자원 · 환경경제연구 제 33 권 제 1 호
Environmental and Resource Economics Review
Volume 33, Number 1, March 2024 : pp. 1~32
DOI: https://doi.org/10.15266/KEREA.2024.33.1.1

탄소감축 정책의 경제적 영향: 거시계량모형에 기반한 배출권가격 변동 효과 분석†

이제훈* · 조수진**

요 약 : 배출권거래제는 대표적인 기후정책으로 온실가스 총배출량의 87%(2021년 기준)에 대한 감축 유인체계를 형성한다. 상당량의 감축이 기대되는 가운데 배출권가격 변동이 경제, 에너지 및 환경 부문에 미칠 파급 효과에 대한 심도있는 이해가 필요하다. 본 고는 거시계량 기반 연립방정식 모형을 통해 배출권거래제의 정책효과를 분석한 국내 최초의 연구로, 한국표준산업분류(경제), 에너지밸런스(에너지), 국가온실가스인벤토리(환경)를 연결해 현실 설명력을 제고한 데 의의를 지닌다. E3 동학에 대한 분석결과에 따르면 4년에 걸친 배출권가격의 50% 인상 충격은 온실가스 배출량 감소(-0.043%)와 함께 주요 거시변수인 실질GDP(-0.058%), 민간소비(-0.003%) 및 투자(-0.301%) 등의 하방 이동으로 귀결된다. 배출권가격의 인상은 온실가스 감축목표 달성의 필수불가결한 요소로, 가격 인상 충격에 따른 이행리스크에 대응함으로써 거시경제의 지속가능성을 담보하기 위해 경매수익을 활용한 세수환원 방안을 검토할 수 있다. 본 연구는 법인세 경감 및 경상이전지출 확대 등 세수환원 수단 중 성장 측면에서 후자의 정책 비교우위를 확인했다.

주제어 : 배출권거래제, E3 동학, 거시계량 기반 연립방정식 모형

JEL 분류 : Q58, E17

접수일(2024년 1월 5일), 수정일(2024년 2월 2일), 게재확정일(2024년 2월 2일)

† 본 논문은 연세경제학 발전기금 (조락교 연구클러스터 육성사업) 및 연세 시그니처 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임.

* 연세대학교 경제학부 박사수료, NEXT group 선임연구원, 제1저자(e-mail: lechavrusa@gmail.com)

** 연세대학교 경제학부 조교수, 교신저자(e-mail: soojinjo@yonsei.ac.kr)

Economic Impacts of Carbon Reduction Policy: Analyzing Emission Permit Price Transmissions Using Macroeconometric Models†

Jehoon Lee* and Soojin Jo**

ABSTRACT : The emissions trading system stands as a pivotal climate policy in Korea, incentivizing abatement equivalent to 87% of total emissions (as of 2021). As the system likely has a far-reaching impact, it is crucial to understand how the real economic activity, energy sector, as well as environment would be influenced by its implementation. Employing a macroeconometric model, this paper is the first study analyzing the effects of the Korean emissions trading policy. It interconnects the Korean Standard Industrial Classification (Economy), Energy Balance (Energy), and National Inventory Report (Environment), enhancing its real-world explanatory power. We find that a 50% increase in emission permit price over four years results in a decrease in greenhouse gas emissions (−0.043%) and downward shifts in key macroeconomic variables, including real GDP (−0.058%), private consumption (−0.003%), and investment (−0.301%). The price increase in emission permit is deemed crucial for achieving greenhouse gas reduction targets. To mitigate transition risk associated with price shocks, revenue recycling using auction could ensure the sustainability of the economy. This study confirms the comparative advantage of expanded current transfers expenditure over corporate tax reduction, particularly from an economic growth perspective.

Keywords : Emissions Trading System, E3 Dynamics, Macroeconometric Model

Received: January 5, 2024. Revised: February 2, 2024. Accepted: February 2, 2024.

† This work was supported by the Yonsei Economics Research Fund (R. K. Cho Research Cluster Program) and Yonsei Signature Research Cluster Program of 2023 (2023-22-0019).

* Ph.D. Candidate, Department of Economics, Yonsei University, Senior Research Associate, NEXT group, First author (e-mail: lechavrusa@gmail.com)

** Assistant Professor, Department of Economics, Yonsei University, Corresponding author (e-mail: soojinjo@yonsei.ac.kr)

Ⅰ. 서 론

한국의 온실가스 배출권시장(이하 “배출권시장”)은 총 온실가스 배출량의 87%(2021년 기준)를 관리하는 온실가스 배출 저감의 핵심기제다. 유럽연합의 총 온실가스 배출량 대비 배출권거래제(EU Emissions Trading System, 이하 “EU ETS”) 적용대상 업종의 배출량 비중(39%, 2019년 기준)과 비교할 때, 한국의 배출권시장은 넓은 적용범위(coverage)를 특징으로 한다(손인성 · 김동구, 2023; Nishigaki, 2023). 배출권거래제는 2015년 도입된 이래로 2024년 제3차 계획기간(2021~2025년)을 지나고 있다.[1)]

배출권가격의 수준은 대상업체의 배출(또는 감축)비용(emission costs)에 직접적인 영향을 미치며, 동시에 간접적으로 상품 및 중간재의 가격에 반영되는 것으로 알려진다(Sijm et al., 2012; Jouvet and Solier, 2013; Fabra and Reguant, 2014; Neuhoff and Ritz, 2019; Cludius et al., 2020; Moessner, 2022 등 다수). 탄소감축 규제 및 기후정책 운영에 따른 탄소세율 및 배출권가격 인상의 가격전가는 이행리스크(transition risk)[2)]를 유발한다(박혜진, 2023).

