

환경산업연관분석을 활용한 탄소국경조정 메커니즘 도입에 따른 국내 산업계 영향 분석과 대응전략[†]

여영준* · 조해인** · 정훈***

요약 : 본 연구에서는, 환경산업연관표 분석모형을 활용해, EU 탄소국경조정이 전면 도입될 경우의 국내 산업별 탄소국경조정 부담액 규모를 산정하고 국내 저탄소 정책 시행에 따른 산업별 부담액 변화를 비교 분석함으로써 기후변화 리스크에 대응한 중장기전략 수립에 시사점을 제시하고자 하였다. 분석 결과 EU 탄소국경조정 전면도입 정책충격에 따른 국내 산업 총부담액은 2030년 기준 약 8조 2,456억 원 규모로 예측되었다. 업종별 영향을 살펴보면 석유화학, 석유정제, 운송장비, 철강, 자동차, 전기/전자/정밀 산업으로 등 6대 주요 산업군에서 총탄소국경조정 총부담액의 84.3%를 차지하는 것으로 전망되었다. 그리고 저탄소 정책 시행에 따른 기술발전 및 에너지 전환을 가정한 복수의 정책 시나리오에서는 탄소국경조정 총부담액이 약 11.7%~15.0% 감소할 것으로 전망되었다. 본 연구의 주요 분석 결과는 탄소국경조정의 전면도입 확대에 따른 대응전략 수립을 특정 분야에 한정해 이행하는 것이 아니라, 종합적 접근 하에서 이뤄내 국가 경제 전반에 끼치는 부정적 영향을 최소화하고 새로운 성장동력을 발굴하는 기회의 창으로 활용할 필요가 있음을 시사하고 있다.

주제어 : 환경산업연관표, 탄소국경조정, 기후변화, 저탄소정책, 산업영향

JEL 분류 : E01, F64, O44, Q54, Q56

접수일(2022년 7월 5일), 수정일(2022년 8월 27일), 게재확정일(2022년 8월 30일)

[†] 본 연구는 국회미래연구원 21년 중점연구과제 “기후위기 대응 산업지원 입법과제와 정책효과 예측 연구: 탄소국경조정 대응 산업지원 정책과제와 정책효과 예측연구” 지원을 받아 수행된 것임.

* 국회미래연구원 혁신성장그룹 부연구위원, 제1저자(e-mail: yjyeo@nafi.re.kr)

** 녹색기술센터 정책전략팀 박사후연구원, 교신저자(e-mail: hicho420@gmail.com)

*** 국회미래연구원 혁신성장그룹 연구위원, 공저자(e-mail: jeonghoon@nafi.re.kr)

Assessing the Impacts of EU's Carbon Border Adjustment Mechanisms and Its Policy Implications: An Environmentally Extended Input-Output Analysis[†]

Yeongjun Yeo*, Hae-in Cho** and Hoon Jeong***

ABSTRACT : This paper aims to quantify the potential economic burdens of EU's carbon border adjustment mechanisms faced by Korean domestic industries. In addition, this study tries to compare and analyzes changes in the burden of each industry resulted from the implementation of the domestic low-carbon policy. Based on the quantitative findings, we intend to suggest policy implications for establishing mid- to long-term strategies in response to climate change risks. Based on the environmentally extended input-output analysis, the total economic burdens of the domestic industries due to the EU's carbon border adjustment mechanisms are estimated to be approximately KRW 8,245.6 billion in 2030. Looking at the impacts by industry, it is found that major industries such as petrochemicals, petroleum refining, transportation equipment, steel, automobiles, and electric/electronic equipment industries are expected to account for 84.3% of the total potential burdens. In addition, in multiple policy scenarios assuming technological developments and energy transition following the implementation of domestic low-carbon policies, the total economic burden of carbon border adjustment is expected to decrease by about 11.7% to 15.0%. The main result of this study suggests that we should not view EU's carbon border adjustment mechanism as a trade regulation, but to use it as a momentum for more effective implementation of the low-carbon and energy transition strategies in the global carbon neutral era.

Keywords : Environmentally-Extended Input-Output, EU CBAM, Climate change, Low-carbon strategy, Impact analysis

Received: July 5, 2022, Revised: August 27, 2022, Accepted: August 30, 2022.

[†]This research work is supported by the National Assembly Futures Institute (research project 21-05: A study on industrial policy measures and the prediction of policy).

* Associate Research Fellow, National Assembly Futures Institute, First author(e-mail: yjyeo@nafi.re.kr)

** Post-doctor, Green Technology Center, Corresponding author(e-mail: hicho420@gmail.com)

*** Research Fellow, National Assembly Futures Institute, Coauthors(e-mail: jeonghoon@nafi.re.kr)

I. 서론

2015년 파리협정 이후, 기후변화 위기에 대한 공감대 확산으로 세계 각국이 탄소중립 선언에 동참하며 탄소중립 시대가 도래하였다. 특히, 2018년 ‘기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC) 1.5°C 지구 온난화 특별보고서’가 195개 회원국의 만장일치로 채택되면서, 지구 연평균 기온 상승을 1.5°C로 제한하기 위한 2050년 순 탄소배출 제로 필요성이 국제사회에 확산되었다. 더불어 2019년 3월 유럽연합(European Union, EU)의 탄소중립 선언 이후, 2020년에는 우리나라를 포함한 미국, 일본, 중국 등 세계 주요국들 역시 탄소중립에 동참하며 현재 130여개국이 참여 중에 있다.

이러한 글로벌 수준의 환경 변화 속, 세계 각국은 탄소중립 달성을 위해 정책을 강화하고 법제를 재편하고 있다. 이에, 주요 국가들은 자발적 감축 목표를 설정해, 감축 노력을 전방위적으로 기울이고 있다. 하지만 국가 간 목표 및 정책의 차이로 인한 탄소누출(carbon leakage)에 대한 우려의 목소리 역시 커지고 있다(Chepelieve, 2021; Zhou et al., 2010).¹⁾ 탄소누출에 따른 글로벌 교역관계에 있어서의 영향은 단기 가격 경쟁력, 투자 자원 재배분, 그리고 탄소 가격 변동 측면으로 형성될 수 있다(Böhringer et al., 2021; Kuusi et al., 2020; 오인하, 2012; Monjon and Quirion, 2011a). 예로, 탄소배출이 규제되는 지역 내 산업이 탄소비용 증가로 인해 가격 경쟁력을 상실하는 경우 비규제 지역 내 산업이 글로벌 시장에서 상대적 이점을 획득할 수 있는 것이다. 이 같은 영향은 국가 및 지역 간 자본투자 수익률에도 영향을 끼쳐, 탄소규제가 비교적 엄격하지 않은 지역으로의 자본(투자) 재배치 확대를 견인할 수 있다. 또한, 탄소 배출 규제가 있는 국가와 지역에서의 탄소 및 화석연료에 대한 수요 감소는 탄소 가격 하락으로 이어져, 비규제 국가(지역)의 에너지 및 탄소 사용을 오히려 촉진하는 효과를 일으킬 수도 있다.

이러한 문제의식 하, EU는 2019년 유럽그린딜(European Green Deal)을 통해 탄소국경조정 메커니즘(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 도입을 예고한 바 있다. 이처럼 CBAM은 개별 국가의 온실가스 감축정책 시행에 따른 탄소누출(Carbon

1) 탄소누출이란, 특정 국가 혹은 지역의 탄소 감축정책 시행에 따른 역외 탄소배출의 증가량과 역내 탄소배출 감축량의 비율을 의미한다. 이에, 국가 또는 지역마다 감축목표 및 온실가스 규제의 차이가 존재하기 때문에 발생하는 국가간 외부효과 개념으로 이해할 수 있다(오경수 외, 2015). 그에 따라 탄소누출 수준이 높을수록, 몇몇 국가 내에서의 감축이 타국의 배출량 증가로 이어져 글로벌 차원의 기후변화 대응 효과가 약해질 수 있다.

Leakage) 방지와 자국 내 산업의 국제경쟁력 상실을 방지하기 위한 정책으로서 국가 간 감축 노력 차이를 보정하는 무역제한 조치이자, 공정한 감축 환경 조성을 위한 제도적 장치에 해당한다(윤승환, 2022; 박효민, 2022; 이천기, 2021; Shapiro, 2021; 오인하, 2012; Monjon and Quirion, 2011b). 그에 따라 EU는 2050 탄소중립을 위해 2030년 온실가스 감축 목표를 1990년 대비 55% 감축하겠다는 목표를 반영한 유럽 기후법을 통과한 데 이어, 2021년에는 ‘Fit for 55’라는 입법패키지를 통해, 오는 2023년부터 CBAM을 시행할 계획을 발표하였다.²⁾ EU뿐만 아니라, 미국 역시 2021년 3월, 무역대표부(USTR)의 통상정책 연례보고서를 통해 탄소국경조정제 도입을 시사한 바 있다. 또한, 2021년 7월 민주당이 기후변화 대응 예산안에 오염수입 요금(Pollution import fee) 반영을 명시적으로 제안하며 미국에서도 향후 CBAM과 유사한 탄소국경조정제도 도입 가능성이 높을 것으로 전망된다.

우리나라 경제체제는 수출의존도가 높고 철강, 석유화학, 자동차, 반도체 등 온실가스 다배출 업종을 주력산업으로 하고 있어, 향후 CBAM 도입에 따른 산업계 피해가 상당할 것으로 예상되며, 이에 대한 대응방안 마련이 필요한 시점이라고 볼 수 있다. 구체적으로 우리나라 경제체제의 무역의존도는(2019년 기준) 약 63.7%로, G20 국가 중 독일(70.8%)에 이어 두 번째로 높은 수준이다(한국무역협회, 2020). 그리고 2020년 기준 우리나라 수출 규모 중 EU와 미국에 대한 수출 비중은 약 27%에 해당하고 있어, 향후 CBAM 도입에 따른 과세 부담액은 상당할 것으로 예상된다. 문진영 외(2020) 연구는 국제 교역에 내재된 국가별 이산화탄소 배출을 분석한 결과 대부분의 선진국은 탄소 순수입국이지만 우리나라는 탄소 순 수출국(net-exporter)으로 분류되어, 수출 대상 국가의 CBAM 도입 시 추가적인 비용 부담과 이로 인한 산업계 경쟁력 약화가 우려되는 상황임을 언급한 바 있다.

이처럼 우리나라는 중장기적으로 대내적 국가 감축목표 달성 이행과 주요국 기후변화 대응책 등에 따른 기후변화 대응 리스크가 확대될 상황에 직면해 있다. 글로벌 환경 변화에 대한 대응과 국가 경쟁력 제고를 위해서는, 산업 부문 온실가스 감축을 위한 정책과 더불어 산업계 지원을 통해 산업계 피해를 최소화하고 기후위기에 대응할 수 있는 여

2) EU는 탄소중립 달성을 위해 탄소누출 방지와 더불어 교역국의 기후위기 대응 동참을 촉구하고 자국 산업경쟁력 상실 방지를 목적으로 CBAM 도입을 예고했다. CBAM은 EU 역내 산업의 탄소감축 노력으로 인한 추가부담을 수입 상품에도 부과하기 위해 역외 제품 생산과정에서 배출된 온실가스에 비용을 지불하도록 하는 제도이다.

