로 미래 배출목표 달성[5]에 우려가 있다. 이에 상한에서 예비분을 제한적으로 공급한다는 개념의 연성제도가 등장하였다. 연성제도는 가격상하한제의 배출목표달성에 대한 우려를 완화시켜 경성제도의 한계점을 보완하지만 제한된 예비분으로 인해 배출권 가격이 상한가보다 높아지는 현상을 완전히 방지하진 못한다는 한계를 가진다.

위의 논의를 기반으로 각 연구를 살펴보면 Murray et al.(2009)은 Roberts and Spence(1976)의 연구에서 등장한 상한과 하한 각각에서의 구매량과 판매량을 제한하지 않는 경성제도에 관한 논의를 바탕으로 상한에서의 공급량(supply schedule)을 제한하는 연성제도에 대해 처음 논의하였다. 불확실한 대내외적 상황에서 주기적으로 배출권 가격의 관리가 필수적임을 고려할 때 상한에서 구매를 제한하는 것은 초기 배출권 가격이 상한가 근처나 그 밑에서 균형을 유지하는 데 도움을 준다는 것을 밝혔다.

Fell et al.(2011)은 상한에서 투입되는 예비분과 하한에서 회수(buyback)되는 배출권의 규모에 대한 제한을 약화시키며(연성제도에서 경성제도로 변화) 배출량과 감축비용에 대한 영향을 분석하였다. 그 결과 예비분 규모가 증가하면서 감축비용은 낮아지지만 체감효과가 존재한다는 것을 밝혔다. 그리고 대부분의 절감은 약간의 예비분(modest reserve)으로 달성된다고 하였으며, 연성제도가 배출량의 급증 가능성을 낮추면서 감축비용의 절감을 보장할 수 있음을 결과로 제시하였다.

Perkis et al.(2014)는 연성제도와 경성제도의 효과성을 정태적(static) 분석하였으며 특히 상한에 대한 연성제도에 초점을 맞춘 연구를 진행했다. 연성제도의 가격상한에서의 예비분 경매는 특히 최소예비분가격(minimum reserve price)이 적용되면 지속적으로 가격을 조정하기 어렵다는 점을 지적하며 단기적인 가격상승을 효과적으로 제한하기 위해 경성제도의 가격상한에 많은 이점이 있음을 결과로 제시하였다.

Pizer(2002), Jacoby and Ellerman(2004), Philibert(2008), Burtraw et al.(2010), 유종민(2014) 연구에서는 가격상하한제 채택에 따른 몇 가지 우려사항을 제시하였다. 가격상하한제는 가격상한과 하한의 장단점을 모두 가지고 있는 안정화 조치로, 가격상한이 발동하면 가격상한에서 배출권을 정부로부터 무제한 공급받기 때문에 배출량이 상승하

5) Fell et al.(2011)은 이를 환경건전성(environmental integrity)의 문제로 표현하기도 함.

여 배출량 목표 달성이 어려울 수 있다. 또한 가격하한을 채택할 경우 지나친 가격폭락을 막을 수 있지만 가격하한에서 정부가 무제한으로 배출권을 환매하는 데 따른 재정적 부담이 발생할 수 있음을 우려하였다.

국외 선행연구를 통해 가격상하한제를 채택할 경우 배출량 측면에서 목표달성이 어려울 것이라는 관점이 있지만 감축비용측면에서는 불확실성을 낮춰 비용효과적인 감축을 달성할 수 있음을 확인하였다. 위의 선행연구를 참고하며 본 연구에서는 K-ETS에 가격상하한제를 도입할 경우 감축비용과 배출목표 달성 관점에서 정량적인 영향을 살펴보고자 한다.

III. 분석 모형과 시나리오

1. 분석 모형

본 연구에서는 대표적 기업모형의 기간 간 거래(intertemporal trading)에 초점을 맞춰 분석하였다. 여러 선행연구 중 Fell and Morgenstern(2010)의 분석 모형을 참고하여 가격상하한제와 이월 · 차입이 배출량과 감축비용에 미치는 영향을 분석하였다. BAU(Business as Usual) 배출량에 대한 불확실성을 반영하고자 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 예상 누적배출량과 감축비용, 상한에서 대표적 기업의 배출권 판매량, 하한에서 구매량, 정부 순수입의 평균과 분포를 추정하였다. 분석기간은 국내 제3차 배출권거래제 계획기간(2021-2025년)과 제4차 배출권거래제 계획기간(2026-2030년)으로 설정하였다.

대표적 기업의 감축비용은 식 (1)과 같이 배출량의 이차식 형태로 표현한다.

$$\frac{c_t}{2}(\bar{q}_t + \theta_t - q_t)^2 \tag{1}$$

$\bar{q}_t$는 t 연도의 BAU 배출량, θ_t는 t 연도의 BAU 배출량의 불확실성, q_t는 t 연도의 기업의 실제 배출량, c_t는 한계비용함수의 기울기(c_t>0)를 의미한다. 감축비용함수를 볼록(convex) 증가함수로 가정하면 $q_t \leq \overline{q_t} + \theta_t$이다.

이월과 차입이 허용되지 않으면, 기업이 규제를 준수한다는 전제하에 t 연도 기업의 배출량은 동 기간의 할당량 y_t와 동일하다. 그러나 이월과 차입이 도입된 배출권거래제에서는 t 연도 기업의 배출량은 동 연도의 할당량 y_t과 같을 필요는 없다. 이에 이월과 차입이 도입된 기업의 최적화 문제는 식 (2)와 식 (3)으로 표현된다.

$$\max_{q_t} \sum_{t=0}^{T} -\beta^t \frac{c_t}{2}(\bar{q}_t + \theta_t - q_t)^2 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & B_{t+1} = B_t + y_t - q_t \\ & B_{\min,t+1} \leq B_{t+1} \leq B_{\max,t+1} \\ & B_{T+1} \geq 0 \end{aligned} \tag{3}$$

식 (2)는 총 감축비용의 순현재가치(net present value: NPV)를 최소화하는 목적함수로, 감축비용의 마이너스 NPV를 극대화시키는 것으로 표현된다. 이는 식 (1)을 기반으로 할인율β^t이 추가된 것이다. 이때 기업은 제약조건을 만족하며 목적함수를 최대화하는 모든 t 연도의 배출량q_t 을 결정한다. 목적함수 식 (2)에 대한 제약조건은 식 (3)에서 표현된다. 제약조건 중 첫 번째는 t 연도에서 $t+1$ 연도로 넘어가는 이월과 차입 가능한 양을 나타낸다. $t+1$ 연도 이월, 차입 가능 수준 B_{t+1}은 t 연도 할당량 y_t과 배출량 q_t 간 차이에 t 연도 이월, 차입한 양B_t을 더한 값으로 결정된다. 두 번째 제약조건은 이월과 차입에 대한 제한 수준으로 차입제한은 최솟값$B_{\min,t+1}$으로, 이월 제한 값을 최댓값 $B_{\max,\,t+1}$으로 나타낸다. 세 번째 제약조건은 마지막 연도인 T연도에는 잉여배출권이 발생하거나 목표배출량에 맞게 배출함을 의미한다.