최근 VAR(Vector AutoRegressive) 모형을 통해 배출권가격 전가의 파급효과에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. Nishigaki(2023)는 신케인지안(New Keynesian) 필립스곡선 기반 SVAR(Structural VAR) 모형을 통해 2005년에서 2022년에 걸친 배출권가격 인상의 재생에너지 투자, 생산 갭(the output gap), 장기 인플레이션 기대, 근원인플레이션(core inflation)에 대한 영향을 분석한다. Känzig(2023)는 식별전략(identification strategy)의 일환으로 사건연구(event study)를 통해 배출권가격의 내생성을 해소한다. 본 전략을 통해 거시경제 여건 이외에 정책 변화에 따른 배출권가격 시계열을 추출하며, 이를 도구변수로 사용하여 배출권가격의 거시경제에 대한 역인과성(reverse causality)을 제거한 후 거시경제 파급효과를 분석한다.

---

1) 제1차(2015~2017년), 제2차(2018~2020년)

2) 기후변화는 실물 부문에 물리적리스크(physical risk)와 이행리스크를 유발하며, 이는 운영리스크, 신용리스크, 보험리스크, 유동성리스크 등의 다양한 경로를 통해 금융시장에도 전이될 수 있다(박혜진, 2023). 이행리스크는 물리적리스크 완화를 위해 경제구조를 저탄소경제로 이행하는 과정에서 탄소배출규제, 친환경투자, 신산업 성장 등의 정책적 대응이 실물경제에 미치는 영향으로 정의된다(김재윤 · 전은경, 2021).

위의 두 연구는 배출권시장 내 다수의 참여자는 시장의 효율적 기능 작동에 기여하며, 배출권가격이 시장 여건에 의해 기민하게 반응한다고 가정한다. 이는 소수 대상업체가 참여하는 과점시장의 성격을 지닌 한국의 배출권시장과는 이질적인 가정으로 평가할 수 있다. 아울러 VAR 기반 분석은 일반적으로 다수의 변수를 통합하기 어려워 전달경로(propagation path)에 대한 상세한 분석이 제한되며, 파급효과에 대한 과소(또는 과대) 추정으로 이어질 수 있다.[3)]

에너지와 경제 부문의 상호연결성(linkage) 고려의 필요성은 다수 연구에서 언급된 바 있으며, 기후변화 및 환경정책의 경제적 비용에 대한 논의를 계기로 경제(economy), 에너지(energy), 환경(environment) 3개 부문에 대한 통합연구가 이루어지고 있다(Perman, 2003; Kilian, 2008). 이를 E3라고 지칭하며, 영국 정책연구기관 Cambridge Econometrics의 거시계량 기반 연립방정식 모형(이하 "거시계량모형"), E3ME(E3 MacroEconometric, 이하 "E3ME")가 E3 동학(dynamics)을 반영한 주류 거시계량모형으로 활용된다. E3ME는 정책의 설계요소가 연립방정식 시스템 내 반영되어 직접적 경로뿐만 아니라 간접적 경로에 대해 분석할 수 있는 환경을 제공한다.

Kiss-Dobronyi and Fazekas(2022)는 E3ME를 활용해 유럽연합(이하 "EU") 27개국 에너지집약산업의 탈탄소경로와 탄소국경세(CBAM, Carbon Border Adjustment Mechanism)의 경제, 에너지, 환경 파급효과를 분석한다. Cambridge Econometrics(2020)는 EU ETS 대상범위 확대(수송, 건물)의 파급효과에 대해 E3ME를 통한 시나리오 분석결과를 제시한다. 특히, 동 연구는 배출권가격을 E3ME 내에서 결정되는 내생변수로 취급하며, 도매가격의 소매가격에 대한 완전 가격전가를 가정한다. 반면, 한국은 EU와 비교할 때 배출비용의 소매가격 전가에 대한 높은 강도(stringency)의 규제요소가 작동하는 동시에, 소매가격에 배출비용 신호를 주기 위해 인위적인 가격전가(pass-through) 채널을 활용하는 것으로 평가된다(Munnings et al., 2019; Pollitt et al., 2020). 따라서 배출권가격 전가 채널의 국내 제도적 배경에 대한 검토가 요구된다.

저자에 의해 확인된 바에 따르면, 근래에 배출권거래제의 거시경제 파급효과에 대한

3) Känzig(2023)는 배출권가격의 직접적 파급효과 이외에 VAR 모형으로 포착하기 어려운 간접(또는 일반균형)적 경로의 유효성을 언급하면서, 배출권가격이 소비에 미치는 총 효과 중 간접 경로에 의한 효과의 비중이 약 2/3를 담당한다고 밝히고 있다.

연구는 박경원 · 권오상(2018)이 유일하다.[4] 해당 연구는 연산가능일반균형모형(CGE, Computable General Equilibrium)을 바탕으로 본 연구와 마찬가지로 배출권 구매로 인한 생산비용 인상 경로를 설정한다. 다만, 배출권 무상할당을 보조금의 관점에서 해석한다는 점에서 본 연구의 기회비용 관점의 해석과 이질적인 가정을 활용한다. 이때 거시계량모형은 CGE와 함께 일반균형의 관점에서 다수의 시장과 경제주체 사이의 상호작용을 표현하는 데 활용된다(Guivarch et al., 2022). 거시계량모형과 CGE는 경제주체의 행동 및 시장 청산 등에 대한 상이한 관점을 보유하고 있어, 보완적 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Klein, 1988; Hall, 1995).

배출권시장의 정치적 수용성(politically feasibility)[5]은 온실가스 배출 저감에 대한 기여와 동시에 손실비용[6] 최소화, 즉 거시경제의 지속가능성에서 비롯된다. 본 고는 한국의 규제 기반의 배출권가격 전가 채널에 대한 검토결과를 제시한다. 이를 바탕으로 자체 구축한 거시계량모형을 활용해 E3 동학의 일반균형 관점에서 온실가스 배출 저감 및 거시경제 파급효과를 제시한다.

본 고의 구성은 다음과 같다. Ⅱ 장은 한국의 배출권가격 전가 채널에 대한 제도적 특성에 대한 검토결과를 제시한다. Ⅲ 장은 자체 구축한 거시계량모형의 구조 및 특징에 대해 E3 모듈별로 살펴보고 예측력을 평가한다. Ⅳ 장에서는 시나리오 분석의 일환으로 배출권가격 충격으로 인한 주요 E3 거시변수의 파급효과를 도출한다. 마지막으로 Ⅴ 장에서는 평가 및 향후 과제를 제시한다.