건 마련이 절실하다고 볼 수 있다. 이에, 본 연구에서는 CBAM 도입에 따른 국내 산업계의 비용 부담 규모를 정량적으로 추산하고 국내 저탄소 정책 시행에 따른 부담 규모 변화를 살펴보고자 한다. 이를 통해, 글로벌 환경변화 속 산업계의 잠재적 리스크 및 피해 완화를 위한 산업지원 정책의 전략적 방향성을 탐색하고 주요 정책과제의 잠재적 역할을 정량적으로 살펴보고자 한다.

구체적으로 본 연구에서는 산업연관표와 에너지/환경 요소를 접목한 환경산업연관표(Environmentally-Extended Input Output, EEIO) 데이터를 구축해 다양한 설계 시나리오별 파급효과를 정태적 관점으로 분석하고자 한다. EEIO는 기존 산업연관표에 개별 산업이 사용하는 에너지 정보를 반영하고 산업 간 연관관계에 따른 유발 에너지 이용과 이에 따른 탄소배출 흐름(경로)을 보여주는 데 특화된 자료체계이다(Kitzes, 2013). 그에 따라 우선 EEIO 데이터를 바탕으로 우리나라 경제체제 내 주요 산업 부문 간 재화/서비스 거래관계(흐름)에 내재(embodied)된 온실가스 흐름을 식별해냄으로써 EU CBAM 제도가 전면적으로 도입될 경우 주요 산업별 탄소국경조정 부담액을 산정하고자 한다.³⁾ 최근, CBAM 도입에 따른 영향을 분석하고자 시도하는 연구들이 점차 증대하고 있으나, 대부분 CBAM 도입에 따른 단순 무역관계 변화 분석이나, 산업별 직접배출에 한정된 부담액 규모 산정에 특화된 접근을 보이고 있다.

예로, 문진영 외(2020) 연구의 경우 글로벌 차원으로 EU CBAM 도입으로 인한 영향을 분석하고자 시도하였다. 이에, EU에서 전 산업 분야에 탄소 관세를 부과할 경우 우리나라가 부담해야 할 관세는 총 1조 610백억 원으로 추산됨을 확인하였다. 더 나아가 EU CBAM 도입으로 인해 중국, 인도, 러시아의 EU 대상 수출 규모가 가장 크게 감소할 것으로 전망하였다. 그리고 김선진 외(2021) 연구에서는 EU와 미국에서 모든 수입품목에 탄소국경세를 톤당 50달러 부과하는 경우 국내 산업의 對 EU 수출 규모가 0.5%, 미국은 0.6% 감소할 것으로 전망하였다. 더불어 그린피스(2021) 연구는 우리나라 업종별 對 EU 수출규모와 업종별 수출액에 내재된 탄소집약도를 활용해, EU 대상 주요 수출업종별 영향을 분석하고자 시도하기도 했다. 이에, 주요 업종 중 철강과 석유화학 산업의 탄

3) 본 연구에서는, 탄소국경조정 메커니즘 도입에 가장 선제적인 움직임을 보이고 있는 EU를 대상으로 분석을 하고자 한다. 또한, EU CBAM 제도의 경우 2023년부터 2025년까지는 철강, 시멘트, 알루미늄, 비료, 전기 등 5개 품목에 대해 적용할 계획이지만, 26년 이후에는 생산공정에서 배출된 직접배출을 넘어 간접배출 등을 모두 포괄하고 적용대상 품목을 확대할 예정이라는 점에 주목하여, 2030년을 분석년도(target year)로 설정하고자 한다.

소국경조정 부담액이 가장 높을 것으로 전망하였다.

이처럼 다수 연구들은 글로벌 분석모형을 활용하여, EU CBAM 도입에 따른 국제 무역관계 변화나 대표적 산업들의 부담액 산출에 초점을 맞추고 있다. 이에, EU CBAM 도입에 따른 우리나라 경제체제 내 산업 전반의 영향 분석과 주요 파급경로 분석을 포함한 심도 있는 논의 제시에 한계를 지니고 있다. 또한, EU CBAM 도입에 따른 1차적 영향 분석에 국한되어 있어, 대외적 환경변화에 대응한 정책대안들의 잠재적 효과 분석은 포함하지 못하고 있다. 이러한 주요 선행연구들의 한계점을 극복하기 위해 본 연구에서는 EEIO를 활용해 국내 주요 산업의 이산화탄소 원단위와 발생량에 대한 추정치와 산업 간 연관관계에 따른 무역 및 제품에 내재된 이산화탄소 배출량 흐름을 포착함으로써 EU CBAM 전면 도입에 따른 산업 전반의 부담액을 추산하고자 한다.

이를 바탕으로 주요 산업에서의 재화 생산과 소비활동에 연관된 산업 간 관계에 따른 간접배출과 재화 거래 흐름에 체화된 탄소 흐름을 포괄하여, 대외적 환경 변화에 따른 산업 전반의 파급효과를 살펴보고자 한다. 이 같은 EEIO 분석과 관련한 국내 선행연구들은 김윤경(2006a, 2011), 김상태·김남조(2010), 최한주·이기훈(2006) 등이 있다. 이들 선행연구들은 주로 EEIO 데이터를 구축해 국내 산업의 에너지 및 환경원단위를 도출하고 유발 탄소 배출량 등을 추정하고 있다. 하지만 EEIO 데이터 구축을 바탕으로 다양한 정책 시나리오별 산업별 파급효과 분석을 시도한 경우는 찾기 드물며, 이는 본 연구의 차별성이라고 볼 수 있겠다.

더 나아가 본 연구에서는 EU CBAM 도입에 따른 산업별 부담액 저감을 위한 정책대안의 잠재적 역할을 살펴보기 위해 저탄소 정책 시행에 따른 부담액 변화를 추정하고자 한다. 이에, 산업 부문의 에너지효율 향상, 전력 부문의 저탄소화, 탄소 포집·활용·저장 기술(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 도입 등 정책 시행에 따른 산업별 부담 저감 효과를 산출하고자 한다. 이를 바탕으로 주요 정책대안별 파급경로를 식별하고 EU CBAM 도입 확대에 따른 대응전략 수립 및 이행 측면 시사점을 제시하고자 한다.

그에 따라 본 연구는 다음과 같이 구성된다. 서론에 이어 제2장에서는 본 연구에서 활용한 데이터, 분석 모형에 대한 설명을 제시하고자 한다. 제3장에서는 분석에 활용된 시나리오를 설명하고 제4장에서는 EEIO 분석을 통한 주요 분석 결과를 제시하고자 한다. 나아가 제5장에서는 주요 분석 내용을 기반으로 한 결론과 시사점을 제시하고자 한다.

II. 데이터 및 분석방법론

1. 환경산업연관표(EEIO) 자료체계 구성

EEIO는 산업연관관계에 따른 에너지 이용 정도와 오염물질 배출 관계를 나타내어, 경제주체 및 산업 간 재화 및 서비스 흐름에 수반되는 에너지 및 환경오염물질 흐름을 이해할 수 있도록 하는 자료체계로 이해할 수 있다(이상호·김충실, 2012; 김윤경, 2006a). 이에, EEIO를 활용하면, 특정년도 경제주체 및 제도 부문의 활동이 다른 부문에 영향을 끼쳐 유발하게 되는 에너지 이용과 온실가스 배출 흐름을 파악할 수 있게 된다. 구체적으로 특정 산업의 생산활동에 따른 온실가스 직접 배출량에 대한 식별을 넘어 특정 산업의 생산활동을 위해 활용한 중간재 생산활동에 따라 수반되는 온실가스 배출량 역시 고려할 수 있게 된다(Liang et al., 2021; Kitzes, 2013). 그에 따라 EEIO는 개별 산업의 탄소 배출량, 탄소배출 원단위를 넘어 유발 탄소배출량 등을 산정할 수 있도록 한다.

이러한 측면에서 EEIO 자료체계를 활용해 산업연관분석 방법론을 적용하면, 수요 변화를 통해 유발되는 에너지 소비와 탄소 배출량 변화를 정량화할 수 있게 된다. 이에, EEIO 분석방법론은 재화의 최종 소비 관점에서 직접배출(Scope1), 간접배출(Scope2), 그리고 기타 간접배출(Scope3)까지 반영한 유발 탄소배출량 산정이 가능하다는 특징을 지닌다(Yang et al., 2017; Kitzes, 2013).⁴⁾ 즉, EEIO 분석은 생산이 아닌 최종 소비 관점에서의 계산으로 제품 하나를 생산하는 과정에서 발생하는 이산화탄소가 아닌 소비된 제품의 공급망 전체에서 발생하는 이산화탄소를 산출할 수 있게 되는 것이다. 이처럼 EEIO 모형은 경제시스템 전체에 초점을 두고, 시스템 내 만들어지는 재화와 서비스의 거래 및 흐름에 내재된 에너지 소비와 탄소 흐름을 파악하는 방식에 기반하고 있어, 경제 체제 내 발생하는 전체적인 탄소배출량 및 탄소흐름 측정에 적합하다고 볼 수 있다.⁵⁾

본 연구에서는 Kitzes(2013), 최한주·이기훈(2006) 및 김윤경(2006b) 등을 포함한 주

4) 직접배출(Scope1)은 에너지 연소, 산업공정 등에서 직접 배출하는 온실가스 배출을 의미하며 간접배출(Scope2)은 전기, 스팀 등 에너지 사용에 의한 간접적인 온실가스 배출을 포함한다. 더불어 기타 간접배출(Scope3)은 에너지 이외의 물류, 공급망, 제품 사용 등으로 인한 기타 배출량까지 포함한다.

5) 김윤경(2006b) 연구 역시, 산업의 생산활동이 중간재 소비를 통해 여타 산업들과 어떠한 관계를 형성하고 있는지를 살펴보고, 직접적인 효과와 간접적 효과를 포함하여 파악할 수 있다는 점에서 EEIO 분석의 활용도를 강조한 바 있다.