배출권 가격의 상한이 있는 경우에 식 (2)와 식 (3)은 다음의 식 (4)와 식 (5)로 변형된다.

$$\max_{q_t,\, q_t^p} \sum_{t=0}^{T} [-\beta^t \frac{c_t}{2}(\bar{q}_t + \theta_t - q_t)^2 - \beta^t P_t^c q_t^p] \tag{4}$$

$$B_{t+1} = B_t + y_t - q_t + q_t^p \tag{5}$$
$$c_t(\bar{q}_t + \theta_t - q_t) \leq P_t^c$$

식 (4)가 식 (2)에서 달라진 점은 상한가P_t^c, 가격상한에서 기업이 구매하는 배출량q_t^p이 추가된 것이며 배출량, 구매량을 최적화한다. 정리하면 가격상한제에 대한 목적함수 식 (4)는 감축비용에서 가격상한에서의 구매대금을 비용$P_t^c q_t^p$으로 포함한다. 식 (5)의 첫 번째 조건은 식 (3)의 첫 번째 조건에서 상한에서의 구매량인 q_t^p가 추가되며 변형된 것이다. 또한 동 조건은 가격상한제가 도입되었을 때 t 연도에서 $t+1$ 연도로 이월과 차입가능한 양을 정의한 것으로 $t+1$ 연도로 이월과 차입할 수 있는 양은 t 연도의 할당량과 t 연도 배출량 간 차이에 t 연도 배출권 구매량을 더한다. 이렇게 t 연도의 이월, 차입 수준을 고려하여 $t+1$ 연도의 이월, 차입량이 결정된다. 식 (5)의 두 번째 조건은 한계감축비용이 가격상한을 벗어나지 않는다는 것을 의미한다.

다음은 배출권 가격의 하한이 있는 경우를 나타낸 것으로 식 (2)와 식 (3)은 다음의 식 (6)과 식 (7)로 변형된다.

$$\max_{q_t,\, q_t^s} \sum_{t=0}^{T} [-\beta^t \frac{c_t}{2}(\bar{q}_t + \theta_t - q_t)^2 + \beta^t P_t^f q_t^s] \tag{6}$$

$$B_{t+1} = B_t + y_t - q_t - q_t^s \tag{7}$$
$$c_t(\bar{q}_t + \theta_t - q_t) \geq P_t^f$$

식 (6)이 식 (2)에서 달라진 점은 하한가P_t^f, 하한에서 기업이 판매하는 배출량q_t^s이 추가된 것으로, 감축비용에서 가격하한에서의 판매수입을 수익$P_t^f q_t^s$으로 포함한다. 식 (7)의 첫 번째 조건은 식 (3)의 첫 번째 조건에서 q_t^s이 추가되며 변형된 것이다. 동 조건은 가격하한제가 도입되었을 때 t 연도에서 $t+1$ 연도로 이월과 차입가능한 양을 정의한 것으로 $t+1$ 연도로 이월과 차입할 수 있는 양은 t 연도의 할당량과 t 연도 배출량 간 차이에

t연도 배출권 판매량을 빼준다. 그리고 t연도의 이월, 차입 수준을 고려하여 $t+1$연도의 이월, 차입량이 결정된다. 식 (7)의 두 번째 조건은 한계감축비용이 가격하한을 벗어나지 않는다는 조건을 의미한다.

식 (8)과 식 (9)는 배출권 가격의 상한과 하한이 있는 경우를 나타낸 것이며 이는 위에서 살펴본 가격상한에 대한 수식(식 (4)와 식 (5))과 가격하한에 대한 수식(식 (6)과 식 (7))을 합친 것이다. 식 (2)와 식 (3)은 다음의 식 (8)과 식 (9)로 변형된다.

$$\max_{q_t,\, q_t^s, q_t^p} \sum_{t=0}^{T} [-\beta^t \frac{c_t}{2}(\bar{q}_t + \theta_t - q_t)^2 - \beta^t P_t^c q_t^p + \beta^t P_t^f q_t^s] \tag{8}$$

$$B_{t+1} = B_t + y_t - q_t + q_t^p - q_t^s \tag{9}$$
$$c_t(\bar{q}_t + \theta_t - q_t) \leq P_t^c$$
$$c_t(\bar{q}_t + \theta_t - q_t) \geq P_t^f$$

식 (8)은 식 (2)에서 상한가P_t^c, 하한가P_t^f, 가격상한에서 기업이 구매하는 배출량q_t^p, 하한에서 기업이 판매하는 배출량q_t^s이 추가된 것이며 배출량, 구매량, 판매량을 최적화한다. 식 (9)의 첫 번째 조건은 식 (3)의 첫 번째 조건에서 q_t^p과 q_t^s이 추가되며 변형된 것이다. 식 (9)는 가격상하한제가 도입되었을 때 t연도에서 $t+1$연도로 이월과 차입가능한 양을 정의한 것으로 $t+1$연도로 이월과 차입할 수 있는 양은 t연도의 할당량과 t연도 배출량 간 차이에 t연도 배출권 구매량을 더하고 t연도 배출권 판매량을 빼준다. 그리고 t연도의 이월, 차입 수준을 고려하여 $t+1$연도의 이월, 차입량이 결정된다. 식 (9)의 두 번째 및 세 번째 조건은 각각 한계감축비용이 가격상한과 가격하한을 벗어나지 않는다는 조건을 의미한다.

탄소세 시나리오에서 배출량q_t은 할당량y_t경로를 따른다고 가정한다. 그리고 정부는 매년 탄소세를 설정하는 데 기업의 한계감축비용$MC(q_t)$과 탄소세가 동일할 것이라고 가정하며 식 (10)과 같은 수식을 설정한다.

$$tax_t = E[c_t(\bar{q}_t + \theta_t - q_t)] = c_t(\bar{q}_t - y_t) \tag{10}$$

식 (10)은 식 (1)을 기반으로 도출된 것으로 연도별 탄소세를 의미한다. $MC(q_t) = tax_t$로 설정함으로써 기업의 연도별 배출량이 식 (11)임을 알 수 있다.

$$q_t = y_t + \theta_t \tag{11}$$

식 (2)에 식 (10)과 식 (11)을 고려하여 탄소세 시나리오에서 기업의 감축비용은 식 (12)를 통해 계산할 수 있다.

$$\sum_{t=0}^{T} \beta^t \frac{c_t}{2} (\bar{q}_t - y_t)^2 \tag{12}$$

탄소세 시나리오에서 기업의 감축비용은 할인율β^t을 고려하며 BAU 배출량에서 할당량을 뺀 값에 한계감축비용을 곱하여 도출된다.

2. 주요 계수 설정

1) BAU 배출량

ETS 대상 기업의 BAU 배출량을 도출하기 위해 현실에서 우리가 관찰할 수 있는 감축 후 실제 배출량과 배출권 가격, 선행연구에서 추정한 국내 산업 · 발전부문의 한계감축비용을 활용하였다. 효율적인 시장 상황에서 배출권 가격과 동일하게 되는 대표 기업의 한계감축비용은 식 (1)로부터 식 (13)과 같이 도출된다. 식 (13)을 BAU 배출량인 $\bar{q}_t$을 중심으로 다시 정리하면 식 (14)와 같다.

$$MC_t = c_t \times (\bar{q}_t - q_t) \tag{13}$$

$$\bar{q}_t = \frac{MC_t}{c_t} + q_t \tag{14}$$

가장 최근 연도의 BAU 배출량을 추정하고 BAU 배출량의 증가율을 반영하여 2030년까지 연도별 BAU 배출량을 전망하였다. 코로나19의 영향을 배제할 수 있는 가장 최근의 실적 연도는 2019년이기 때문에 2019년에 대한 BAU 배출량 추정부터 시작하였다. 먼저 「2019 배출권거래제 운영결과 보고서」의 2019년 배출권 평균거래가격 28,440원/톤을 MC_t로, 2019년 배출인증량 5.87억 톤을 q_t로 사용하였다. 또한 온실가스종합정보센터(2020) 보고서에서 도출된 2019년 한계감축비용 0.001원/톤을 c_t로 사용하였다. 각 수치를 대입하면 2019년 BAU 배출량은 6.16억 톤으로 도출된다. 2019년 값을 기반으로 동 참고문헌에서 도출된 BAU 배출량의 연도별 증가율을 참고하여 2030년까지의 BAU를 전망하였다.[6] 2030년까지 추정된 BAU의 형태는 뒤에 나오는 <그림 1>에서 확인할 수 있다.