Ⅱ. 배출권가격의 전가: 제도적 배경

배출권가격의 전가 채널은 연료의 열량단가, 소매 전기요금, 수출물가, 배출권 구매로 세분화할 수 있다<그림 1>. 첫째, 「전력시장운영규칙」에 따르면, 연료별 열량단가를 산

4) 해당 연구는 기준연도(2015년)에서 2020년 국가 온실가스 감축목표를 달성하는 과정에서의 거시경제 파급효과에 대한 분석결과를 제시하며, 본 연구의 시나리오 분석기간(4년)과 유사하다.

5) 현재 누리고 있는 삶의 수준에 대해 희생을 요구하거나, 현재 세대의 선택이 미래 세대의 효용을 감소시키는 경우 기후정책에 대한 반발을 유발할 수 있다(Hanley, 2000).

6) 생산량 감소, 높은 인플레이션, 실업률 증가 등은 거시경제에 미치는 손실비용의 예시에 해당한다.

정할 때 환경개선 활동에 수반되는 변동비('19.8~)와 온실가스 배출권의 거래비용('22.1~)이 포함된다. 이때 환경비용이 반영된 열량단가에 따라 급전 순서가 결정되는 방식을 환경급전이라고 한다.[7] 환경급전 체제에서 배출권가격의 인상은 발전용 석탄의 열량단가 인상 및 급전순위 변경에 영향을 미친다. 이는 석탄 수요를 감소시킬 뿐만 아니라 석탄의 대체재에 해당하는 LNG 수요 증가로 연결된다.

둘째, 배출권가격의 소매 전기요금에 대한 가격전가 채널은 기후환경요금[8]을 통해 작동한다. 기후환경요금은 2020년 발표된 원가연계형 요금제의 일환으로 기존 전력량 요금에 내재되어 있는 비용(implicit costs)을 소비자에게 분리 고지(explicit costs)해 투명하게 제공하는데 의의를 지닌다.[9] 기후환경요금은 전체 전기요금의 약 4.9% 수준으로, 2021년 1월 5.3원/kWh(ETS 비용: 0.5원/kWh), 2022년 4월 7.3원/kWh(ETS 비용: 0.8원/kWh), 2023년 1월 9.0원/kWh(ETS 비용: 1.1원/kWh)으로 인상 적용되고 있다(이상엽 외, 2022). 발전 부문의 유상할당에 대한 지속적인 상향 조치가 예상되는 가운데 기후환경요금의 인상은 고지(announcement)에 따른 기대(expectation) 형성과 맞물려 전력 에너지 소비의 유의미한 변화를 이끌어 낼 것으로 예상된다(Känzig, 2021).

셋째, 배출권가격의 수출물가에 대한 가격전가 채널은 2023년 4월 최종 승인된 CBAM 법안의 세부내용에 의해 결정된다.[10] EU ETS 정책 강도의 상향 추세와 연동되는 CBAM은 탄소누출이 우려되는 업종의 특정 제품 중 수입분에 대해 인증서 구매를 요구한다.[11] 인증서 구매비용은 양국의 배출권가격 차액과 유상할당 비율의 고저에 의존하며, 정책 강도의 차이는 수출상품 관세 부담에 따른 가격 인상으로 귀결된다.

---

7) 급전(dispatching)은 전력수요 변동에 따라 발전기 출력을 경제적, 안정적으로 조정하는 행위이다.

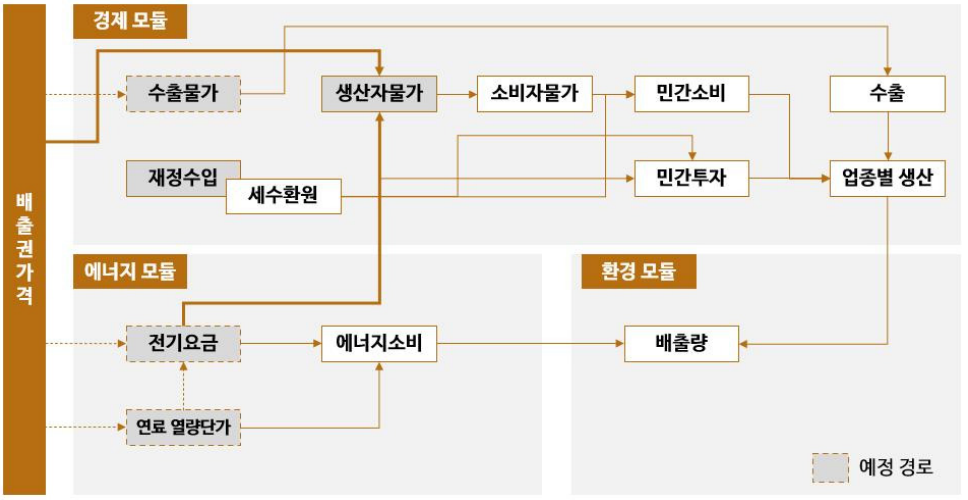
8) 기후환경요금은 신재생에너지 의무이행 비용(RPS), 온실가스 배출권 거래비용(ETS), 미세먼지 계절관리제 시행 등에 따른 석탄발전 감축 비용 등으로 구성된다.

9) https://www.motie.go.kr/motie/gov_info/gov_openinfo/sajun/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=163646&bbs_cd_n=81(최종 접속일: 2023.11.17)

10) CBAM은 2021년 발표된 EU의 Fit-for-55 정책패키지의 일환으로 제안되었으며, 탄소누출(carbon leakage)을 제한하는 것을 목적으로 한다.

11) CBAM의 적용 대상품목은 철강, 알루미늄, 시멘트, 비료, 전력, 수소 등 총 6개 품목이다. CBAM 최종 법안에 따르면, 2023년 10월부터 전환기간을 거쳐 2025년까지 수출기업은 대EU 수입 보고의무가 부여된다. 수출기업의 실질적인 인증서 구매 부담에 대한 규제는 2026년부터 시행될 예정이다.