요 선행연구들의 접근을 참고하여, 산업연관표, 에너지투입량표, 에너지투입열량표, CO₂ 배출량표로 구성된 EEIO 자료체계를 구축하였다. 이에, 2015년 기준 EEIO를 구축하고 20개 에너지원(<표 1> 참고)과 31개의 내생 부문(<표 2> 참고)을 고려하였다.⁶⁾ 그리고 전통적인 형태의 산업연관표(기본거래표)에서 식별되는 산업별 금액 단위 에너지 투입량을 실물 단위와 CO₂ 물량 단위로 전환하기 위해 아래 식 (1)과 같은 산정식을 구성함으로써 산업별 CO₂ 원단위 행렬 $\hat{\Omega}$ 을 도출하고자 했다.⁷⁾

$$\hat{\Omega} (\text{CO}_2 \text{ 원단위 행렬, 단위: } \frac{t\text{CO}_2}{\text{백만 원}}) = \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \text{산업별 산출량} \left(\frac{1}{\text{백만 원}} \right) \times \text{산업별 에너지 투입량 (백만 원)} \\ & \times \text{산업별 투입 에너지 단위 가격당 물량} \left(\frac{\text{고유물량단위}}{\text{백만 원}} \right) \times \text{연료의 순발열량} \left(\frac{\text{GJ}}{\text{고유물량단위}} \right) \\ & \times \text{탄소배출계수} \left(\frac{tC}{\text{GJ}} \right) \times \text{탄소기준 배출량 이산화탄소 기준으로 전환} \left(\frac{44\text{CO}_2}{12C} \right) \\ & \times (1 - \text{탄소물입률}) \times \text{탄소연소율} \end{aligned}$$

식 (1)에 제시된 산업별 CO₂ 원단위 산출과정을 살펴보면, 첫 번째로 에너지 단위 가격당 물량 정보를 활용해 개별 산업의 (금액 기준) 에너지 투입량을 에너지 고유의 물량 단위로 전환한다. 여기에서는 에너지경제연구원(2016)의 에너지통계연보, 국가에너지 통계종합정보시스템, 에너지경제연구원(2017)의 에너지수급동향자료 등을 활용해 에너지 단위 가격당 물량을 산정하였다. 이를 바탕으로 산업별 에너지 투입량표를 구성한 뒤, 다음 단계에서는 연료 순발열량 수치를 곱해 에너지 연소 시 발생하는 열량 단위(GJ)로 환산하게 된다. 이에, IPCC의 권고사항에 따라 에너지관리공단(2006)의 에너지 열량 환산기준 적용 매뉴얼을 적용하여, 에너지 투입열량표를 구성하였다.⁸⁾ 이같은 에너지 투입량표와 에너지 투입열량표 등을 바탕으로 <표 1>에 제시된 각 에너지원의 고유 단위로 되어 있는 에너지 투입량을 열량단위로 환산함으로써 에너지원들이 지닌 고유 단

6) 에너지 부문 및 내생 부문에 대한 고려는, 데이터 활용 가능성과 연구 목적에 따라 가변적일 수 있다.
 7) 본 연구에서는 이산화탄소(CO₂)에 초점을 맞춰, 우리나라 경제체제 내 온실가스 발생 및 흐름을 포착하고자 한다.
 8) IPCC에서는 온실가스 배출량을 산정할 때, 순발열량(Net Calorific Value, NCV) 수치 사용을 권고하고 있다 (김충실·이현근, 2009).

위를 넘어 에너지원 간 비교와 합산을 할 수 있도록 하였다.

〈표 1〉 2015년 기준 EEIO 작성을 위해 고려된 에너지 분류표

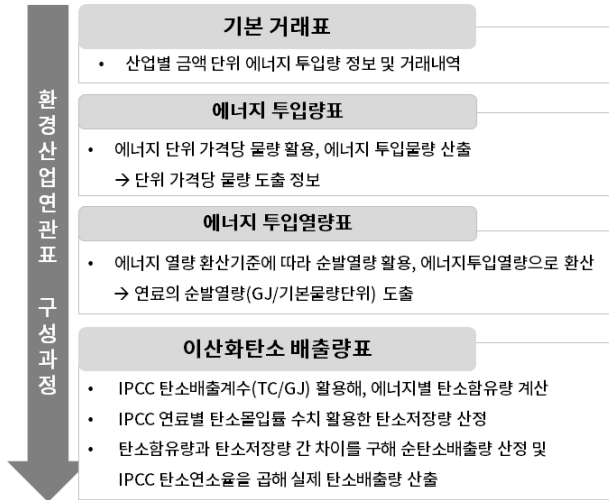
번호	에너지 분류	번호	에너지 분류
E01	무연탄	E11	액화석유가스
E02	유연탄	E12	윤활유 및 그리스
E03	석탄 코크스 및 석탄 관련 제품	E13	기타 석유정제제품
E04	연탄	E14	수력
E05	나프타	E15	화력
E06	휘발유	E16	원자력
E07	제트유	E17	자가 발전
E08	등유	E18	도시가스
E09	경유	E19	원유
E10	중유	E20	천연가스

〈표 2〉 2015년 기준 EEIO 산업분류표(내생 부문)

번호	산업 분류	번호	산업 분류
S01	농림수산	S17	자동차
S02	광업	S18	운송장비
S03	음식료품	S19	기타 제조업
S04	섬유/가죽	S20	전력, 가스 및 수도
S05	목재/종이/인쇄	S21	신재생
S06	석유정제	S22	건설
S07	석유화학	S23	도소매, 숙박 및 음식
S08	화학제품	S24	운수
S09	시멘트	S25	통신 및 방송
S10	비금속광물	S26	금융 및 보험
S11	철강	S27	부동산 및 사업서비스
S12	비철금속	S28	공공 및 행정
S13	금속제품/기계/장비	S29	교육
S14	반도체	S30	보건 및 사회복지
S15	디스플레이	S31	기타 서비스
S16	전기/전자/정밀		

그리고 에너지 투입열량표를 CO₂ 발생량으로 환산하기 위해 탄소 배출계수를 적용하여, 에너지원별 배출되는 탄소 무게를 산출하고자 했다(민슬기 외, 2014). 더 나아가 이산화탄소 배출량 산출을 위해 이산화탄소(CO₂)와 탄소(C) 원자량 비율을 곱하고 몰입률과 연소율⁹⁾을 적용함으로써 산업별 CO₂ 배출량을 도출하였다. 그리고 산출한 탄소배출량을 산업별 산출액으로 나눠줌으로써 CO₂ 원단위를 도출할 수 있었다. 이상 식 (1)을 구성하는 주요 항들과 EEIO 자료체계 구성 단계 간 연계는 <그림 1>을 통해 이해할 수 있다.

<그림 1> 환경산업연관표 구성 과정 모식도



출처: 저자 작성

2. EEIO 분석을 통한 산업별 유발 CO₂ 발생량 산정

EEIO 분석모형에서는 일반적 산업연관분석과 동일하게, 산업별 총산출은 생산유발계수와 최종 수요의 곱으로 표현할 수 있다. <표 3>에서는 산업연관표의 기본 구조를 나타내고 있는데, 투입계수 a_{ij} 는 산업 j 부문에 사용되는 산업 i 부문 재화의 중간 투입액

9) 연소율은 민슬기 외(2014) 및 최한주·이기훈(2006) 등 연구를 참고해, IPCC가 제시하고 있는 평균 연소율 수치를 활용하였다.

x_{ij} 을 산업 j 부문 총투입액 X_j 으로 나눈 값으로 이해할 수 있다. 그리고 부가가치계수 v_j 는 산업 j 부문 생산활동에 투입되는 부가가치 V_j 를 j 부문 총투입액 X_j 으로 나눈 값이다. 산업 j 부문 투입계수와 부가가치계수를 모두 열방향(column-wise)으로 합하면 1이 된다. 이에, <표 3>에 제시된 산업연관표의 내생 부문에 해당하는 산업 간 거래와 최종수요 부문 간 관계를 바탕으로 한, 산업별 총산출액 결정식은 식 (2)와 같이 정리할 수 있다. 그리고 식 (2)에 $x_{ij} = a_{ij}X_j$ 관계식을 대입하면 식 (3)과 같이 도출할 수 있게 된다. 식 (3)을 행렬 형태로 정리하고 X 에 대해서 전개하면 식 (4)와 식 (5)를 도출할 수 있다.

<표 3> 산업연관표 기본 구조

		중 간 수 요						최종 수요	총 산출액
		1	2	...	j	...	n		
중 간 투 입	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1n}	Y_1	X_1
	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2n}	Y_2	X_2
	⋮	⋮	⋮				⋮	⋮	⋮
	i	x_{i1}	x_{i2}		x_{ij}		x_{in}	Y_i	X_i
	⋮	⋮	⋮				⋮	⋮	⋮
	n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nj}	...	x_{nn}	Y_n	X_n
부가가치		V_1	V_2	...	V_j	...	V_n		
총투입액		X_1	X_2	...	X_j	...	X_n		

$$\begin{bmatrix} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} + Y_1 \\ \vdots \\ x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{in} + Y_i \\ \vdots \\ x_{n1} + x_{n2} + \dots + x_{nn} + Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n + Y_1 \\ \vdots \\ a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{in}X_n + Y_i \\ \vdots \\ a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \dots + a_{nn}X_n + Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$AX + Y = X \tag{4}$$

$$X = (I - A)^{-1} Y \tag{5}$$

식 (5)에서 $(I - A)^{-1}$ 는 레온티에프 역행렬(Leontief inverse matrix)이다. $(I - A)^{-1}$ 행렬을 구성하는 요소 α_{ij} 는 산업 j 부문에 대한 최종 수요 한 단위 증가로 인해 직·간접적으로 유발되는 i 부문의 산출량 변화량을 의미한다. 그에 따라 $(I - A)^{-1}$ 행렬을 식별하면, 최종 수요 부문 변동 ΔY 에 따른 각 산업에서 직·간접적으로 유발되는 총산출 변동분 ΔX 을 구할 수 있게 된다. 앞선 세부 절에서 도출한 산업별 CO_2 원단위 행렬 $\hat{\Omega}$ 을 산업연관분석 접근에 연계하면, 최종수요 부문 변동에 따라 유발되는 에너지소비량과 CO_2 발생량을 정량화할 수 있다. 그에 따라 본 연구에서는 Kitzes(2013) 및 Miller and Blair(2009) 등 선행연구의 주요 접근을 참고해, 對 EU 수출에 내재된 우리나라 산업별 재화/서비스의 CO_2 배출량 f 을 산정하고자 식 (6)과 같이 분석 모형을 설계하였다.

$$f = \hat{\Omega} (I - A)^{-1} EX_{EU} \tag{6}$$

여기에서 $\hat{\Omega}$: (1*31) 산업별 CO_2 원단위 벡터

$(I - A)^{-1}$: (31*31) 레온티에프 역행렬 벡터

EX_{EU} : (31*1) 산업별 최종수요(수출) 벡터

이 같은 분석 모형 설계를 바탕으로 특정 산업이 수출을 충족시키기 위한 재화/서비스 생산을 위해 직접 발생시킨 CO_2 발생량, 해당 산업의 제품 생산을 위해 투입되는 중간재 생산에 의해 유발되는 CO_2 발생량, 그리고 관련 재화들의 유통 및 소비 과정에서 발생하는 CO_2 발생량 등을 모두 포착할 수 있게 된다(Miller and Blair, 2009; 김윤경, 2006a). 그에 따라 산업별 EU 대상 수출 변동 ΔEX_{EU} 에 따른 각 산업에서 직·간접적으로 유발되는 CO_2 발생 변동분 Δf 을 도출할 수 있게 된다. 본 연구에서는 2030년 기준 산업별 EU CBAM 도입에 따른 부담액을 산출하는 데 목적이 있다. 이에, ΔEX_{EU} 반영을 위해 산

업연구원(2021)의 ISTANS 데이터를 활용하여, 최근 5년간('15~'20) 산업 업종별 對 EU 수출액을 연평균 증가율을 2030년까지 외삽 적용했다. 더불어 식 (6)과 같이 설계한 모형을 바탕으로 산업별 EU 수출량에 함유된 탄소배출량을 계산하고 IMF(2019)의 탄소 가격(톤당 75달러¹⁰⁾) 전망치를 활용해 2030년 기준 산업별 탄소국경조정 부담액을 산정하였다.