2) 전환 및 산업 부문 전체의 목표배출량

배출권거래제 할당량 설정을 위해 전환 및 산업부문 전체의 목표 배출량 설정이 우선되어야 한다. 「2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안(2018.7)」(이하 '로드맵 목표')을 참고하여 연도별 전환부문 및 산업부문 목표배출량을 더하여 연도별 감축목표로 가정하였고 이에 2030년 목표배출량은 5.7억 톤이다.

2021년 발표한 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안(2021.10)」(이하 'NDC 상향안')의 경우, 연도별 목표배출량이 공개되지 않아 별도로 추정하였다. 먼저 2021-2023년까지의 목표는 로드맵 목표와 동일한 것으로 가정하였다. 그리고 NDC 상향안에서 2030년의 부문별 목표배출량을 공개하고 있음에 따라 2030년 목표배출량은 공개된 자료를 활용하였다. 2030년 전환부문은 1.5억 톤이며, 산업부문은 직접배출량 2.2억 톤만 공개되어 있어 간접배출량을 따로 추정하여 합산하였다. 기준연도인 2018년의 산업

6) 「2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안(2018.7)」에 공개된 BAU 배출량은 2015년에 2030년 감축잠재량을 도출하기 위해 사용된 자료임. 감축비용 분석을 위해 최신자료로의 업데이트가 필요하였으며 본 연구에서 2019년을 기반으로 다시 전망하였음.

부문 간접배출량 비중을 도출하여 동일한 비중만큼을 상향 목표에 반영하였으며 산업부문 배출량은 직접과 간접배출량을 포함한 3억 톤으로 추정된다. 이에 2030년 전환부문 및 산업부문의 목표배출량을 더하여 4.5억 톤을 NDC 상향안으로 가정하였다.

2024-2029년까지의 목표는 로드맵 목표를 참고하여 추정하였다. 국가 감축목표는 3년 단위로 동일한 목표를 가지므로, 로드맵 목표에서 3년 단위로 변화하는 기점인 2023년에서 2024년, 2026년에서 2027년, 2029년에서 2030년의 변화율을 도출하였다. 이러한 변화율을 NDC 상향안에도 적용하여 2030년 4.5억 톤 목표배출량에 각 변화율을 곱하여 2024년까지 목표를 역으로 전망하였다.

3) 배출권거래제 할당량

로드맵 목표 기반 배출권거래제 할당량은 「온실가스 배출권거래제 제3차 계획기간(2021~2025년) 국가 배출권 할당계획(2020.9)」의 "제3차 계획기간 배출권 총수량 및 배출허용총량" 부분에 명시되어 있는 "이행연도별 할당량" 표의 사전할당량을 참고하였다. 이때 예비분 항목에서 배출허용총량(cap) 내 포함부분인 기타항목 값을 사전할당량 값에 더하고 제3차 계획기간 이행연도 수만큼 나눠주었다. 이에 2021-2025년 연도별 할당량은 '사전할당량'과 '이행연도 수만큼 나눈 예비분'을 합친 값으로 설정하였다.

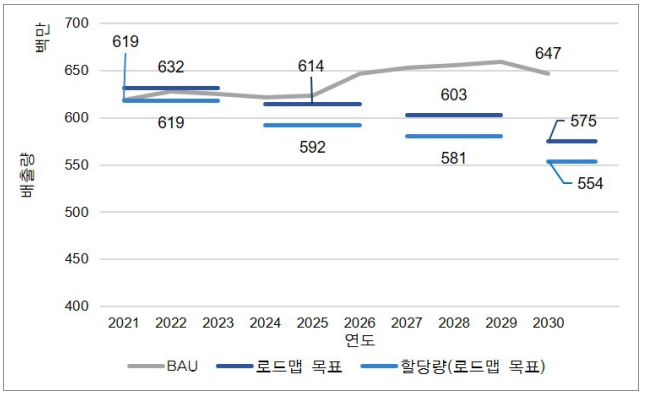
제4차 계획기간의 할당계획은 아직 확정되지 않았는데 본 연구를 위해 제3차 계획기간의 사전할당량을 참고하여 제4차 계획기간의 할당량을 설정하였다. 먼저 로드맵 목표배출량 중 배출권거래제 할당량이 차지하는 비중을 도출하였다. 이때 로드맵 목표는 3년 단위 동일한 목표인 점을 감안하여 2026년 할당량은 2024년 및 2025년과 동일한 값을 적용하였으며 2027-2030년까지는 2025년의 로드맵 목표배출량 대비 ETS 할당량의 비중을 구하여 동일한 비중을 목표배출량에 곱하여 할당량을 도출하였다.

NDC 상향안에서의 배출권거래제 할당량은 로드맵 목표 하 할당량을 참고하여 추정하였다. 먼저 2021-2023년은 로드맵 목표배출량과 상향 목표배출량을 동일하다고 가정하였음에 따라 할당량도 동일하다고 가정하였다. 앞서 추정한 로드맵 목표배출량에서 배출권거래제가 차지하는 비중을 사용하여 NDC 상향안의 배출량에 연도별 비중을 곱한 값을 2024-2030년의 NDC 상향안에서의 할당량이라 가정하였다.

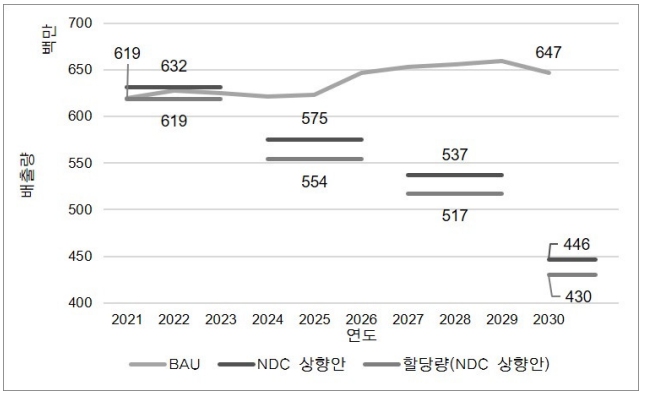
<그림 1>은 위에서 설명한 주요 계수인 BAU 배출량, 로드맵 목표배출량과 배출권거

래제 할당량을 한 그래프에 나타낸 것이다. <그림 2>는 BAU 배출량, NDC 상향안의 목표배출량, 배출권거래제 할당량을 그래프로 나타낸 것이다.

〈그림 1〉 BAU 배출량, 로드맵 목표, 할당량 그래프(2021–2030년)



〈그림 2〉 BAU 배출량, NDC 상향안, 할당량 그래프(2021–2030년)



4) 이월과 차입

이월과 차입은 무제한 이월과 차입, 제한된 이월과 차입, 금지된 이월과 차입의 시나리오로 구성하였다. 무제한 이월과 차입은 연도별 이월과 차입량에 대한 제한이 없다는 의미고, 금지된 이월과 차입은 연도별 이월과 차입이 불가능한 경우를 의미한다. 이 중

제한된 이월과 차입은 연도별 이월과 차입이 가능하지만 제한된 범위 안에서 가능하다는 의미다. 이월과 차입의 제한수준은「2019 배출권거래제 운영결과보고서」를 참고하여 2015-2019년 실적을 기반으로 설정하였다. 동 기간 동안의 실적 중 가장 큰 비중의 이월과 차입을 한 조합으로 설정하였고, 가장 작은 비중의 이월과 차입을 또 다른 조합으로 설정하였다.