〈그림 1〉 배출권가격의 전가 채널 도식



출처: 저자 작성

넷째, 대상업체는 할당배출권을 초과하는 배출량에 대해 배출권을 구매해야 한다. 이는 기업이 직면하는 생산자물가에 직접적인 영향을 미친다. 해당 채널은 상기 도식을 기준으로 배출권가격 → 생산자물가로 표현할 수 있다. 다만, 본 고의 분석 기간은 1990년부터 2020년까지로, 열량단가, 소매 전기요금, 수출물가 등의 가격전가 채널이 잠재적 경로에 해당한다. 이에 대한 구체적인 분석은 후속 연구의 주제로 남기고자 한다.

Ⅲ. 거시계량 기반 연립방정식 E3 모형

1. 모형의 개요

본 고는 총량변수들의 관계를 분석하는 거시계량 기반 연립방정식 모형(이하 “본 모형”)을 구축해 배출권가격 전가의 E3 동학을 분석한다. 본 모형은 경제, 에너지, 환경 등 3개의 모듈로 구성되며, 연립방정식 시스템 내에서 모듈 간의 상호작용을 파악하고 정책수단의 효과를 평가하는데 활용된다. 경제 모듈은 지출접근법에 의한 국민소득 결정

과정을 강조하는 케인지안(Keynesian) 이론에 바탕을 두며, 일반균형의 관점에서 최종수요, 생산, 임금 및 물가, 고용, 재정 부문 등 총 5개 부문으로 구성된다. 에너지 모듈은 에너지소비 및 가격 부문, 환경 모듈은 온실가스 배출량 부문으로 구성된다. 본 모형은 224개 행태식(또는 추정방정식, stochastic equations)과 84개 정의식(또는 항등식, identities)을 포함해 총 308개 방정식으로 구성된다.

경제 모듈 내 세부 부문별 행태식은 최종수요 부문 10개, 생산 부문 19개, 임금 및 물가 부문 7개, 고용 부문 2개, 재정 부문 6개로 총 44개의 방정식으로 구성된다. 경제 모듈은 한국의 중앙은행, 한국은행의 BOK20의 모형 설정(specification)을 주로 참고한다.[12] BOK20에서 공개하지 않는 방정식 체계는 BOK04의 방정식 체계와 관련 선행연구를 바탕으로 구축한다.[13] 아울러 본 모형은 경제, 에너지, 환경 3개의 모듈의 상호연관성을 강조한다는 점에서 경제이론과 분석의 목적성을 동시에 고려해 조정과정을 거친다.

모형 추정에 사용한 표본은 1990~2020년의 31개의 연간 자료이며, 추정방법은 최소자승법(OLS, Ordinary Least Squares)을 사용한다. 소수의 개별 행태식을 추정하는 과정에서 내생성이 의심되는 경우 도구변수(instrumental variable) 활용이 요구된다. 그러나 본 모형은 308개의 식으로 구성된 대규모 모형으로, 개별 행태식의 엄밀한 추정보다는 모형 전체의 정합성과 파급경로의 설계에 주안점을 둔다. 거시계량모형을 정책분석의 목적으로 활용하는 국내외 다수 기관에서 행태식을 추정하는 방법론으로 최소자승법을 사용하는 것을 확인할 수 있다(부경진 외, 2003; 양준모 외, 2008; 김재혁, 2016; 조하현 외, 2019).[14]

아울러 모형 전체의 신뢰성과 개별 행태식의 정합도를 높이기 위해 통상적 검정통계량인 결정계수, 추정계수의 통계적 유의수준(t-value), Durbin-Watson 통계량 등을 이용해 추정 행태식의 적합성을 평가하고, 개별 회귀식의 오차분포 등을 고려해 자기회귀시차를 결정한다(황상필 외, 2005).[15] 본 모형의 행태식이 모두 통계적 검정을 통과하는

12) BOK20은 2020년에 한국은행이 개발한 거시계량 기반 연립방정식 모형으로 37개의 행태식과 10개의 정의식, 65개의 변수로 구성된다.

13) 관련 선행연구는 경제이론을 기반으로 고려대상에 해당하는 설명변수의 종류를 제시해주는 반면, 변수들 사이의 상호관계에 대한 수리적인 관계를 사전에 결정해주지는 않는다(부경진, 2002).

14) 대규모 모형에서는 일반적으로 가성회귀(spurious regression)를 고려하지 않는 경우가 많으며, 가성회귀 문제를 해결하고자 분기별 모형에서는 공적분을 고려한 오차수정모형을 추정하기도 하나 본 모형은 연간 모형으로 표본의 수가 제한적이므로 공적분 검정을 신뢰하기 어렵다(김재혁, 2016).

것은 아니나, E3 동학에 대한 선험적 이론과의 부합성과 동태적 안정성에 필요하다고 판단되는 경우 행태식의 통계적 적합도가 다소 부족하더라도 모형에 포함한다(손민규 외, 2013).

2. 자료

각 모듈의 세부 구성에 대한 논의에 앞서 모듈별 행태식 추정을 위해 사용된 자료에 대해 서술한다. 경제 모듈은 한국은행의 경제통계시스템(ECOS)을 이용해 구축한다. 경제 모듈의 최종수요 부문은 국민소득통계(2015년 기준년 개편 시계열)를 활용한다.[16] 생산 부문은 국민소득통계의 경제활동(산업)별 추계된 생산국민소득을 이용한다. 산업은 농림어업, 광공업(광업 및 제조업), 전기, 가스 및 수도사업, 건설업, 서비스업 등 5개 산업으로 구분되며, 이 중 제조업은 10차 한국표준산업분류(KSIC, Korea Standard Industry Code)에 따라 13개 업종으로 분류된다. 재정 부문은 통합재정수지(현금주의)와 국민계정(발생주의)의 이질적 회계기준에 따른 집행시기와 국민계정 계상시기 간 시차를 감안해 국민계정체계를 준용하는 OECD Revenue Statistics를 활용한다(박경훈 외, 2020).