III. 분석 시나리오 설계

본 연구에서는 EEIO 분석 모형을 구축 및 활용해, 첫 번째로 2030년 EU CBAM이 전 산업을 대상으로 적용되어 전면 도입될 경우 국내 산업별 CBAM 부담액 규모를 산정하고자 한다. 두 번째로 국내 저탄소 정책 시행에 따른 산업별 부담액 변화를 살펴봄으로써 CBAM 도입에 대응한 중장기전략 수립에 시사점을 제시하고자 한다. 이에, 기준안 시나리오(Business As Usual, BAU)와 별도로, 저탄소 정책 관련 시나리오를 세 가지 고려하여 총 4가지 시나리오를 구성해 분석을 수행하고자 한다(<표 4> 참고). 분석을 위해 설계한, BAU 시나리오는 외생적 정책충격이 반영되지 않은 상황이다. 그에 따라 우리나라 산업별 EU 대상 수출 규모 외삽치(2015년~2030년)를 적용하고 2030년 기준 IMF(2019)의 탄소 가격 전망치를 반영함으로써 EU CBAM 전면 도입에 따른 산업 부문별 부담액 산출을 이뤄내고자 한다. EU는 지금까지 5개 품목(철강, 시멘트, 알루미늄, 비료, 전기)에 우선, 탄소국경조정 메커니즘을 적용하여 운용할 계획이며, 품목을 전면적으로 확대할 계획을 갖고 있다. 이러한 상황에서 중장기적으로 EU CBAM 제도가 전 품목에 대해 전면 확대되는 경우를 가정하여, 우리나라 주요 산업군이 어떤 파급경로를 바탕으로 부담액에 마주하게 될지 정량적으로 파악하고자 한다. 이를 바탕으로 EU CBAM 제도 전면 도입에 대한 우리나라 산업계 적응력 강화를 위한, 중장기 정책 수립에 활용될 수 있는 근거를 제시하고 시사점을 제공하고자 한다.

10) 본 연구에서는 2021년 6월 기준 환율로서 1달러당 1,115.5원으로 적용하여 분석을 수행하였다.

〈표 4〉 EEIO 분석 설계 시나리오 설명

시나리오 명		시나리오 개요	시나리오 세부 가정
BAU 시나리오		저탄소 정책 이행 X (정책충격 X)	<ul style="list-style-type: none"> • 우리나라 산업별 EU 수출 규모 외삽치('15-'30) 적용 • '30년 기준 IMF(2019) 탄소 가격(톤당 75USD) 적용
저탄소 정책 시나리오	EE 시나리오	에너지 효율 향상	• BAU 시나리오에 추가로, 「대한민국 2050 탄소중립 전략」내 '30년 에너지 효율 향상 전망치 달성 가정
	REN 시나리오	산업별 사용 전력의 저탄소 전환	• BAU 시나리오에 추가로, 「제9차 전력수급기본계획안」내 '30년 기준 발전믹스 비중 전망치 달성 가정
	REN & CCUS 시나리오	전력 저탄소 전환 및 CCUS 기술 확대	• REN 시나리오에 추가로, 「2030년 국가 온실가스 감축 로드맵 수정안」내 명시된 CCUS 통한 감축목표 달성 가정

그리고 본 연구에서는 BAU 외에도 첫 번째 정책 시나리오로서 산업 전반의 에너지효율 향상이 이뤄진 경우를 EE 시나리오로 고려하였다. 「대한민국 2050 탄소중립 전략」에 명시된 혁신적 에너지 이용 효율 향상 목표 달성 상황을 가정하고 모형 내 적용하고자 분석연도 2030년에 산업별 에너지 투입비용이 약 10% 감소하는 경우를 가정함으로써 산업연관표에 반영하였다. 에너지 효율향상 목표치의 경우 구체적인 정량적 목표치를 확인할 수 없어 추상적으로 우선 10% 효율 향상이 이뤄지는 경우로 가정했음을 밝힌다. 에너지효율 개선은 산업 부문의 온실가스 감축을 위한 대표적 수단이지만 최근 추가적인 에너지효율 개선 여력이 감소함에 따라 기술적 대안 탐색이 요구되는 상황이다. 이러한 상황에서 디지털전환 기술(예, 인공지능 및 사물인터넷 등)을 활용한 생산 부문 스마트화를 도모함으로써 에너지 사용 절감을 이뤄내는 방안이 주목받고 있다. 그에 따라 산업의 스마트화를 바탕으로 에너지효율을 극대화해 약 10%의 에너지 절감을 도모하겠다는 정책목표를 분석모형 내 반영함으로써 BAU 대비 산업별 탄소국경조정 부담액 변화를 살펴보고자 한다.

두 번째 정책 시나리오인 REN 시나리오는 전력 부문의 저탄소화가 진전되는 상황을 가정한 경우이다. 이에, 「제9차 전력수급기본계획」내 제시된 연도별 전력 수급 전망치 및 발전믹스 비중을 활용하였다. 구체적으로는 목표 시나리오에 해당하는 석탄발전과 LNG 발전량 감소, 그리고 신재생 발전량 확대 목표치를 산업연관표 내 적용하여 투입계수 행렬의 변동을 유도하였다.¹¹⁾ 그에 따라 개별 산업 부문의 투입 측면에서의 중간재로서의 전력 및 신재생에너지 투입 비용을 기존 수치 대비 변동시키고, 부가가치와 총투입

액의 크기는 동일하게 유지하도록 했다. 온실가스 추가감축을 위한 전원믹스 전환과 신재생에너지 투자 확대는 매우 중요하다. 이에, 친환경 전원믹스로의 전환과 석탄발전에 대한 추가감축 요구 증대에 따른 전력 사용 저탄소화를 가정한 시나리오를 모형 내 반영함으로써 BAU 대비 산업별 탄소국경조정 부담액 변화를 비교분석하고자 한다.¹²⁾

더불어 세 번째 정책 시나리오 REN&CCUS는 전환 부문 저탄소화와 산업 부문 내 CCUS 기술 확대를 가정한 경우이다. 에너지 다소비, 탄소 집약적 산업으로 구성된 우리나라 산업 상황을 고려하였을 때, 기후변화 리스크에 대한 대응력을 증대하기 위해서는 CCUS 기술 등을 포함한 신기술 개발과 실제 현장으로의 적용 확대 역시 중요하다. 그에 따라 본 연구에서는 CO₂ 원단위가 가장 높은 5개 산업인 석유화학, 비금속광물, 철강, 금속제품/기계/장비 그리고 전기/전자/정밀 산업에 CCUS 기술이 확대되어, 「2030 온실가스 감축 로드맵 수정안」에 명시된 CCUS 기술을 활용한 배출량 감축목표가 달성됨을 가정했다.¹³⁾ 이에, 해당 산업 부문의 CO₂ 원단위 변동치를 적용한 행렬 $\hat{\Omega}$ 을 분석 모형에 적용하였다. 세부적으로는 해당 5개 산업 부문이 CCUS 기술확대에 따른 배출량 감축목표를 달성하는 데 주도적인 역할을 하며 기준연도 배출량 상대 비중만큼 CCUS 기술을 활용한 배출량 감축목표를 2030년 달성하게 됨을 가정함으로써 배출원단위에 변화를 적용해 분석모형에 반영하였다. 해당 시나리오와 REN 시나리오 간 비교분석을 통해, CCUS 기술 확대에 따른 탄소국경조정 부담액 순 저감효과를 산출하고자 한다.

IV. 결과 분석¹⁴⁾

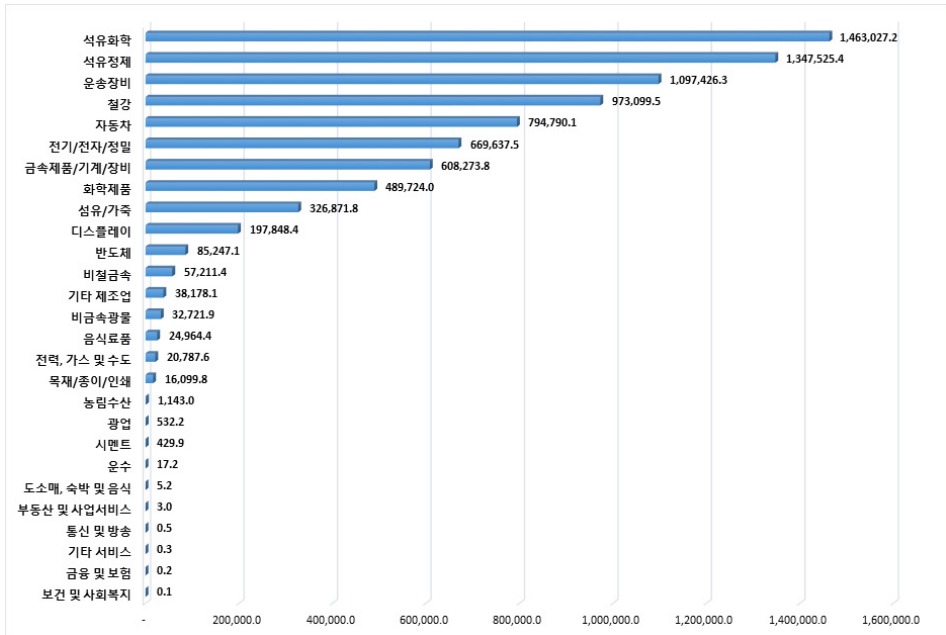
1. BAU 시나리오에 따른 산업별 탄소국경조정 부담액 산출

2015년 경제 상황이 2030년까지 지속하는 경우를 가정한 기준안 시나리오에서 EU

-
- 11) 「제9차 전력수급기본계획」 내 발전량 전망 목표 시나리오에서는 석탄발전기 폐지와 추가 석탄발전량 제약을 가정해, 2030년 석탄발전 목표 비중이 29.9%, LNG 발전 목표 비중은 23.3%, 그리고 신재생 발전 목표 비중은 20.8%로 설정되어 있다.
 - 12) EE 시나리오에 따른 산업별 에너지 비용 절감과 REN 시나리오 등에 따른 산업별 전력 투입비용 변화 등을 산업연관표에 적용한 뒤 RAS 기법을 통해 행렬 조정과정을 거쳐, EEIO 분석을 수행하였다.
 - 13) 「2030 온실가스 감축 로드맵 수정안」에서는 CCUS를 활용한 감축목표를 약 10.3백만 톤 감축으로 설정하고 있다.
 - 14) “IV. 결과 분석” 절에서 제시하고 있는 주요 분석 결과치들은 2015년 산업연관표(생산자가격)를 기준으로 하여 제시하였음을 밝힌다.