「2019 배출권거래제 운영결과보고서」에서 "최종제출량 대비 이월량 비중(%)" 중 가장 큰 비중인 2017년 6.6%와 가장 작은 비중인 2019년 2.9%를 각각 이월 제한수준으로 가정하였다. 그리고 "최종제출량 대비 차입량 비중(%)" 중 가장 큰 비중인 2016년 2.7%와 가장 작은 비중인 2018년 0.9%를 차입 제한수준으로 가정하였다. 최종적으로 가장 큰 비중 조합인 '이월 6.6%, 차입 2.7% 제한'과 가장 작은 비중 조합인 '이월 2.9%, 차입 0.9% 제한'을 설정하였다.[7)]

5) BAU 배출량의 불확실성

본 연구에서는 BAU 배출량의 불확실성θ_t의 영향을 반영하기 위해서 몬테카를로 시뮬레이션 2,000회를 실시하였다. BAU 배출량의 불확실성을 포함한다는 것은 앞서 도출한 BAU 배출량이 사회경제적인 이유 등 예상치 못한 여러 가지 변수로 인해 변동할 수 있음에 따라 이러한 변동성을 고려했을 때의 배출량과 감축비용의 결과를 분석한다는 것이다. BAU 배출량의 불확실성은 선행연구 Fell and Morgenstern(2010)의 모형을 참고하였다.

BAU 배출량의 불확실성은 기간 간 상관성이 있음을 가정하고 자기회귀 과정(autoregressive process)을 통해 추정되며 관련된 사항을 식 (15)를 통해 살펴볼 수 있다.

$$\theta_t = \widetilde{\theta_t}(1+g_\theta)^t \tag{15}$$
$$\widetilde{\theta_t} = \rho\widetilde{\theta}_{t-1} + \epsilon_t$$
$$\epsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$$

7) 시뮬레이션 결과, 초기연도에 이월의 초과수요로 차입이 발생하지 않아 이월만 중심적으로 분석함.

식 (15)를 보면 ϵ_t 는 평균 0, 분산 σ^2 인 정규분포를 따르며, 표준편차는 연도별 BAU 배출량의 5%로 가정한다. $\widetilde{\theta_t}$ 는 1차원 전까지 변수로 고려하는 AR(1)이며 이때 ρ는 불확실성의 상관계수(correlation factor for the shocks)로, Newell and Pizer(2003) 선행연구를 참고하여 0.8로 설정하였다. g_θ는 '연도별 BAU 배출량 불확실성 증가율(growth in shock)'을 의미하고 Fell and Morgenstern(2010)를 따라서 '연도별 BAU 배출량 증가율'은 '연도별 BAU 배출량 불확실성 증가율'과 같은 값을 사용하였으며 본 연구에서는 초기 값으로 1.44%를 활용하였다.

앞에서 논의한 계수를 포함한 주요 계수를 정리하면 아래 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 분석을 위한 주요 계수

계수	값	의미	설명 및 출처
$\bar{q}_0$	6.19억 톤	초기 BAU 배출량	2019년 K-ETS 기반 전망
y_0	6.18억 톤	초기 배출권거래제 할당량	제3차 배출권거래제 할당계획 참고하여 저자 재구성
c_0	10만원/억 톤	$MC(q_t)$의 초기 기울기	온실가스종합정보센터(2020) 보고서 참고
σ	0.31억 톤	초기 불확실성 표준편차	BAU 배출량의 5%(Fell and Morgenstern, 2010)
ρ	0.8	불확실성의 상관계수	Newell and Pizer, 2003
B_t	0	초기 이월과 차입 가능수준	-
$B_{\max,t+1}$	$0.029y_{t+1}$ 또는 $0.066y_{t+1}$	$t+1$기 이월 제한수준	이월 제한은 2.9% 또는 6.6% 가정
$B_{\min,t+1}$	$-0.009y_{t+1}$ 또는 $-0.027y_{t+1}$	$t+1$기 차입 제한수준	차입제한은 0.9% 또는 2.7% 가정
β^t	1	초기 사회적 할인율	예비타당성조사 수행 총괄지침 제50조(사회적 할인율)에 따라 할인율은 4.5%를 사용하였으며, 이는 $t+1$기부터 적용
θ_0	0	초기 BAU 배출량 불확실성	-
g_θ	0.014	초기 BAU 배출량 불확실성 증가율	0.014는 초기연도 BAU 배출량의 증가율을 의미
T	9	마지막 연도	2021년부터 2030년까지

3. 분석 시나리오

본 연구의 분석 시나리오는 로드맵 목표와 NDC 상향안의 크게 두 가지 목표를 기반으로 각 탄소세, 배출권거래제, 가격상하한제하의 배출권거래제로 구성하였으며 시나리오 구성은 <표 2>와 같이 정리된다. 각 시나리오의 결과는 2021-2030년 누적배출량과 총 감축비용의 NPV로 제시되며 가격상하한제 시나리오에서는 정부 순수입 결과와 상한과 하한에서의 구매량과 판매량도 결과로 정리한다.[8)]

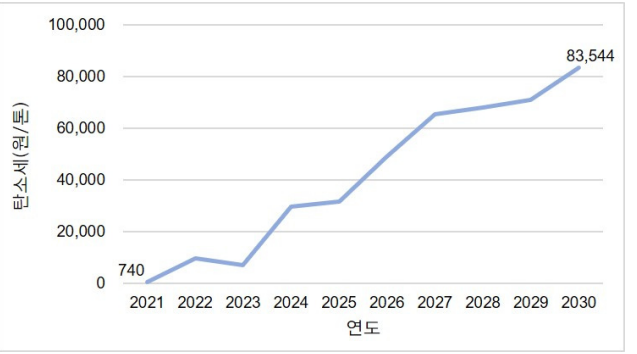
〈표 2〉 시나리오 구성

No.	로드맵 목표 시나리오	No.	NDC 상향안 시나리오
1	탄소세	4	탄소세
2-1	ETS, 무제한 이월과 차입	5-1	ETS, 무제한 이월과 차입
2-2	ETS, 이월 6.6%와 차입 2.7% 제한	5-2	ETS, 이월 6.6%와 차입 2.7% 제한
2-3	ETS, 이월 2.9%와 차입 0.9% 제한	5-3	ETS, 이월 2.9%와 차입 0.9% 제한
2-4	ETS, 금지된 이월과 차입	5-4	ETS, 금지된 이월과 차입
3-1	ETS 가격상하한 10%, 무제한 이월과 차입	6-1	ETS 가격상하한 10%, 무제한 이월과 차입
3-2	ETS 가격상하한 20%, 무제한 이월과 차입	6-2	ETS 가격상하한 20%, 무제한 이월과 차입
3-3	ETS 가격상하한 30%, 무제한 이월과 차입	6-3	ETS 가격상하한 30%, 무제한 이월과 차입
3-4	ETS 가격상하한 40%, 무제한 이월과 차입	6-4	ETS 가격상하한 40%, 무제한 이월과 차입

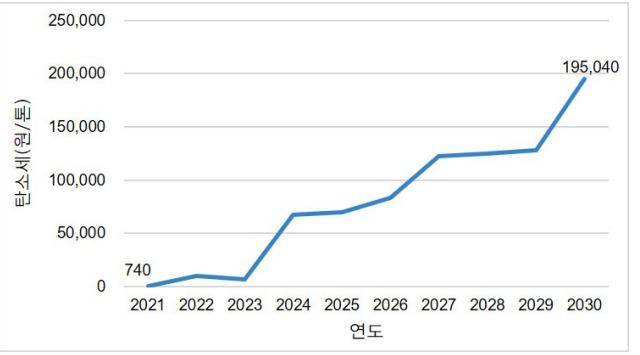
시나리오에서 탄소세부터 살펴보면, 연도별 탄소세는 식 (6)을 사용하여 도출되며 <그림 3>과 <그림 4>는 각 로드맵 목표와 NDC 상향안을 기반으로 했을 때 연도별 탄소세를 도출한 것이다. 로드맵 목표와 NDC 상향안에서의 탄소세는 주요 계수가 동일한 2021-2023년 동안에는 동일한 값을 가진다. 이후 로드맵 목표에서는 2030년 탄소세가 83,544원/톤이 될 것으로 전망되며 NDC 상향안에서는 195,040원/톤이 될 것으로 전망된다.