에너지 모듈은 에너지경제연구원의 에너지밸런스(Energy Balance, 에너지수급통계)를 활용한다. 에너지밸런스는 에너지상품(석탄 및 석탄제품, 석유 및 석유제품, 천연가스 및 도시가스, 전력 및 열, 신재생에너지 및 기타 등)과 상품의 흐름(공급, 전환공정, 에너지산업 자체소비, 최종소비)에 대한 분류체계를 바탕으로 에너지정책 수립을 위한 기초자료로 활용된다(김종우 · 박상규, 2021). 본 고는 전환공정, 에너지산업 자체소비, 최종소비 등 각 부문 및 업종의 에너지소비에 초점을 맞추어 분석한다.

에너지 모듈은 에너지소비 및 에너지가격 부문으로 구분한다. 에너지원은 에너지밸런스의 체계를 준용하며, 총발열량을 기준으로 TOE(Ton Of Equivalent, 석유환산톤) 단위로 환산하여 상품 간 비교 및 합산을 용이하게 한다. 에너지가격 부문은 석탄 및 석

15) 잔차항에 시계열 종속성 발생시, 종속변수의 시차항을 설명변수에 포함하는 동태모형(dynamic model) 또는 잔차항의 시차구조를 반영하는 Cochrane-Orcutt 조정을 활용한다(김재혁, 2021).

16) 본 모형은 BOK20과 마찬가지로 최종수요 부문의 실질변수를 활용한다. 연쇄가중법을 기반으로 추계된 실질 GDP는 총량지표가 구성항목의 합 간 가법성(additivity)이 성립하지 않는다는 단점이 존재한다. 총량지표와 구성항목의 합간 차이는 통계상 불일치 항목에 반영한다.

탄제품, 석유 및 석유제품, 천연가스 및 도시가스, 전력 가격으로 구분한다.[17] 석탄 및 석탄제품은 무연탄 및 유연탄 수입단가의 평균값, 천연가스 및 도시가스는 도시가스 소비자가격의 평균값, 석유 및 석유제품은 석유제품 소비자가격의 평균값, 전력은 종별 판매단가의 평균값을 적용한다.

환경 모듈의 온실가스 배출량은 국가온실가스인벤토리 보고서(National Inventory Report, 이하 "NIR")[18]에서 제공하는 1990~2020년의 총 31개 연도의 자료를 활용한다.[19] 온실가스 배출량이 가장 많은(86.8%, 2020년 기준) 에너지 분야는 연료연소와 탈루에서 발생하는 온실가스 배출을 포함한다. 연료연소는 화석연료 소비에 따라 직접 배출되는 온실가스를 산정하고 탈루는 연소과정이 아닌 에너지 생산 · 소비과정(e.g., 채광, 생산, 공정 등)에서 배출되는 온실가스를 산정한다. 연료연소에 의한 온실가스 배출량은 에너지밸런스의 에너지소비를 활동자료[20]로 활용한다(박년배 · 심성희, 2015).

경제, 에너지, 환경 등 3개 모듈은 아래 <표 1>과 같이 연결할 수 있다. 본 고의 주요 목적은 배출권가격 전가의 거시경제 지속가능성에 대한 영향과 함께 온실가스 배출 저감 효과에 대한 정량적 평가에 있다. 따라서 온실가스 배출량 산정에 활용되는 NIR의 공통보고양식(CRF, Common Reporting Format)[21]에 대한 정합성 제고를 위해 환경 모듈의 분류체계에서 활용한 분류 방식을 기저 분류로 설정한다.[22]

---

17) 열 에너지원의 대부분은 가정에서 난방용으로 사용되며, LNG를 주연료로 활용한다. 따라서 열 에너지원의 가격으로 LNG 가격의 대리변수인 도시가스 가격을 활용한다. 다만 「지역냉난방 열요금 산정기준 및 상한 지정」에 의거 열 에너지원의 가격에 대한 규제가 작용하며, 열 소비에 대한 가격 신호가 상대적으로 미미할 것으로 예상할 수 있다(출처: https://www.ekn.kr/web/view.php?key=20221025010003870, 최종 접속일: 2023.9.26.).

18) NIR은 기후변화에 관한 정부간 협의체 지침(IPCC GL, Intergovernmental Panel on Climate Change GuideLines)의 분류에 따라 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(이하 "LULUCF"), 폐기물 등 5개 분야로 구분해 온실가스에 대한 배출 · 흡수량을 보고하기 위해 작성된 통계이다(온실가스종합정보센터, 2022a).

19) 본 고를 작성하는 시점에서 온실가스 배출량은 2020년까지의 자료가 최신에 해당한다.

20) 특정 기간 동안 온실가스의 배출 또는 흡수를 야기하는 인간 활동량에 대한 자료(온실가스종합정보센터, 2022a)

21) 국가온실가스인벤토리의 배출 · 흡수 항목별로 활동자료, 배출계수 및 배출량 등을 포함한다.

22) 예시로 환경 모듈의 분류체계에 따르면 철강과 비철금속 배출원이 구분되는 반면, 한국표준산업분류는 1차금속으로 통합되어 있다. 이때 본 고는 환경 모듈의 철강 및 비철금속 배출원으로 구분된 분류 방식을 유지하며, 이들을 설명하는데 경제 모듈의 1차금속 업종의 부가가치를 동시에 활용한다.

〈표 1〉 모듈별 분류체계의 비교 및 연결

환경 모듈(연료연소)		에너지 모듈	경제 모듈
배출원	CRF코드	에너지밸런스	한국표준산업분류(분류코드)
에너지산업	1A1	에너지전환, 광업, 기타에너지	-
공공 전기 및 열 생산	1A1a	발전, 지역난방	전기 · 가스 · 수도(35)
석유정제	1A1b	가스제조, 자가소비 및 손실	정유(19)
고체연료 제조 및 기타에너지 산업	1A1c	광업, 기타에너지	광업(05~08)
제조업 및 건설업	1A2	제조업	제조업
철강	1A2a	1차금속	1차금속(24)
비철금속	1A2b	비철금속	
화학	1A2c	석유 · 화학	석유화학(20~22)
펄프, 제지 및 인쇄	1A2d	펄프 · 인쇄	목재 · 종이 · 인쇄(16~18)
식음료품 가공 및 담배 제조	1A2e	음식 · 담배	음식료품(10~12)
기타	1A2f	-	-
비금속	1A2f1	비금속	비금속광물제품(23)
조립금속	1A2f2	조립금속	기계 · 운송장비(25~31)
나무 및 목재	1A2f3	목재 · 나무	목재 · 종이 · 인쇄(16~18)
건설	1A2f4	건설업	건설(41~42)
섬유 및 가죽	1A2f5	섬유 · 의복	섬유 · 가죽(13~15)
기타 제조	1A2f6	기타 제조	기타 제조(32~34)
수송	1A3	수송 부문	-
기타	1A4	-	-
상업/공공	1A4a	상업 부문, 공공 부문	서비스업
가정	1A4b	가정 부문	
농업/임업/어업	1A4c	농림어업	농림어업(01~03)
미분류	1A5	-	-