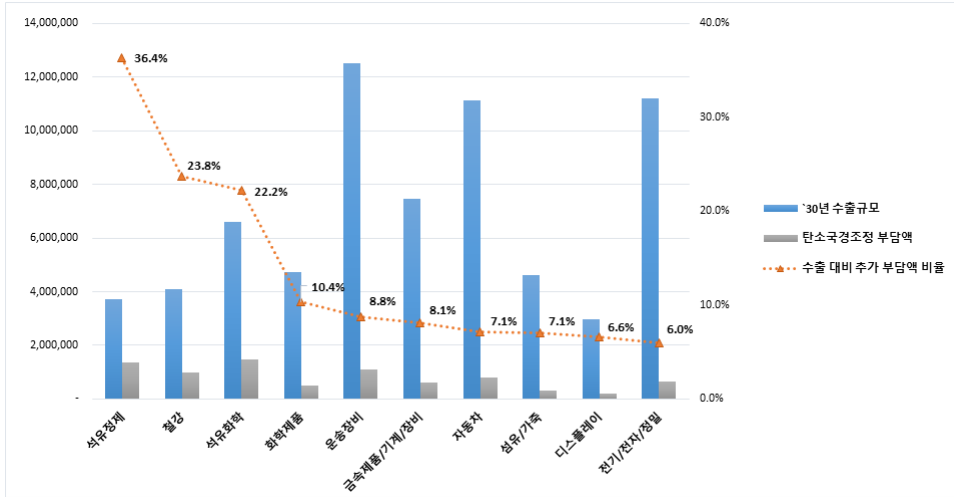
탄소국경조정 전면도입 충격에 따른 (2030년 기준) 국내 산업 총부담액은 약 8조 2,456억 원 규모로 예측된다. 이는 2030년 기준 EU 수출액 총액의 약 11.3%에 해당하는 금액으로서 이는 국내 산업 전반에 지대한 영향을 끼칠 것으로 전망된다.

<그림 2> EU CBAM 도입 따른 '30년 산업별 탄소국경조정 부담액(단위: 백만 원)

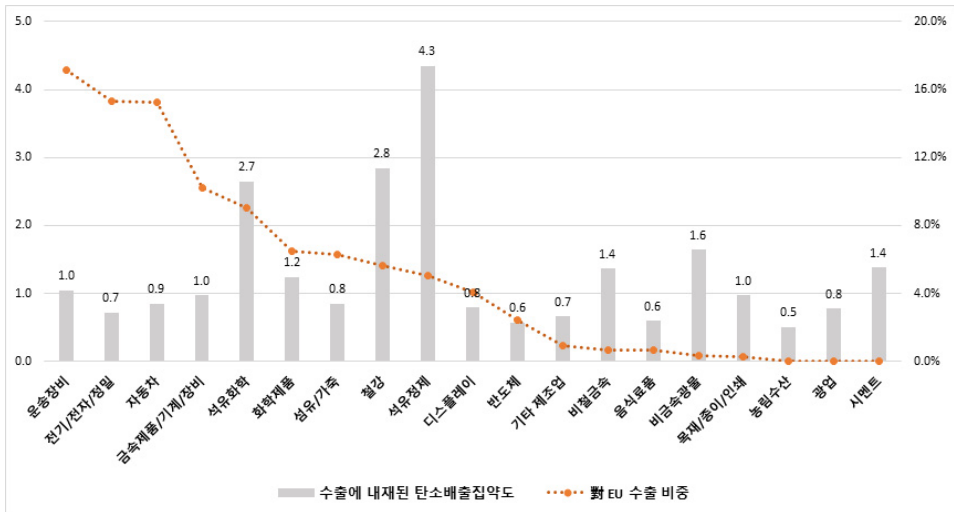


산업 업종별 부담 규모(<그림 2> 참고)를 살펴보면, ▲석유화학 1조 4,630억 원 (17.7%), ▲석유정제 1조 3,475억 원(16.3%), ▲운송장비 1조 974억 원(13.3%), ▲철강 9,731억 원(11.8%), ▲자동차 7,948억 원(9.6%), ▲전기/전자/정밀 6,696억 원(8.1%)으로 6대 주요 산업군에서 총탄소국경조정 부담액의 약 84.3%를 차지하는 것으로 확인된다. 산업 업종별 2030년 기준 對 EU 수출액 대비 탄소국경조정 부담액 비율로 보면, 석유정제(36.4%), 철강(23.8%), 석유화학(22.2%), 화학제품(10.4%), 운송장비(8.8%) 순으로 도출된다(<그림 3> 참고). 그리고 <그림 4>에서 보는 바와 같이 탄소배출 집약도가 높고 수출 비중이 큰 산업군(석유화학, 석유정제, 운송장비, 철강, 자동차, 전기/전자/정밀) 순으로 수출로 발생하는 탄소배출량이 많은 것으로 판단된다.

〈그림 3〉 '30년 기준 산업별 對 EU 수출액 대비 탄소국경조정 부담액
(좌축 단위: 백만 원; 우축 단위: %)



〈그림 4〉 '30년 기준 산업별 탄소배출집약도
(좌축 단위: tCO₂/백만 원) 및 EU 수출 비중(우축 단위: %)



2. 저탄소 정책 시나리오별 산업별 탄소국경조정 부담액 산출

저탄소 정책 시나리오별 탄소국경조정 부담액을 계산하면, ▲에너지 효율향상 시나리오(EE)의 경우 약 7조 2,838억 원, ▲산업별 사용 전력의 저탄소 전환 시나리오(REN)의 경우 약 7조 214억 원, ▲전력 저탄소 전환 및 CCUS 기술 확대 시나리오(REN & CCUS)의 경우 약 7조 96억 원으로 산출되었다. 저탄소 정책 시나리오별 탄소국경조정 부담액은 2030년 기준 EU 수출액 총액의 약 9.6%~10.0%에 해당하는 금액으로 형성되며, BAU 시나리오(11.3%) 대비 산업 전반의 부정적 영향이 감소할 것으로 전망된다(<표 5> 참고).

<표 5> 정책 시나리오별 탄소국경조정 총부담액 변화 비교

	BAU	EE	REN	REN & CCUS
BAU 대비 탄소국경조정 부담 절감액 (단위: 백만 원)	-	961,760.1 (▽11.7%)	1,224,175.7 (▽14.8%)	1,235,921.6 (▽15.0%)
對 EU 수출액 대비 탄소국경조정 부담액 비율 (단위: %)	11.3%	10.0% (▽1.3%)	9.6% (▽1.7%)	9.6% (▽1.7%)

1) EE 시나리오: 산업별 에너지효율 향상 따른 탄소국경조정 부담 변화

에너지 이용 효율 향상을 가정한 EE 시나리오에서 산업별 EU 수출재에 내재된 탄소 배출량을 추정한 결과는 <표 6>과 같으며, BAU 시나리오 대비 총 11.5백만 tCO₂가 감소할 것으로 전망된다. 기준안 BAU 시나리오 대비 EE 시나리오에서 수출로 발생하는 탄소배출량 저감효과가 가장 두드러진 산업군은 ▲석유화학(BAU 대비 약 2.1백만 tCO₂ 저감), ▲석유정제(BAU 대비 약 1.9백만 tCO₂ 저감), ▲운송장비(BAU 대비 약 1.5백만 tCO₂ 저감), ▲철강(BAU 대비 약 1.3백만 tCO₂ 저감), ▲자동차(BAU 대비 약 1.1백만 tCO₂ 저감), ▲전기/전자/정밀(BAU 대비 약 0.9백만 tCO₂ 저감) 순으로 예측된다(<표 6> 참고).

〈표 6〉 '30년 기준 EU 수출에 내재된 업종별 탄소배출량 비교(BAU 및 EE 시나리오)
(단위: tCO₂)

	BAU 시나리오	EE 시나리오	BAU 대비 탄소배출량 감소 규모
농림수산	13,662.3	12,103.7	▽ 1,558.7
광업	6,361.8	5,302.6	▽ 1,059.2
음식료품	298,396.4	264,761.8	▽ 33,634.6
섬유/가죽	3,907,052.1	3,462,947.2	▽ 444,104.9
목재/종이/인쇄	192,438.8	170,821.8	▽ 21,617.0
석유정제	16,106,779.5	14,188,393.3	▽ 1,918,386.1
석유화학	17,487,355.8	15,430,014.9	▽ 2,057,340.9
화학제품	5,853,601.2	5,176,590.8	▽ 677,010.4
시멘트	5,138.8	4,487.0	▽ 651.7
비금속광물	391,120.5	345,538.5	▽ 45,582.0
철강	11,631,319.6	10,285,392.1	▽ 1,345,927.5
비철금속	683,840.2	588,615.6	▽ 95,224.5
금속제품/기계/장비	7,270,610.8	6,430,020.3	▽ 840,590.5
반도체	1,018,946.0	900,492.0	▽ 118,454.0
디스플레이	2,364,854.2	2,094,446.8	▽ 270,407.3
전기/전자/정밀	8,004,081.3	7,070,968.7	▽ 933,112.6
자동차	9,500,013.0	8,404,526.5	▽ 1,095,486.6
운송장비	13,117,380.5	11,601,629.6	▽ 1,515,751.0
기타 제조업	456,337.4	404,101.9	▽ 52,235.5
전력, 가스 및 수도	248,471.1	220,860.2	▽ 27,610.9
여타 산업 ¹⁾	318.0	282.1	▽ 35.8
전체 산업	98,558,079.4	87,052,297.5	▽ 11,495,781.9

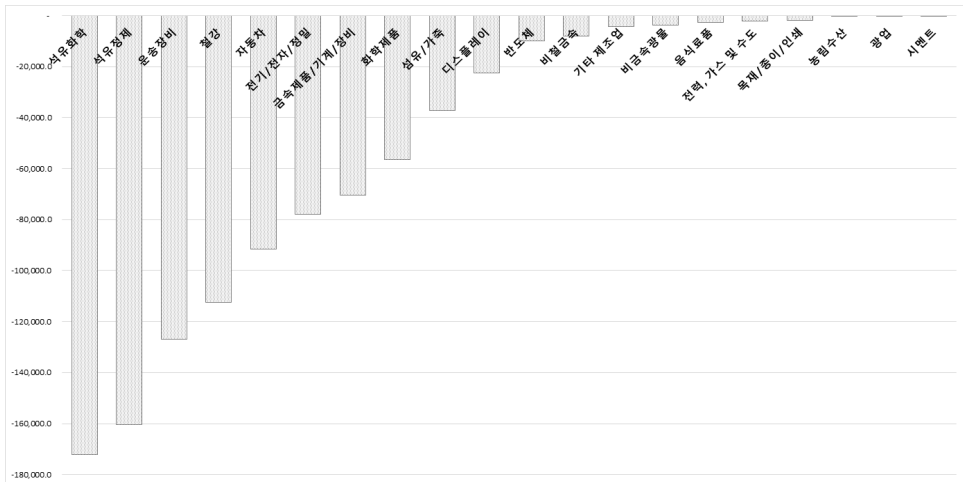
1) '여타 산업'은 본 분석에서 구분한 31개 산업 중 주요 서비스업 부문을 포함함