8) 가격상하한의 결과에서 감축비용은 기업이 가격상한에서 배출권을 구매할 때 발생하는 기업의 추가비용 또는 가격하한에서의 배출권 판매에 따른 비용절감은 포함시키지 않음.

〈그림 3〉 로드맵 목표 기반 연도별 탄소세



〈그림 4〉 NDC 상향안 기반 연도별 탄소세

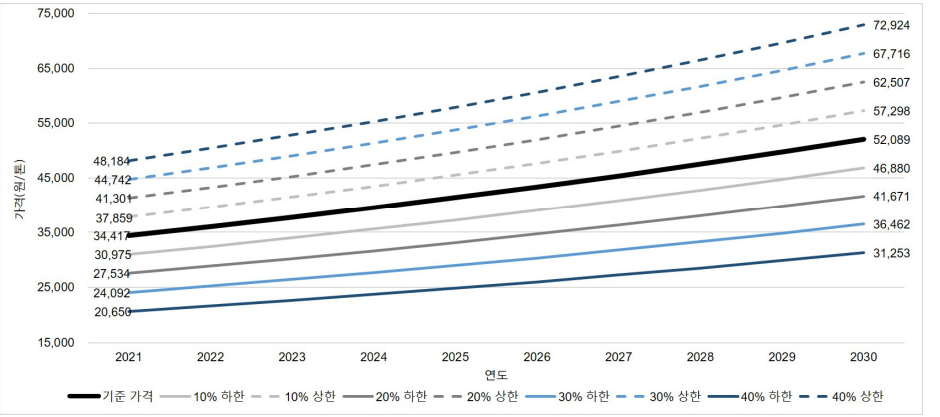


배출권거래제 시나리오에서는 이월과 차입의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 다양한 이월과 차입 조건을 상정하여 분석을 진행하였다. 배출권거래제에서는 1) 무제한 이월과 차입, 2) 제한된 이월과 차입(이월 6.6% 제한과 차입 2.7% 제한, 이월 2.9% 제한과 차입 0.9% 제한), 3) 금지된 이월과 차입을 가정하였으며, 배출권거래제하 가격상하한 시나리오에서는 무제한 이월과 차입의 경우를 분석하였다.

가격상하한제하 배출권거래제 시나리오에서는 가격상한과 하한 간격이 배출량과 감축비용에 미치는 영향을 살펴보기 위해 기준가격을 기점으로 위아래 각각 10, 20, 30, 40% 의 네 가지 폭을 설정하였다. 기준가격은 본 연구의 '배출권거래제의 무제한 이월, 차입 시나리오' 결과에서 도출한 연도별 한계감축비용을 기준가격으로 설정하였다. 예

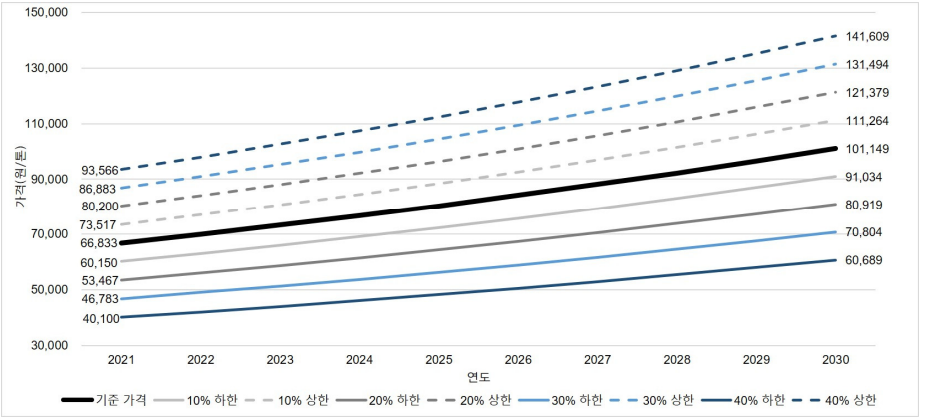
를 들어 기준가격을 기점으로 기준가격의 10%만큼을 기준가격에 더해줄 경우 가격상한이 되고, 반대로 삭감할 경우 가격하한이 된다. <그림 5>는 로드맵 목표 시나리오에서의 기준가격과 네 가지 종류의 가격상하한을 보여준다. 마찬가지로 <그림 6>은 NDC 상향안 시나리오에서의 기준가격과 네 가지 종류의 가격상하한을 보여준다.

〈그림 5〉 로드맵 목표의 기준가격과 가격상하한(10–40% 폭)



*2021-2030년의 로드맵 목표를 기반으로 하는 가격상하한 그림이며, 할인율 4.5%를 적용할 경우 연도별 동일한 한계감축비용이 형성됨.

〈그림 6〉 NDC 상향안의 기준가격과 가격상하한(10–40% 폭)



*2021-2030년의 NDC 상향안을 기반으로 하는 가격상하한 그림이며, 할인율 4.5%를 적용할 경우 연도별 동일한 한계감축비용이 형성됨.

Ⅳ. 분석 결과 및 논의

본 분석의 결과는 각 시나리오별 2021-2030년 누적배출량과 총 감축비용의 NPV로 제시되며 배출량 불확실성을 반영하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 2,000회를 실시하였다. 가격상하한제 시나리오의 경우 가격상한에서 기업의 배출권 구매, 하한에서 배출권 판매가 발생하므로 각 구매량과 판매량 결과를 제시한다. 반대로 상한에서는 정부의 배출권 판매, 하한에서 구매가 발생하기 때문에 정부순수입의 NPV 결과도 제시한다.

앞에서 설명한 18가지 시나리오의 배출량과 비용 결과는 다음의 <표 3>에 정리되어 있다. 대부분의 경우 평균적으로 누적배출량 결과는 목표를 달성할 수 있을 것으로 전망된다. 다만 탄소세(1, 4)[9]의 경우 총량을 규제하지 않기 때문에 로드맵 목표와 NDC 상향안의 시나리오에서 평균적으로 누적배출량이 목표 대비 0.1% 초과할 수 있는 것으로 나타났다. 상위 2.5% 결과에서는 누적배출량이 각각 0.3%, 0.4%까지 초과할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, NDC 상향안의 가격상하한 폭 10%(6-1)와 20%(6-2) 시나리오에서 누적배출량이 목표 대비 0.1% 초과할 수 있는 것으로 도출되었다. 역시 상위 2.5% 결과에서는 누적배출량이 0.3% 초과하고 있다. 가격상하한 폭을 30% 또는 40%로 상대적으로 넓게 설정할 경우 상위 2.5%의 배출량 결과가 0.1~0.2% 초과로 완화된다.

로드맵 목표 시나리오(1 ~ 3-4)와 NDC 상향안 시나리오(4 ~ 6-4)에서 공통적으로 배출권거래제하 이월과 차입을 금지시켰을 경우(2-4, 5-4)의 배출량이 가장 낮다. 이 경우에서는 기업의 배출량은 BAU 배출량의 불확실성 영향에 따라 't 연도 BAU 배출량 > t 연도 할당량'인 경우 할당량을 따르고 't 연도 BAU 배출량 < t 연도 할당량'인 경우 BAU 배출량을 따른다. 즉 배출량은 할당량 또는 할당량보다 낮은 경로를 따른다. 이에 평균적으로 목표 대비 낮은 배출량을 가진다.

배출권거래제 시나리오(2-1 ~ 2-4, 5-1 ~ 5-4)에서 무제한 이월, 제한된 이월 6.6%와 2.9%, 금지된 이월의 감축비용 결과를 살펴보면 '금지된 이월(2-4, 5-4) > 이월 2.9% 제한(2-3, 5-3) > 이월 6.6% 제한(2-2, 5-2) > 무제한 이월(2-1, 5-1)' 순으로 감축비용이 크다. 배출권 이월에 대한 제약이 적을수록 기업들은 연도간 한계감축비용을 최대한 같

9) 괄호 안 숫자는 <표 2>에서 부여한 시나리오 번호를 의미

게 함으로써 감축비용의 NPV를 최소화할 수 있기 때문에 나온 결과이다. 이는 반대로 이월을 제한하거나 금지하는 정책은 기업의 시간적 유연성(temporal flexibility)을 제약하여 비용효과적인 감축을 어렵게 만든다는 이론적 추론과 일치하는 결과이다.