출처: 온실가스종합정보센터(2022a, 2022b), 한국은행(2023), 환경부(2014)를 참고하여 저자 작성

3. 경제 모듈

1) 최종수요 부문

최종수요 부문은 국내총생산(GDP)의 주요 지출 항목인 소비(최종소비지출), 투자(총고정자본형성), 재화 및 서비스 수출입으로 분류한다. 소비는 민간소비와 정부소비로 구분되며, 민간소비 행태식은 자기회귀시차를 활용해 소비의 관행성(consumption smoothing)을 반영한다. 이외에도 가계가처분소득, 실질금리, 대미환율, 정책 불확실성, 고령인구 부양비율 등을 설명변수로 활용한다. 투자는 민간투자와 정부투자로 구분되며, 이는 다시 건설투자, 설비투자, 지식재산생산물투자로 세분화된다. 가속도원리(acceleration principle)에 따라 민간 투자수요의 대리변수로 기업가처분소득을 사용한다. 이외에도 주택매매 가격지수, 대미환율, 건축허가면적 등을 설명변수로 활용한다. 투자의 증가는 소득의 증가를 유발하며, 소득 증가는 기업가처분소득의 증가를 통해 추가적인 투자로 이어진다. 정부투자는 정부소비와 같이 정책의지에 따른 변동성을 고려해 외생변수로 취급한다.

2) 생산 부문

생산 부문은 국민계정 내 경제활동(산업)별로 추계된 국내총생산을 총 18개 업종으로 구분한 업종별 실질 부가가치 자료를 활용한다.[23] BOK20은 분석의 범위를 국가 경제로 설정하고 있어 생산 부문의 모형 설정은 산업에 특화된 거시계량모형인 차경수 · 오세신(2014)을 주로 참고한다. 생산 부문에서 업종별 생산은 시장의 수요 및 공급 요인에 의해 결정된다. 차경수 · 오세신(2014)은 수요 요인의 대리변수로 실질GDP를 활용하며, 공급 요인의 대리변수로 생산자물가지수를 활용한다.[24]

다만, 생산비용의 상승을 제품가격에 전가할 수 있는 후방산업에 해당하는 업종은 채산성을 보존하거나 증가시킬 수 있어 상대적으로 가격전가가 어려운 전방산업 업종에 비해 영향을 적게 받는다(차경수 · 오세신, 2014). 유사한 맥락으로 Herrera et al.(2011)

23) 농림어업, 광업, 제조업(13개 업종), 전기, 가스 및 수도사업, 건설업, 서비스업 등 18개 업종
24) 생산자물가지수에 대한 세부적인 논의는 후술하는 절(임금 및 물가 부문)에서 다룬다.

은 업종별 에너지 집약도에 따른 유가와 생산의 이질적 관계를 언급한 바 있다. 따라서 본 모형은 생산자물가지수의 업종별 생산에 대한 부호 제약을 별도로 설정하지 않는다. 아울러 수출의존도가 높은 화학물질 및 화학제품 제조업, 컴퓨터, 전자 및 광학기기 제조업 등의 업종에 대해 환율을 설명변수로 추가 활용한다.[25)]

전통적 케인지안 이론 기반의 모형들은 지출국민소득에 집중하며, 생산 부문을 포함시킬 경우 Cobb-Douglas 생산함수로 GDP(또는 잠재GDP)를 추정한다(부경진, 2002; 부경진 외, 2003; 신석하, 2005; 조경엽 외, 2011). 특히 E3 동학을 다룬 연구에서는 Cobb-Douglas 생산함수의 변형인 CES(불변대체탄력성, Constant Elasticity of Substitution) 생산함수를 기반으로 노동과 자본 외에 에너지 및 자원 생산요소를 추가한 KLEM 모형을 구축하고 이를 토대로 GDP(또는 잠재GDP)를 추정하는 것을 확인할 수 있다(부경진, 2002; 부경진 외, 2003; 안지운, 2011). 다만, 해당 접근법은 데이터의 한계로 업종 단위의 세부적인 추정이 불가능하며, 요소별 분배몫에 대한 추정계수가 불안정하다는 한계에 노출된다. 분배몫 설정의 오류는 에너지소비 및 효율 향상의 GDP(또는 잠재GDP)에 대한 효과를 왜곡시킬 수 있다. 대안으로 본 모형은 생산 부문의 업종별 부가가치(VA, Value Added)를 최종수요 부문 실질GDP의 함수로 추정한다.

3) 임금 및 물가 부문

임금 및 물가 부문은 소비자물가지수, 생산자물가지수, 수출물가지수, 수입물가지수, 명목임금으로 구성된다. 수입물가, 환율, 명목임금은 생산자물가에 영향을 미치며, 생산자물가와 실질GDP는 소비자물가를 상승시키는 파급경로로 활용된다. 생산자물가와 소비자물가의 상승은 기업 및 가계가처분소득의 감소로 이어지며 민간소비를 위축시킬 수 있다. 연이어 소비자물가는 명목임금의 상승요인으로 작용하며, 이를 임금과 물가의 순환구조(wage-price spiral)라 지칭한다(Blanchard, 1986; Kandil, 2007).