석유화학, 석유정제 및 철강 산업은 공정 과정에서 직접 배출하는 탄소 규모가 대규모이기 때문에 에너지효율 개선 노력에 의한 탄소배출량 저감효과가 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 석유화학, 석유정제 및 철강 산업에 있어 생산공정과 연계한 고효율 저감 설비 기술개발이나 원료 전환 등 노력이 중장기적으로 필요함을 시사한다. 더불어 석유화학, 석유정제 및 철강 산업은 우리나라 주력 산업인 자동차, 전기/전자/정밀

산업뿐만 아니라 산업 전반에 제품 원료 및 소재 등을 공급하는 핵심 기간 산업으로서 역할을 한다. 이러한 측면에서 석유화학, 석유정제 및 철강 산업의 탄소배출량 저감효과는 산업 간 연관관계를 바탕으로 타 산업(자동차, 전기/전자/정밀, 금속제품/기계/장비, 화학제품, 섬유 등)의 수출로 발생하는 탄소배출량을 저감하는 것으로 해석 가능하다.

이 같은 파급경로를 바탕으로 EE 시나리오에서는 BAU 시나리오 대비 (2030년 기준) 약 9,618억 원의 탄소국경조정 부담액이 절감될 것으로 예상되며, ▲석유화학 산업(BAU 대비 약 1,721억 원 절감), ▲석유정제 산업(BAU 대비 약 1,605억 원 절감), ▲운송장비 산업(BAU 대비 약 1,268억 원 절감), ▲철강 산업(BAU 대비 약 1,126억 원 절감), ▲자동차 산업(BAU 대비 약 916억 원 절감), ▲전기/전자/정밀 산업(BAU 대비 약 781억 원 절감) 순으로 예측된다(<그림 5> 참고).

<그림 5> BAU 대비 에너지 효율 향상 시나리오(EE) 따른 주요 업종별 탄소국경조정 부담액 절감 규모(단위: 백만 원)



2) REN 시나리오: 전력 소비 저탄소화에 따른 탄소국경조정 부담 변화

신재생에너지로의 에너지 전환을 바탕으로 산업의 전력 소비가 저탄소화되는 경우를 가정한 REN 시나리오에서 산업별 EU 수출재에 내재된 탄소배출량을 추정된 결과는 <표 7>과 같으며, BAU 시나리오 대비 총 14.6백만 tCO₂가 감소할 것으로 전망된다. 기

준안 BAU 시나리오 대비 REN 시나리오에서 수출로 발생하는 탄소배출량 저감효과가 가장 두드러진 산업군은 ▲운송장비(BAU 대비 약 2.4백만 tCO₂ 저감), ▲철강(BAU 대비 약 1.9백만 tCO₂ 저감), ▲자동차(BAU 대비 약 1.8백만 tCO₂ 저감), ▲석유화학(BAU 대비 약 1.8백만 tCO₂ 저감), ▲전기/전자/정밀(BAU 대비 약 1.6백만 tCO₂ 저감), ▲금속제품/기계/장비(BAU 대비 약 1.4백만 tCO₂ 저감) 순으로 예측된다.

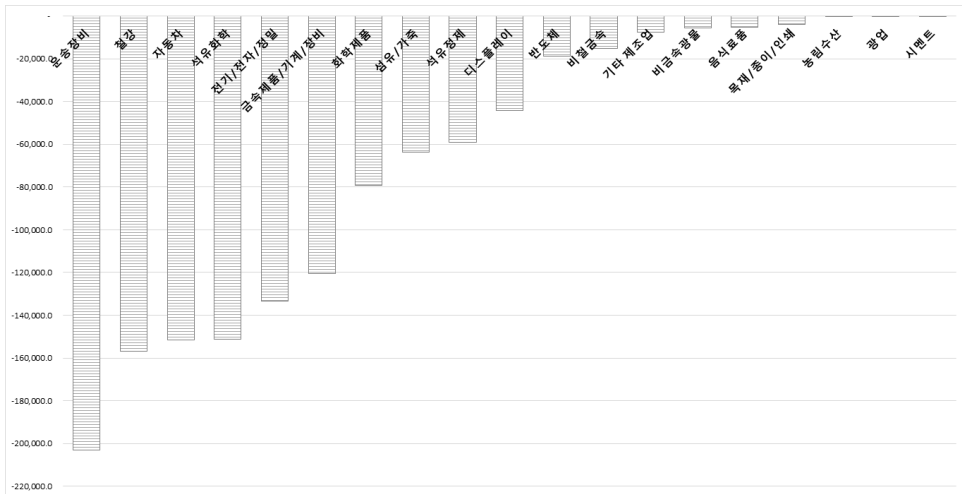
〈표 7〉 '30년 기준 EU 수출에 내재된 업종별 탄소배출량 비교(BAU 및 REN 시나리오)
(단위: tCO₂)

	BAU 시나리오	REN 시나리오	BAU 대비 탄소배출량 감소 규모
농림수산	13,662.3	11,011.2	▽ 2,651.1
광업	6,361.8	5,063.9	▽ 1,297.9
음식료품	298,396.4	237,316.3	▽ 61,080.1
섬유/가죽	3,907,052.1	3,143,823.7	▽ 763,228.4
목재/종이/인쇄	192,438.8	144,086.2	▽ 48,352.6
석유정제	16,106,779.5	15,399,601.5	▽ 707,177.9
석유화학	17,487,355.8	15,681,456.0	▽ 1,805,899.8
화학제품	5,853,601.2	4,908,329.5	▽ 945,271.8
시멘트	5,138.8	4,229.9	▽ 908.9
비금속광물	391,120.5	322,937.5	▽ 68,182.9
철강	11,631,319.6	9,755,771.2	▽ 1,875,548.4
비철금속	683,840.2	502,082.2	▽ 181,758.0
금속제품/기계/장비	7,270,610.8	5,829,874.8	▽ 1,440,736.0
반도체	1,018,946.0	795,207.6	▽ 223,738.5
디스플레이	2,364,854.2	1,835,862.5	▽ 528,991.6
전기/전자/정밀	8,004,081.3	6,410,772.5	▽ 1,593,308.8
자동차	9,500,013.0	7,688,136.7	▽ 1,811,876.3
운송장비	13,117,380.5	10,688,201.7	▽ 2,429,178.9
기타 제조업	456,337.4	365,304.3	▽ 91,033.1
전력, 가스 및 수도	248,471.1	196,337.5	▽ 52,133.6
여타 산업 ¹⁾	318.0	274.5	▽ 43.5
전체 산업	98,558,079.4	83,925,681.3	▽ 14,632,398.1

1) '여타 산업'은 본 분석에서 구분한 31개 산업 중 주요 서비스업 부문을 포함함

운송장비, 자동차, 전기/전자/정밀, 금속제품/기계/장비 산업의 경우 주력 제품을 생산하는 주요 에너지원 중 상당수를 전력으로 활용하는 전력 다소비 산업군으로서 발전원 구성상 신재생에너지 중심으로의 전환에 따른 탄소배출량 저감효과가 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. 더불어 철강, 석유화학 등 에너지 다소비 업종의 경우에도 저탄소 에너지로의 발전 구성 전환과 전력 다소비 산업군의 탄소배출량 저감효과의 연쇄효과 등으로 인해 수출로 발생하는 탄소배출량 저감효과가 큰 것으로 확인된다.

〈그림 6〉 BAU 대비 전력 저탄소화 시나리오(REN) 따른
주요 업종별 탄소국경조정 부담액 절감 규모(단위: 백만 원)



이 같은 파급경로를 바탕으로 REN 시나리오에서는 BAU 시나리오 대비 (2030년 기준) 약 1조 2,242억 원의 탄소국경조정 부담액이 절감될 것으로 예상되며, ▲운송장비 산업(BAU 대비 약 2,032억 원 절감), ▲철강 산업(BAU 대비 약 1,569억 원 절감), ▲자동차 산업(BAU 대비 약 1,516억 원 절감), ▲석유화학 산업(BAU 대비 약 1,511억 원 절감), ▲전기/전자/정밀 산업(BAU 대비 약 1,333억 원 절감), ▲금속제품/기계/장비 산업(BAU 대비 약 1,205억 원 절감) 순으로 예측된다(<그림 6> 참고). 이 같은 REN 시나리오 분석결과는 EU CBAM 적용 확대에 따른 국내 산업 손실을 해소하기 위한 정책대안으로서 신재생에너지 중심 전력공급 체계로의 전환이 지니는 잠재적 기능과 역할을 시

사한다. 이는 신재생에너지 보급 확대를 위한 제도 구축 및 정비를 이뤄낼 필요가 있으며, 이를 바탕으로 신재생에너지의 단점을 중장기적으로 극복하고 산업 전반의 에너지 전환을 꾀할 필요가 있음을 보여준다.

3) REN&CCUS 시나리오: 전력 저탄소화 및 CCUS 기술 확대 따른 탄소 국경조정 부담 변화

산업의 전력 소비가 저탄소화 되는 경우와 주요 산업에 CCUS 기술 확산에 따른 직접 배출이 저감되는 상황을 가정한 REN&CCUS 시나리오에서 산업별 EU 수출재에 내재된 탄소배출량을 추정한 결과는 <표 8>과 같으며, BAU 시나리오 대비 총 14.8백만 tCO₂ 가 감소할 것으로 전망된다. 기준안 BAU 시나리오 대비 REN&CCUS 시나리오에서 수출로 발생하는 탄소배출량 저감효과가 가장 두드러진 산업군은 ▲운송장비(BAU 대비 약 2.5백만 tCO₂ 저감), ▲철강(BAU 대비 약 1.9백만 tCO₂ 저감), ▲자동차(BAU 대비 약 1.8백만 tCO₂ 저감), ▲석유화학(BAU 대비 약 1.8백만 tCO₂ 저감), ▲전기/전자/정밀(BAU 대비 약 1.6백만 tCO₂ 저감), ▲금속제품/기계/장비(BAU 대비 약 1.4백만 tCO₂ 저감) 순으로 예측된다(<표 8> 참고).