〈표 3〉 각 시나리오별 배출량과 감축비용 결과

시나리오[3]	'21–'30년 누적배출량(억 톤)			'21–'30년 총 감축비용 NPV(조 원)		
	2.5%	평균	97.5%	2.5%	평균	97.5%
1	59.2 (−0.1%)	59.3 (△0.1%)	59.5 (△0.4%)	10.1	10.1	10.1
2-1	59.1 (−0.2%)	59.2 (−0.2%)	59.2 (−0.2%)	11.5	12.1	12.7
2-2	59.2 (0.0%)	59.3 (0.0%)	59.3 (0.0%)	14.4	15.0	15.6
2-3	59.3 (0.0%)	59.3 (0.0%)	59.3 (0.0%)	15.7	16.4	17.0
2-4	58.8 (−0.8%)	58.8 (−0.8%)	58.8 (−0.7%)	16.3	17.0	17.7
3-1	59.1 (−0.3%)	59.2 (−0.1%)	59.4 (△0.2%)	7.8	7.9	8.0
3-2	59.1 (−0.3%)	59.2 (−0.1%)	59.3 (△0.1%)	7.9	8.0	8.2
3-3	59.1 (−0.2%)	59.2 (−0.1%)	59.3 (△0.1%)	8.1	8.3	8.5
3-4	59.1 (−0.2%)	59.2 (−0.1%)	59.3 (△0.1%)	8.5	8.7	8.9
4	54.9 (−0.2%)	55.1 (△0.1%)	55.2 (△0.3%)	40.0	40.0	40.0
5-1	55.0 (0.0%)	55.0 (0.0%)	55.0 (0.0%)	32.2	33.2	34.2
5-2	55.0 (0.0%)	55.0 (0.0%)	55.0 (0.0%)	41.7	42.8	43.9
5-3	55.0 (0.0%)	55.0 (0.0%)	55.0 (0.0%)	44.3	45.3	46.4
5-4	54.7 (−0.5%)	54.7 (−0.5%)	54.8 (−0.4%)	46.8	47.9	49.1
6-1	54.9 (−0.1%)	55.1 (△0.1%)	55.1 (△0.3%)	29.6	29.8	30.0
6-2	55.0 (−0.1%)	55.1 (△0.1%)	55.1 (△0.3%)	30.0	30.4	30.8
6-3	55.0 (−0.1%)	55.0 (0.0%)	55.1 (△0.2%)	30.4	31.0	31.6

〈표 3〉 각 시나리오별 배출량과 감축비용 결과 (계속)

시나리오[3]	'21-'30년 누적배출량(억 톤)			'21-'30년 총 감축비용 NPV(조 원)		
	2.5%	평균	97.5%	2.5%	평균	97.5%
6-4	55.0 (-0.1%)	55.0 (0.0%)	55.1 (△0.1%)	30.7	31.4	32.1

주: 1) 괄호 안 수치는 증감률(증가는 숫자 앞에 '△', 감소는 '-'표시)을 의미함. 증감률은 총할당량 대비 총배출량 값을 비교한 것임. 시나리오 1~3-4까지는 총할당량 59.3억 톤을 기준으로 하며, 시나리오 4~6-4까지는 총할당량 55.0억 톤을 기준으로 함.
2) 배출량과 감축비용 결과는 95% 신뢰구간 하에서 분포를 추정하였으며 각 결과 값은 소수점 두 번째 자리에서 반올림하였음
3) 시뮬레이션 분석결과, 이월에 대한 초과수요가 발생하면서 차입이 발생하지 않았음에 따라 본 연구에서는 이월에 대한 영향만 분석하였음. 초과수요 이유는 초기 할당량이 BAU 배출량보다 높다는 것과 시간이 갈수록 필요감축량이 많아지는 것임.

가격상하한제의 감축비용 관점에서는 10%(3-1) 폭에서 평균 7.9조 원, 20%(3-2)는 평균 8.0조 원, 30%(3-3)는 평균 8.3조 원, 40%(3-4)는 평균 8.7조 원으로 폭이 넓어질수록 증가한다. NDC 상향안 시나리오에서도 각 평균 29.8조 원(6-1), 30.4조 원(6-2), 31.0조 원(6-3), 31.4조 원(6-4)으로 폭이 넓어질수록 비용이 증가한다. 비용 관점과 유사한 맥락으로 배출량 관점에서 로드맵 목표와 NDC 상향안 시나리오(3-1 ~ 3-4, 6-1 ~ 6-4) 결과에 따르면 상하한 폭이 넓어질수록 배출량은 감소한다. 상하한 폭이 넓어짐에 따라 비용 증가 및 배출량 감소가 나타나는 이유는 양을 규제하는 ETS에 가까워지기 때문이다.

가격상하한제의 배출량은 기업이 가격상한에서 구매한 배출량과 가격하한에서 판매한 배출량의 영향을 받는다. 예를 들어 구매량보다 판매량이 더 많은 경우 목표 대비 낮은 배출량을 가지며 반대의 경우에는 목표 대비 높은 배출량을 가진다. <표 4>는 각 시나리오별 가격상하한제에서의 기업의 누적 구매량, 누적 판매량과 순구매량을 보여주고 있다. 로드맵 목표 시나리오에서 가격상하한제 시나리오인 3-1, 3-2, 3-3, 3-4는 평균과 하위 2.5%에서 순구매량이 음수로, 순판매량이 발생한다. 순판매량은 평균 4백만 톤 또는 5백만 톤, 하위 2.5%에서 13~16백만 톤 수준으로 <표 3>의 동 시나리오에서의 배출량은 목표보다 낮게 배출하는 데 이는 <표 4>의 순판매량 만큼 적게 배출하는 것이다. 반면에 NDC 상향안 기반에서 시나리오 6-1, 6-2, 6-3, 6-4는 평균(6-4 제외)과 상위 2.5%에서 순구매량이 발생한다. 이는 <표 3>의 동 시나리오에서 초과하는 배출량과 일치한다. 다만 <표 3>의 배출량 결과에서 시나리오 6-3은 소수점 두 번째 자리에서 반올림하

〈표 4〉 ETS 가격상하한제에서 기업의 구매량, 판매량과 순구매량 결과

(단위: 억 톤)

시나리오	'21–'30년 누적구매량			'21–'30년 누적판매량			'21–'30년 순구매량		
	2.5%	평균	97.5%	2.5%	평균	97.5%	2.5%	평균	97.5%
3-1	1.01	1.08	1.15	1.04	1.12	1.20	−0.16	−0.04	0.09
3-2	0.81	0.88	0.94	0.86	0.93	1.00	−0.16	−0.05	0.06
3-3	0.70	0.76	0.82	0.65	0.71	0.77	−0.14	−0.05	0.05
3-4	0.52	0.58	0.63	0.56	0.62	0.68	−0.13	−0.04	0.05
6-1	0.85	0.92	0.99	0.80	0.87	0.94	−0.07	0.05	0.16
6-2	0.57	0.63	0.69	0.52	0.57	0.62	−0.03	0.06	0.15
6-3	0.35	0.40	0.45	0.34	0.38	0.42	−0.05	0.02	0.09
6-4	0.20	0.23	0.27	0.19	0.23	0.26	−0.04	0.00	0.05

주: 판매량과 구매량 표에서는 결과설명을 위해 소수점 셋째 자리에서 반올림하였음.