본 고의 목적과 제도적 배경에 대한 검토결과에 따르면, 배출권가격의 전가 경로는 생산자물가에 반영되며 이는 E3 동학을 작동시키는 매개변수(linkage variable) 역할을 한

25) 제조업 평균 산출 대비 수출 비중(34.48%)를 초과하는 경우 환율을 설명변수로 활용한다(출처: https://www.istans.or.kr/mobile/suResult.do?scode=S320&pName=산업연관관계, 최종 접속일: 2023.11.17.).

다.[26] 따라서 본 모형의 생산자물가지수의 행태식은 수입물가지수, 환율, 명목임금, 국제유가 외에도 전기요금과 배출권가격을 추가로 포함한다. 이때 배출권거래제 할당대상 업종에 해당되지 않는 건설업, 기타 제조업, 서비스업, 농림어업과 나머지 업종을 구분해 생산자물가지수를 구성한다. 전자의 업종별 생산자물가지수의 평균값을 비(非)영향권 생산자물가지수, 후자의 생산자물가지수의 평균값을 영향권 생산자물가지수로 활용한다.[27]

4) 고용 및 재정 부문

고용 부문은 취업자수, 실업자수, 경제활동인구, 실업률, 경제활동참가율로 구성된다. 재정 부문은 재정수입과 재정지출로 구분된다. 재정수입은 조세 및 사회보장기여금으로 구성되며, 조세는 개인소득세, 법인세, 재산세, 소비세, 관세로 분류할 수 있다. 재정지출은 정부소비, 정부투자, 이전지출로 구성되며 외생변수로 설정한다. 개인소득세와 사회보장기여금은 총임금의 함수, 법인세는 기업 영업실적의 대리변수인 총수요의 함수, 재산세는 주택매매가격의 함수, 소비세는 국내수요의 함수, 관세는 총수입의 함수로 설정한다(박경훈 외, 2020).[28]

4. 에너지 모듈

1) 에너지소비 부문

에너지소비는 업종별 부가가치(또는 소득)와 에너지원별 가격의 함수로 구성된다.[29]

---

26) 무상 및 유상할당 등 업종별 할당방식과 비중의 영향으로 배출권가격의 생산자물가지수에 대한 영향이 상이하게 나타날 수 있다. Kiss-Dobronyi and Fazekas(2022)에 따르면, 기업은 무상으로 할당받은 배출권(배출허용총량)을 통해 판매수익을 취득할 수 있는 점을 고려해, 할당방식과 무관한 기회비용 관점의 해석을 강조한다. 따라서 본 고는 배출권 할당방식과 가격전가의 비의존성을 가정한다.

27) 산업통계 분석시스템(ISTANS)에서 1995년부터 2022년까지의 산업별 생산자물가지수 통계를 제공한다. 표본기간의 통일을 위해 1990~1994년의 산업별 생산자물가지수는 생산자물가지수 총지수의 흐름과 동일하다는 가정을 활용해 가공한다. 거시계량모형에 업종 및 에너지원에 따라 구분한 물가지수를 반영하는 분석 방법은 차경수 · 오세신(2014)과 최봉석 외(2014) 등을 참고할 수 있다.

28) 박경훈 외(2020)는 재산세를 주가와 주택매매가격의 함수로 설정하나, 주가에 대한 외생적 가정의 난해함을 감안해 본 고는 이를 제외한다.

29) 신희철 · 허성윤(2023)의 문헌조사 결과에 따르면, 에너지소비의 결정요인을 분석한 주요 연구에서 소득, 에너지가격, 금융개발, 기술혁신 등을 사용한 것으로 밝히고 있다.

예를 들어, 석유 · 화학업종의 전력 에너지소비는 화학물질 및 화학제품 제조업의 부가가치와 전기요금에 의해 결정된다. 에너지소비에 대한 에너지가격의 효과는 자기가격탄력성과 대체(교차)가격탄력성으로 구분된다. 경제이론에 따르면 음(−)의 자기가격탄력성 계수가 예상된다. 이와 반대로 추정될 경우 해당 에너지원의 에너지소비에 대한 가격효과가 작동하지 않는 것으로 판단해 가격변수를 제외한다. 여타 에너지원과 달리 신재생에너지원은 에너지가격에 대한 대표변수 구축의 한계와 시장의 비성숙도를 고려해 신재생에너지원의 누적소비량을 에너지가격의 대리변수로 사용한다(안지운, 2011).[30]

2) 에너지가격 부문

한국의 에너지 수입의존도[31]는 94.8%(2021년 기준)로 대부분의 1차에너지 공급을 해외에 의존하고 있다(에너지경제연구원, 2022). 아울러 국내 에너지원별 가격의 국제유가 동조성에 대한 실증연구 결과를 토대로 에너지가격의 설명변수로 환율과 국제유가를 활용한다(양준모 외, 2008; 고유경, 2013; 정수관 · 원두환, 2020; 김재혁, 2021; 박철웅 · 박철호, 2022; 문명배 외, 2022).

5. 환경 모듈

환경 모듈은 이산화탄소 단위로 환산한 온실가스 배출량 부문으로 구성된다. NIR에 따르면, 온실가스 배출량은 에너지, 산업공정, 농업, LULUCF, 폐기물 분야로 세분화된다. 본 고는 에너지 분야의 연료연소 배출원의 온실가스 배출량을 활동자료(에너지소비)로 구성된 행태식을 통해 추정한다. 산업공정 분야의 온실가스 배출량은 경제활동에서 기인하는 배출량으로 간주하고 경기 변수(실질GDP)의 함수로 설정한다.[32]

30) 대리변수의 설정은 학습곡선(learning curve)에서 나타나는 지식이 축적된 사람의 행동이나 누적 생산 경험이 가격 또는 생산비용에 미치는 영향에 대한 관계를 적용한 결과이다(안지운, 2011).

31) 1차에너지 공급 중 수입 에너지의 비중을 의미한다.

32) 에너지 분야의 연료연소 및 산업공정을 제외한 분야의 온실가스 배출량은 외생변수로 취급한다.