앞서 살펴본 REN 시나리오와 비교하였을 때 BAU 대비 산업별 수출로 발생하는 탄소배출 저감효과 분포는 유사한 것으로 확인된다. 더 나아가 REN 시나리오 대비 REN&CCUS 시나리오 내 산업별 수출재에 내재된 탄소배출량을 살펴보면, 석유화학(REN 대비 약 31,306 tCO₂ 저감), 철강(REN 대비 약 23,918 tCO₂ 저감), 운송장비(REN 대비 약 22,655 tCO₂ 저감), 자동차(REN 대비 약 17,493 tCO₂ 저감), 석유정제(REN 대비 약 12,191 tCO₂ 저감), 전기/전자/정밀 산업(REN 대비 약 11,670 tCO₂ 저감) 순으로 CCUS 기술 확산에 따른 추가 탄소배출 저감효과가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

그에 따라 REN&CCUS 시나리오에서는 BAU 대비 (2030년 기준) 약 1조 2,359억 원의 탄소국경조정 부담액이 절감될 것으로 예상되며, ▲운송장비 산업(BAU 대비 약 2,051억 원 절감), ▲철강 산업(BAU 대비 약 1,589억 원 절감), ▲자동차 산업(BAU 대비 약 1,537억 원 절감), ▲석유화학 산업(BAU 대비 약 1,530억 원 절감), ▲전기/전자/정밀 산업(BAU 대비 약 1,343억 원 절감), ▲금속제품/기계/장비 산업(BAU 대비 약 1,212억 원 절감) 순으로 예측된다(<그림 7> 참고). 해당 REN&CCUS 분석결과는 EU

〈표 8〉 '30년 기준 EU 수출에 내재된 업종별 탄소배출량 비교
(BAU 및 REN & CCUS 시나리오)

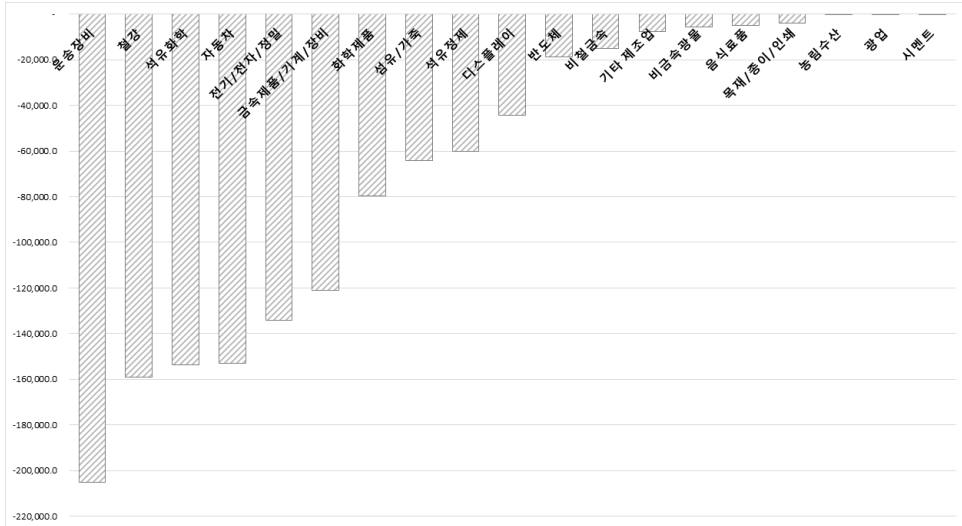
(단위: tCO₂)

	BAU 시나리오	REN&CCUS 시나리오	BAU 대비 탄소배출량 감소 규모
농림수산	13,662.3	11,002.7	▽ 2,659.6
광업	6,361.8	5,060.8	▽ 1,301.0
음식료품	298,396.4	237,162.6	▽ 61,233.9
섬유/가죽	3,907,052.1	3,140,797.8	▽ 766,254.3
목재/종이/인쇄	192,438.8	143,992.3	▽ 48,446.6
석유정제	16,106,779.5	15,387,410.9	▽ 719,368.6
석유화학	17,487,355.8	15,650,150.2	▽ 1,837,205.6
화학제품	5,853,601.2	4,901,442.1	▽ 952,159.1
시멘트	5,138.8	4,227.4	▽ 911.3
비금속광물	391,120.5	322,776.6	▽ 68,343.9
철강	11,631,319.6	9,731,852.7	▽ 1,899,466.9
비철금속	683,840.2	501,786.7	▽ 182,053.5
금속제품/기계/장비	7,270,610.8	5,822,142.9	▽ 1,448,467.9
반도체	1,018,946.0	794,378.2	▽ 224,567.9
디스플레이	2,364,854.2	1,834,257.6	▽ 530,596.6
전기/전자/정밀	8,004,081.3	6,399,102.1	▽ 1,604,979.2
자동차	9,500,013.0	7,670,644.0	▽ 1,829,369.1
운송장비	13,117,380.5	10,665,546.3	▽ 2,451,834.2
기타 제조업	456,337.4	364,962.9	▽ 91,374.5
전력, 가스 및 수도	248,471.1	196,325.1	▽ 52,146.0
여타 산업 ¹⁾	318.0	274.3	▽ 43.6
전체 산업	98,558,079.4	83,785,296.1	▽ 14,772,783.2

1) '여타 산업'은 본 분석에서 구분한 31개 산업 중 주요 서비스업 부문을 포함함

CBAM 적용 확대에 따른 국내 산업의 탄소국경조정 부담을 해소하기 위한 정책대안으로서 신재생에너지 중심 전력공급 체계로의 전환과 함께 산업 부문의 생산활동에 CCUS 기술 등을 적극적으로 활용하는 방안을 연계할 필요가 있음을 시사한다.

〈그림 7〉 BAU 대비 전력 저탄소화 & CCUS 기술 도입 시나리오(REN&CCUS) 따른
주요 업종별 탄소국경조정 부담액 절감 규모(단위: 백만 원)



V. 결론 및 시사점

본 연구에서는 EEIO 분석을 바탕으로 EU CBAM 전면 도입에 따른 산업 전반 부담액을 추산하고자 시도했다. 그리고 국내 저탄소 정책 시행에 따른 산업별 EU CBAM 부담액 변화를 비교분석함으로써 정책대안별 서로 다른 파급경로에 의한 부담액 감소 효과를 확인할 수 있었다. 본 연구의 주요 분석 결과를 토대로, EU CBAM 도입 확대에 대비해 우리나라 주요 산업의 피해를 최소화하기 위한 지원책 마련이 다양한 측면으로 이행될 필요가 있음을 파악할 수 있었다. 특히, 탄소국경조정 부담액이 가장 클 것으로 전망되는 산업군들이 우리나라 경제 내 산업에 미치는 전·후방 효과가 큰 산업들이기 때문에 향후 CBAM 적용 대상 확대 가능성까지 고려해 꾸준히 정책 동향을 모니터링함과 동시에 범 산업 차원에서 지속적으로 탄소국경조정에 대한 대응 및 산업별 탈탄소 전략이 필요할 것으로 예상된다.

그리고 본 연구의 주요 분석 결과는 국내 산업계가 EU CBAM에 대응할 수 있는 대책 마련이 우리나라의 탄소중립 및 저탄소 이행계획 실현을 위한 정책 마련과 함께 조응될

필요가 있음을 시사하고 있다. 그에 따라 특정 분야에 한정해 CBAM 전면도입 확대에 대한 대응전략 수립에 머물 것이 아니라, 정책별 서로 다른 파급경로를 고려해 통합적인 틀에서 정책설계가 이뤄질 필요가 있음을 강조하고자 한다. 이에, EU CBAM을 무역규제 조치로 바라볼 것이 아니라, 글로벌 차원으로 전개되는 탄소중립 흐름 속 국내 산업구조 및 에너지시스템 전환 전략을 보다 효과적으로 이행하기 위한 모멘텀으로 삼을 필요가 있음에 주목하며 다음과 같은 주요 정책적 시사점을 제안하고자 한다.

첫 번째로 탄소국경조정 정책 동향 모니터링 체계가 마련될 필요가 있다. EU CBAM 전면 도입에 의한 부담액이 가장 클 것으로 전망되는 산업군들이 우리나라 경제 내 산업에 미치는 전·후방 효과가 큰 산업들인 석유화학, 석유정제, 운송장비, 철강, 자동차, 전기/전자/정밀 산업 등으로 분석되었다. 이에, 향후 CBAM 적용 대상 확대(예, 품목 및 산업 포함 등) 가능성까지 고려해 꾸준히 정책 동향을 모니터링하고 EU 및 개별 회원국 등과의 긴밀한 소통 채널을 확보할 필요가 있다. 이를 바탕으로 범 산업 차원에서 지속적으로 탄소국경조정에 대한 대응 및 산업별 저탄소 이행전략 수립이 이행되어야 할 것이다. 더불어 우리나라 배출권거래제도 및 탄소중립 관련 규제로 인해 산업별 생산단계에서 부담하는 탄소 비용이 EU CBAM에 반영 및 연계될 수 있도록 외교적 노력이 필요할 것이다.

두 번째로, 탄소국경조정 도입 확대에 따른 취약 산업 보호와 지원책이 체계적으로 마련될 필요가 있다. EU CBAM 적용 대상이 확대될 경우 탄소집약도가 높은 우리나라 주력 수출산업의 수출경쟁력에 작지 않은 충격이 발생할 가능성이 높다. 그에 따라 이들의 수출경쟁력 제고를 위한 산업별 맞춤형 정책지원을 도모하고 수출 다변화 및 글로벌 시장 판로 확대 등을 지원하는 다양한 정책대안을 구상할 필요가 있다. 더불어 EU CBAM 전면 도입에 따른 취약 산업군으로 예상되는 주력 산업군들의 가치사슬과 생산과정 상 발생하는 탄소배출 규모에 대한 데이터 축적과 분석을 이뤄냄으로써 글로벌 공급망 내 경쟁우위 변화에 대한 분석과 함께 지원책 발굴이 필요하겠다. 더 나아가 해당 취약 산업계 내 이해관계자와의 충분한 사회적 논의를 거쳐 ‘저탄소 전환’을 유도하는 방안을 모색할 필요가 있으며, 이를 뒷받침하는 거버넌스 체계를 확립할 필요가 있다.

세 번째로, 생산과정 전환을 통한 에너지효율 향상 지원이 확대될 필요가 있다. 본 연구 내 정책 시나리오 분석 결과 석유화학, 석유정제 및 철강 산업은 공정 과정에서 직접

배출하는 탄소 규모가 대규모이기 때문에 에너지효율 개선 노력에 의한 탄소배출량 저감효과가 두드러지게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 석유화학, 석유정제 및 철강 산업 등에 있어 생산공정과 연계한 고효율 저감설비 기술개발이나 원료 전환 등 기술혁신 노력이 중장기적으로 필요함을 시사한다. 이러한 측면에서 생산현장 스마트화, 생산공정 내 에너지원 전환 및 신기술 활용 등 기술개발 및 확산을 촉진함으로써 산업 내 생산공정 시스템의 근본적 전환을 도모할 필요가 있다.