면서 평균적으로 초과배출이 없는 것으로 보이지만 <표 4>를 통해 소수점 둘째자리 이후에서 2백만 톤 초과배출이 발생하는 것을 알 수 있다.

로드맵 목표와 NDC 상향안 기반으로 정부 순수입을 분석한 결과는 <표 5>에 정리되어 있다. 정부 순수입은 가격상하한제에서 정부가 상한가로 배출권을 판매하여 얻은 수입과 하한가로 구매하면서 발생한 비용 간의 차이를 의미한다. 분석 결과에 따르면 정부 입장에서 구매비용보다 판매수입이 더 많기 때문에 순수입이 발생한다. 위의 <표 4>는 시나리오별 기업의 상한 구매량과 하한 판매량을 보여주는데 이는 정부 판매량과 정부 구매량을 의미하기도 한다. 전반적으로 각 판매량과 구매량은 비슷한 수준에서 발생한다. 예를 들어 로드맵 목표 시나리오의 상하한 10%인 경우(3-1) 구매량은 평균 1.08억 톤이고 판매량은 평균 1.12억 톤으로 판매량과 구매량의 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한 정부는 상대적으로 높은 가격인 상한가에서 기업에게 배출권을 판매하고 낮은 가격인 하한가에서 배출권을 구매한다. 정리하자면 각 판매량과 구매량이 비슷한 상황에서 정부가 판매하는 가격이 상한가, 구매하는 가격이 하한가이기 때문에 정부 입장에서는 순수입이 발생하는 것이다.

〈표 5〉 ETS 가격상하한제에서 정부의 판매수입, 구매비용, 순수입 결과

(단위: 조 원)

시나리오	판매수입 NPV			구매비용 NPV			순수입 NPV		
	2.5%	평균	97.5%	2.5%	평균	97.5%	2.5%	평균	97.5%
3-1	3.8	4.1	4.4	3.2	3.5	3.7	0.2	0.6	1.1
3-2	3.3	3.6	3.9	2.4	2.6	2.7	0.7	1.1	1.4
3-3	2.9	3.2	3.5	1.7	1.8	2.0	1.0	1.4	1.7
3-4	2.5	2.8	3.1	1.2	1.3	1.4	1.2	1.5	1.8
6-1	6.2	6.7	7.2	4.8	5.2	5.7	0.8	1.5	2.3
6-2	4.6	5.0	5.5	2.8	3.1	3.3	1.4	2.0	2.6
6-3	3.1	3.5	3.9	1.6	1.8	2.0	1.2	1.7	2.2
6-4	1.9	2.2	2.5	0.8	0.9	1.0	0.9	1.3	1.6

앞의 분석 결과를 바탕으로 본 연구의 시사점을 논의해 보도록 하자. 먼저, 기업의 감축비용 관점에서 보자면, 가격상하한제하의 배출권거래제도는 탄소세 시나리오나 가격상하한제가 없는 배출권거래제도에 비해 월등하다고 할 수 있다. 이월 및 차입에 대한 제약이 없는 시나리오(2-1, 5-1)보다 가격상하한제하의 배출권거래제도 시나리오(3-1 ~ 3-4, 6-1 ~ 6-4)에서 기업의 감축비용이 훨씬 낮다. 무제한 이월차입으로 인한 시간적 유연성은 두 제도 모두 제공하지만, 가격상하한제에서는 가격상한과 하한이라는 추가적인 수단을 기업에게 제공함으로써 기업의 감축비용을 줄일 수 있기 때문이다.

가격상하한제 도입 시 가장 우려되는 부분 중의 하나는 배출량 목표 달성 여부이다. 가격상한제를 통해 배출권을 너무 많이 판매하게 되면 배출권 총량관리에 실패함으로써 배출량 목표를 크게 벗어날 수 있다. 하지만, 본 연구의 결과 온실가스 감축목표가 약할 경우 가격상하한제가 도입된 상황에서 기업들은 하한가 수준까지 한계감축비용을 올리기 위해 추가적으로 감축할 수 있다. 즉, 목표가 약한 경우에 가격상하한제에서는 기업들에게 배출권을 하한에서 판매하게 함으로써 오히려 배출감축에 도움이 될 수 있다(하위 2.5%와 평균). 또한, 온실가스 감축 목표가 강하더라도 정부의 배출권 순판매비중이 높지 않고 배출권 가격상하한이 간격이 넓으면 이러한 경향도 약해지는 것을 확인하였다. 물론 가격상하한의 폭이 너무 넓으면 가격상하한제의 도입 취지가 무색해질 수 있다. 가격상하한의 도입 취지는 가격에 대한 불확실성을 완화하는 것인데, 가격상하한의 폭

이 너무 넓으면 이러한 목적의 달성이 어려울 수 있다. 적절한 평균 탄소가격 추정이 이루어진다면, 가격상하한 30%나 40%는 그렇게 넓은 폭이 아닐 수 있다. 현실 적용에 있어서 더 큰 이슈는 기준이 되는 정확한 평균 탄소가격의 추정이 될 수 있을 것이다.

가격상하한제 도입 시 또 다른 우려 중의 하나는 하한에서의 배출권 구매를 위한 정부의 추가적인 재원이 마련되어야 한다는 것이다. 본 연구의 분석 결과, 온실가스 감축목표가 낮아서 정부의 배출권 순구매량이 발생하더라도 정부의 순수입은 음이 아니라 양이 될 수 있다. 정부가 배출권을 판매할 때는 가격 상한에서 판매를 하고, 배출권을 구매할 때는 가격 하한에서 구매하기 때문에 전체 경로의 관점에서 보면 정부의 배출권 순구매량이 양이더라도 정부의 순수입 역시 양이 될 수 있는 것이다.

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 배출권거래제 가격상하한제 도입에 따른 영향을 분석하기 위해 탄소세, 배출권거래제, 가격상하한제하의 배출권거래제 등 크게 세 종류의 시나리오를 설정하였다. 각 시나리오는「국가온실가스 감축 로드맵(2018)」과「국가온실가스 감축 상향안(2021)」의 목표배출량을 반영하여 구성하였으며 몬테카를로 시뮬레이션 2,000회를 실시한 것이다. 결과로서 2021-2030년 누적 배출량과 총 감축비용을 도출하였으며, 가격상하한제 시나리오에서는 상한과 하한에서의 기업의 각 구매량과 판매량, 정부의 순수입을 결과로 제시하였다. 가격상하한제가 없는 배출권거래제는 무제한 이월과 차입, 제한된 이월과 차입, 금지된 이월과 차입으로 나눠 분석을 진행하였다. 또한 가격상하한제의 경우 가격상하한 폭에 따른 특징을 살펴보기 위해 기준가격을 기점으로 위아래 10%, 20%, 30%, 40%의 상한과 하한을 설정하였다.

위의 내용에 대해 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 배출권거래제하 가격상하한제를 도입하면 대부분 배출량 목표를 달성할 수 있다. 다만 강화된 목표인 NDC 상향안을 기반으로 분석된 가격상하한 시나리오에서 폭이 10% 및 20%일 때 배출량은 목표 대비 평균 0.1% 초과하는 것으로 분석되었다. 상위 2.5%에서도 초과율은 최대 0.3%로 나타났지만 초과율은 목표달성을 저해하는 수준이 아니라고 판단된다. 그럼에도 불구하고 엄격한 목표달성 관점에서 강화된 목표를 가질 때 폭을 30%, 40%로 10%, 20%

보다 상대적으로 넓게 설정하면 배출목표달성이 가능할 수 있다. 하지만, 이때 가격의 불확실성은 상대적으로 더 커지는 길항(trade-off)관계가 존재한다는 점을 인식할 필요성이 있다.