네 번째로, 신재생에너지 보급 확대를 통해 저탄소 에너지 공급체제로의 개편을 촉진할 필요가 있다. EEIO 분석 결과 신재생에너지 중심의 전력공급 체계로의 전환이 촉진되었을 때 산업계의 탄소국경조정에 따른 부담액이 감소함을 확인할 수 있었다. 그에 따라 지속적인 기술개발을 바탕으로 신재생에너지 발전 원가 하락을 도모하고 디지털전환 기술 등과 접목한 전력계통 유연성 확대, 에너지저장시스템 개발 및 보급 확대를 통한 재생에너지 간헐성 문제 해소 등을 이뤄낼 필요가 있음을 강조하고자 한다. 또한, 신재생에너지 보급 확대를 위한 제도 구축 및 정비를 이뤄낼 필요가 있으며, 이를 바탕으로 신재생에너지의 단점을 중장기적으로 극복하고 산업 전반의 에너지 전환을 꾀할 필요가 있겠다.

다섯 번째로, 저탄소 미래 유망기술에 대한 투자와 기술혁신을 확대할 필요가 있다. 정책 시나리오 분석 결과 EU CBAM 적용 확대에 따른 국내 산업의 탄소국경조정 부담을 해소하기 위한 정책대안으로서 신재생에너지 중심의 전력공급 체계로의 전환과 함께 산업 부문에 CCUS 기술 등을 적극적으로 활용하는 방안을 연계할 필요가 있음을 확인할 수 있었다. 이 같은 분석결과는 탄소집약도가 높고, EU 수출 비중이 큰 산업군(석유화학, 석유정제, 운송장비, 철강, 자동차, 전기/전자/정밀)을 중심으로 비용 효율적 방식으로 CCUS 기술 도입 확산을 도모하기 위한 정책적 노력을 이뤄낼 필요가 있음을 시사한다. 이에, 단순히 기술개발에 대한 투자 및 R&D 지원 확대를 넘어 실제 기술이 산업 생산현장 및 공정과정에 적용될 수 있도록 상용화 지원과 관련 제도 정비를 이뤄낼 필요가 있겠다. 이 같은 종합적이고 구조적인 관점에서의 탄소국경조정 대응전략 수립 및 이행을 바탕으로 세계적 탄소중립 시대 흐름에 능동적으로 대처하고 새로운 성장동력 발굴 및 산업경쟁력 제고를 위한 기회를 마련할 필요가 있겠다.

더 나아가 본 연구는 다음과 같은 주요 한계점이 있음을 밝히며, 후속 연구에서 이를

보완하여 분석 내용의 엄밀성을 개선하고자 한다. 첫 번째로, 다 국가(multi-country) 간 무역 관계를 고려한 국내 타 연구와 비교해 단일국가(single-country)로 범위를 좁힌 본 연구에선 다양한 수입재화의 차별적 탄소집약도를 고려한 탄소무역수지 등을 반영하지 못해 다소 분석상의 엄밀도가 떨어질 수 있다. 하지만 본 연구의 단일국가 EEIO 모형을 활용한 접근은 국내 산업 특성과 산업 간 연관관계를 고려한, 정책 시나리오 분석에 보다 특화된 접근이며, 저탄소 및 탈탄소 정책 시나리오에 따른 탄소국경조정 부담 절감 규모를 파악하는 데 초점을 맞춘 방법론적 접근임을 밝힌다. 두 번째로, 2030년 기준 對 EU 수출액을 계상하는 과정에 있어서 2015년부터 2020년까지의 산업별 수출액 증가율 수치를 기반으로 외삽함에 따라 발생하는 수출액 산정상 엄밀성 역시 후속 연구에서 개선 및 보완하고자 한다.

세 번째로, 본 연구에서 가정한 2030년 기준 탄소가격(톤당 75달러)은 향후 유럽 탄소 배출권(EUA)과 우리나라 배출권 할당 배출권(KAU) 가격 스프레드에 의해 영향 받아 변동될 가능성이 큼을 밝힌다. 그에 따라 후속 연구에서는 탄소가격 결정과 관련한 다양한 시나리오를 탐색하고 적용함으로써 EU CBAM 도입에 따른 파급효과 분석을 심화시켜나가고자 한다. 네 번째로, 본 연구에서 분석에 활용한 설계 시나리오에서 확장하여, 탄소국경조정에 대응하기 위한 또 다른 주요 전략으로서 탄소세 도입과 배출권거래제 개편 등 국내 탄소 가격 결정 메커니즘에 대해 추가적 고려를 이뤄냄으로써 탄소국경조정 부담액 최소화를 위한 국내 에너지 및 환경정책 수립에 심화된 시사점을 제시하고자 한다. 다섯 번째로, 본 연구에서는 설계한 시나리오별 산업계가 마주하게 될 탄소국경조정 부담액을 정량화하고 정책적 시사점을 도출하는 데 초점을 두고 있으므로 시나리오별 부담액이 직접배출, 간접배출 및 기타 간접배출로부터 얼마나 발생하는지에 대한 구체적 파악에는 다소 한계가 있다고 볼 수 있다. 향후 후속연구에서는 설계 시나리오에 대한 구체화와 함께 시나리오별 결과 분석에 있어서의 요인 분해 분석 등 보완적 접근을 이뤄내고자 한다.

[References]

- 그린피스, 『기후변화 규제가 한국 수출에 미치는 영향 분석: 주요 3개국(美, 中, EU)을 중심으로』, 그린피스, 2021.
- 김상태·김남조, “환경산업연관표를 이용한 관광산업 온실가스 배출 구조 분석”, 『한국관광학회 학술대회 발표논문집』, 2010, pp. 1027~1038.
- 김선진·안희정·이윤정, “주요국 기후변화 대응정책이 우리 수출에 미치는 영향: 탄소국경세를 중심으로”, 『조사통계월보』, 제75권 제7호, 2021, pp. 16~45.
- 김윤경, “환경산업연관표 2000을 이용한 산업부문의 이산화탄소(CO₂) 발생 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제15권 제3호, 2006a, pp. 425~450.
- 김윤경, “환경산업연관표 2005를 이용한 산업부문의 이산화탄소(CO₂) 발생 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제20권 제1호, 2011, pp. 1~31.
- 김윤경, “환경산업연관표 작성 및 분석방법에 관한 연구”, 『한국은행(계간국민계정)』, 제2권, 2006b, pp. 44~99.
- 김충실·이현근, “농업부문 에너지 소비의 CO₂ 배출량 분석”, 『한국농촌경제』, 제32권 제1호, 2009, pp. 41~61.
- 문진영·오수현·박영석·이성희·김은미, “국제사회의 온실가스 감축 목표 상향과 한국의 대응방안”, 대외경제정책연구원(KIEP) 정책연구 브리핑, 2020.
- 민슬기·손영환·노수각·박재성·봉태호, “환경산업연관분석을 이용한 농작물의 이산화탄소 배출량 변화와생산량, 재배면적의 상관성 분석”, 『한국농공학회논문집』, 제56권 제1호, 2014, pp. 61~70.
- 박효민, “EU 탄소국경조정메커니즘(CBAM)의 WTO TBT 협정 합치성: 환경, 기술, 그리고 TBT 협정 간 관계 모색”, 『법제논단』, 제696호, 2022, pp. 221~252.
- 산업연구원, “ISTANS DB 국제통계: 국제무역”, 2021.
- 에너지경제연구원, “에너지수급동향자료”, 2017.
- 에너지경제연구원, “에너지통계연보”, 2016.
- 에너지관리공단, “기업 온실가스 배출량 산정 지침서”, 2006.
- 오경수·이지웅·김길환, “신기후협약하에서 선진국 국경탄소조치의 파급효과에 관한 연구”, 에너지경제연구원(KEEI) 연구보고서, 2015.
- 오인하, “배출규제가 탄소수출에 미치는 영향 분석 및 전망: 소비자 관점의 탄소회계와 국경조치

- 의 영향을 중심으로”, 「자원·환경경제연구」, 제21권 제4호, 2012, pp. 851~891.
- 윤승환, “기후변화 대응을 위한 EU 탄소국경조정메커니즘(CBAM)의 경제적 효과 분석”, 「무역연구」, 제18권, 2022, pp. 391~411.
- 이상호·김충실, “국제무역 및 제품에 내재된 탄소함유량 분석”, 「무역학회지」, 제37권 제2호, 2012, pp. 1~19.
- 이천기, “EU 탄소국경조정제도의 주요 내용 및 국제통상법적 시사점”, 「통상법무정책」, 제2권, 2021, pp. 56~81.
- 최한주·이기훈, “환경 혼합 산업연관모형을 이용한 산업별 이산화탄소 배출량 추정과 변화 요인 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제15권 제1호, 2006, pp. 27~50.
- 한국무역협회, “글로벌 무역통계 서비스”, 2020.
- Böhringer, C., J. Schneider, and E. Asane-Otoo, “Trade in carbon and carbon tariffs. Environmental and Resource Economics,” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 78, No. 4, 2021, pp. 669~708.
- Chepeliev, M., I. Osorio-Rodarte, and D. van der Mensbrugge, “Distributional impacts of carbon pricing policies under the Paris Agreement: Inter and intra-regional perspectives,” *Energy Economics*, Vol. 102, 2021, pp. 105530.
- IMF, *The Economics of Climate Change: The Case for Carbon Taxation*, Washington, United States, 2019.
- Kitzes, J., “An introduction to environmentally-extended input-output analysis,” *Resources*, Vol. 2, No. 4, 2013, pp. 489~503.
- Kuusi, T., M. Björklund, V. Kaitila, K. Kokko, M. Lehmus, and M. Mechling, “Carbon border adjustment mechanisms and their economic impact on Finland and the EU,” *Government’s Analysis Assessment and Research Activities*, Vol. 48, 2020, pp. 1~153.
- Liang, S., T. Feng, S. Qu, A. S. Chiu, X. Jia, and M. Xu, “Developing the Chinese environmentally extended input-output (CEEIO) database,” *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21, No. 4, 2021, pp. 953~965.
- Miller, R. E., and P. D. Blair, *Input-output analysis: foundations and extensions*, Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 2009.
- Monjon, S., and P. Quirion, “A border adjustment for the EU ETS: Reconciling WTO rules and capacity to tackle carbon leakage,” *Climate Policy*, Vol. 11, No. 5, 2011b, pp. 1212~1225.

- Monjon, S., and P. Quirion, “Addressing leakage in the EU ETS: Border adjustment or output-based allocation?,” *Ecological Economics*, Vol. 70, No. 11, 2011a, pp. 1957~1971.
- Shapiro, J. S., “The environmental bias of trade policy,” *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 136, No. 2, 2021, pp. 831~886.
- Yang, Y., W. W. Ingwersen, T. R. Hawkins, M. Srocka, and D. E. Meyer, “USEEIO: A new and transparent United States environmentally-extended input-output model,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 158, 2017, pp. 308~318.
- Zhou, X., X. Liu, and S. Kojima, *Carbon emissions embodied in international trade: An assessment from the asian perspective*, Hayama, Japan, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2010.