둘째, 배출권거래제의 금지된 이월과 차입의 시나리오는 분석된 결과 중 가장 낮은 배출량을 가지는 반면, 감축비용은 높은 것으로 나타났다. 배출량이 낮은 이유는 기업의 연도별 배출량이 BAU 배출량과 할당량 중 더 낮은 배출량을 따르기 때문이다. 배출량은 낮지만, 총 감축비용은 높은 것으로 분석되었다. 이월을 제한하고 금지하는 것은 전 기간에 걸쳐 기업이 비용최적화하는 배출량 의사결정을 어렵게 만들기 때문이다.

위 결과에 따른 시사점을 정리해보면, 비용 관점에서 가격상하한제의 감축비용은 다른 시나리오보다 가장 낮다. 이월과 차입이 허용되는 배출권거래제 시나리오보다 낮은데 가격상하한제는 시간적 유연성뿐만 아니라 상한과 하한이라는 추가적인 유연성을 제공하기 때문이다. 또한 배출량 관점에서 가격상하한제의 초과 배출은 우려할 수준은 아닌 것으로 나타났다. 본 연구 결과, 감축목표가 약한 경우 기업들의 순판매량이 양이 되어 감축에 도움이 될 것이고 목표가 강한 경우에도 순구매량이 많지 않으며 상하한 간격이 넓으면 초과하는 경향도 약해지는 것을 확인하였다. 다만 현실 적용을 위해서는 상한과 하한을 설정하기 위해 기준이 되는 평균 탄소가격을 추정하는 방법이 상하한의 도입에 있어 중요한 사안이 될 것으로 판단된다. 가격상하한제 도입에 따른 정부 재원을 보자면, 순구매량이 양이더라도 정부순수입은 모든 시나리오에서 양으로 도출되었다. 이러한 결과는 정부가 배출권을 구매할 때는 상대적으로 낮은 가격인 하한에서 구매를 하고 판매를 할 때는 상대적으로 높은 가격인 상한에서 판매를 하기 때문이다.

향후 본 연구에 대한 논의를 확장시킬 경우 경성제도와 연성제도에 관한 논의가 필요할 것이다. 가격상하한제에서의 초과배출은 상하한에서의 순구매량의 영향을 받는데 순구매량이 양수인 경우 배출량은 순구매량만큼 초과하게 된다. 선행연구를 참고하여 배출량 초과(순구매량 발생)를 억제하기 위한 연성제도와 순구매량은 발생하지만 가격상승을 억제하는 경성제도를 도입하였을 때의 배출량과 비용관점에서의 정량적인 영향을 연구해 볼 수 있을 것이다. 또한, 본 연구는 대표적 기업을 설정하여 기간 간 유연성만을 모형화하고, 기업 간(intercompany) 거래의 효율성을 모형화하지 못하였다는 한계점을 가진다. 현실 적용을 위해서 기업 간 거래를 가정하여 본 연구를 보완할 수 있을 것이다.

[References]

관계부처 합동, “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안”, 2021.

관계부처 합동, “2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안”, 2018.

관계부처 합동, “배출권 거래시장 안정화 방안”, 2017.

관계부처 합동, “온실가스 배출권거래제 제2차 계획기간(2018년~2020년) 국가 배출권 할당계획(안)”, 2017.

권오상, 『환경경제학(제4판)』, 박영사, 2020.

기획재정부 · 환경부, “제3차 배출권거래제 기본계획”, 2019.

김규림 · 유종민 · 김지태, “배출권 시장안정화 정책 수립 방향 및 쟁점”, 2016.

김은정, “EU 배출권거래제 시장안정화 정책에 관한 연구”, 세종: 한국법제연구원, 2015.

배경은, “배출권거래제 시장안정화 제도 개선을 위한 가격상하한제 영향 연구”, 숙명여자대학교 석사학위논문, 2021.

심성희 · 이지웅, “우리나라 배출권거래제의 시장왜곡 요인과 정책적 함의”, 2015.

온실가스종합정보센터, “2018 배출권거래제 운영결과보고서”, 2020.

온실가스종합정보센터, “2019 배출권거래제 운영결과보고서”, 2021.

온실가스종합정보센터, “배출권 거래가격 전망 모형 고도화 연구”, 2020.

유종민, “배출권 시장 안정화 정책의 분석; 중앙은행 모델을 중심으로”, 2014.

유종민 · 이지웅, “온실가스 배출권 이월제한이 가격상하한에 미친 효과”, 2020.

유종민 · 이지웅, “한국배출권거래제 1차 계획기간 중 배출권 차입한도 효과 분석”, 2019.

조현진 · 김하나, “배출권거래제의 시장안정화방안에 관한 법정책적 연구”, 2016.

한국개발연구원, “예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정, 보완 연구(제5판)”, 2008.

한국금융연구원, “탄소배출권시장 활성화를 위한 제도 개선방안 연구”, 2017.

한국환경공단, “배출권 시장 안정화 정책 개선 및 정보 공유 활성화”, 2021.

한현옥, “배출권 가격 변동성 안정화 장치에 대한 연구”, 2014.

환경부, “온실가스 배출권 잉여분의 이월 기준 변경(보도자료)”, 2019.

환경부, “온실가스 배출권거래제 제3차 계획기간 국가 배출권 할당계획(안)”, 2020.

Abrell, J., and S. Rausch, “Combining Price and Quantity Controls under partitioned environmental regulation,” 2016.

Aldy, J. E., and R. N. Stavins, “Using the Market to Address Climate Change: Insights from

Theory & Experience," Deadalus 141.2 (Spring 2012) pp. 45~60.

Borenstein, S., J. Bushnell, P. Wolak, and M. Watkins, "Expecting the unexpected: Emissions uncertainty and environmental market design," 2019.

Burtraw, D., K. Palmer, and D. Kahn, "A symmetric safety valve," 2010.

Cason, T. N., J. K. Stranlund, and F. P. de Vries, "Investment Incentives in Tradable Emissions Markets with price floors," 2021.

ECOFYS, "Assessing design options for a market stability reserve in the EU ETS," 2014.

European Commission, "Publication of the total number of allowances in circulation in 2019 for the purposes of the Market Stability Reserve under the EU Emissions Trading System established by Directive 2003/87/EC," Retrieved May 28, 2021, from https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/reform/docs/c_2020_2835_en.pdf

Fell, H., and R. D. Morgenstern, "Alternative Approaches to Cost Containment in a Cap-and-Trade System," 2010.

Fell, H., "Comparing policies to confront permit over-allocation," 2016.

Fell, H., D. Burtraw, R. Morgenstern, K. Palmer, and L. Preonas, "Soft and hard price collars in a cap-and-trade system," 2011.

https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems%5B%5D=43

https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices

https://www.law.go.kr/법령/온실가스배출권의할당및거래에관한법률

https://www.law.go.kr/법령/온실가스배출권의할당및거래에관한법률시행령

https://www.law.go.kr/행정규칙/예비타당성조사수행총괄지침/(436,20190425)/제50조

Jacoby, H. D., and A. D. Ellerman, "The safety valve and climate policy," 2004.

Jian-Xin Guo, Xianchun Tan, Baihe Gu, Xinglong Qu, "The impacts of uncertainties on the carbon mitigation design: Perspective from abatement cost and emission rate," 2019.

Murray, B. C., Newell, R. G., and W. A. Pizer, "Balancing Cost and Emissions Certainty: An Allowance Reserve for Cap-and-Trade," 2009.

Perkis, D. F., T. N. Cason, and W. E. Tyner, "An experimental investigation of hard and soft price ceilings in emissions permit markets," 2014.

Philibert, C., "Price caps and price floors in climate policy," 2008.

Pizer, W. A., “Combining price and quantity controls to mitigate global climate change,” 2002.

Roberts, M. J., and M. Spence, “Effluent and licenses under uncertainty,” 1976.

The Congress of the United States, “Managing allowance prices in a cap-and-trade program,” 2010.

Wood, P. J., and F. Jotzo, “Price floors for emissions trading,” 2011.