Ⅳ. 의태분석(backcasting)을 통한 모형의 평가

연립방정식 모형에서 예측력 평가는 의태분석(backcasting)이라 일컬으며, 시뮬레이션의 결과와 실제 데이터를 비교함으로써 모형의 예측력을 검정하기 위해 활용된다(부경진, 2002). 따라서 시뮬레이션을 통해 도출된 내생변수의 해(예측치, predicted value)가 실제치(actual value)와 근접할수록 모형이 강건하게 구축되었다고 평가한다. 본 고는 2016년부터 2019년까지[33] Gauss-Seidel 기법[34]과 오차가 누적되는 방식의 동태적 시뮬레이션(dynamic simulation)을 적용한다. 모형의 적합성 및 안정성을 판단하기 위해 평균 절대치 백분율 오차(MAPE, Mean Absolute Percent Error)와 Theil's IC(Inequality Coefficient, 불평등계수) 2개의 지표를 사용하며, 평가 기준으로 MAPE는 8% 내외, Theil's IC는 0에 근접한 수치를 활용한다.[35]

$$\text{MAPE} = \frac{100}{T} \times \sum_{t=1}^{T} \left| \frac{Y_t^s - Y_t^a}{Y_t^a} \right| \tag{1}$$

$$\text{Theil's IC} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(Y_t^s - Y_t^a)^2}}{\sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(Y_t^s)^2} + \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(Y_t^a)^2}} \tag{2}$$

식 (1)과 (2)는 MAPE와 Theil's IC의 산식이다. 여기서 T는 시뮬레이션 기간, Y_t^s는 시뮬레이션의 해, Y_t^a는 실제치를 의미한다. 경제, 에너지, 환경 모듈 내 대부분의 내생변

33) 2019년 말 발생한 COVID-19(코로나바이러스감염증-19)의 구조변화(structural change) 영향을 고려해 2016년부터 2019년까지를 시뮬레이션 및 예측력 검정의 기간으로 설정한다.

34) 연립방정식의 해를 도출하는 방법으로 소거법(elimination methods)과 반복법(iterative methods)이 존재한다. Gauss-Seidel은 반복법에 해당하며 시뮬레이션의 결과는 내생변수의 순서, 초기값, 허용오차(tolerance)의 설정에 의존한다.

35) MAPE가 3% 이하이면 뛰어난 예측력(excellent), 5% 이하이면 우수(good), 8% 이상이면 그 모델의 예측력은 받아들일 수 없는(not acceptable) 것으로 보는 것이 일반적인 해석이다(부경진, 2002). Theil's IC는 0에 가까울수록 우수한 예측력, 1에 가까울수록 열등한 예측력을 의미한다.

수의 MAPE 및 Theil's IC가 평가 기준에 속하였다. 주요 내생변수의 동태적 시뮬레이션 결과는 다음 <표 2>와 같다. 예외적으로 특정 내생변수에서 MAPE 이상치(outliers)가 확인되나 시뮬레이션 결과가 실제치의 움직임을 반영하며, 해당 변수의 모형 전반에 대한 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

〈표 2〉 최종수요 부문 예측력 평가 주요 결과(MAPE, Theil's IC)

내생변수	MAPE(%)	Theil's IC
민간소비	2.38	0.01
민간건설투자	6.61	0.03
민간설비투자	5.40	0.03
민간지식재산생산물투자	3.48	0.01
국민총소득	4.14	0.02
국내총생산	2.77	0.01

주: 예측력 평가 결과의 전체 결과는 저자에게 요청 시 제공된다.

Ⅴ. 배출권가격 전가의 파급효과 분석[36)]

1. 배출권가격 시나리오

본 장은 배출권가격의 변화가 E3 동학을 통해 경제, 에너지, 환경에 미치는 단기적 파급효과에 대한 분석결과를 서술한다. 동태적 시뮬레이션은 2016년부터 2019년까지 총 4개년에 대해 수행하며 이행리스크에 초점을 맞춘다. 배출권가격의 변화는 생산자물가 가격전가 채널을 통해 경제, 에너지, 환경에 대한 파급효과를 유발한다. 본 장은 녹색금융협의체(Network for Greening the Financial System, 이하 "NGFS")에서 제시하는 다수의 기후시나리오 중 67%를 상회하는 확률로 기온 상승을 1.5°C로 억제하는 "Net Zero 2050" 시나리오를 활용한다.[37)]

36) 본 모형에서 사용한 변수의 소개 및 주요 행태식의 추정결과는 부록을 참고할 수 있다.
37) NGFS는 정책 강도에 따른 기후시나리오를 공개하며, 시나리오별 탄소가격의 전망결과를 제시한다.

2. E3 파급효과

1) 경제 파급효과

배출권가격 상승은 생산자물가에 4년간 평균 0.415%의 가격전가를 유발하며, 이는 경제 전반에 걸친 비용 상승을 견인한다. 반면, 생산자물가의 상승은 소비자물가로 전가되지 않았다. 게다가 생산비용 인상의 효과에 비해 경기 악화의 영향이 크게 작용해 소비자물가의 하향 추세(−0.023%)로 연결된 것으로 보인다.[38] 생산자물가 인상과 교역조건 악화는 기업가처분소득을 감소시켜 민간투자를 평균 0.301% 감소시킨다. 배출권가격의 전가는 거시경제 전반에 대한 채널을 통해 실질GDP의 0.058% 감소로 이어진다<표 3>.

〈표 3〉 최종수요 부문에 대한 파급효과

(단위: %)

구분	1년차	2년차	3년차	4년차	연평균 변화율
민간소비	−0.000	−0.002	−0.004	−0.005	−0.003
민간투자	−0.201	−0.308	−0.385	−0.309	−0.301
GDP	−0.045	−0.064	−0.075	−0.049	−0.058
소비자물가	−0.016	−0.026	−0.030	−0.019	−0.023
생산자물가	0.341	0.444	0.515	0.359	0.415

배출권가격의 전가는 실질GDP의 하향 압박요인으로 작용하며, 총 18개의 업종 중 13개의 업종(72%)에서 음(−)의 영향을 미치는 것으로 나타난다<표 4>. 이때 가격설정력을 보유한 업종은 생산비용의 인상분을 제품가격에 반영해 기후정책의 충격을 일부 완화할 수 있는 여력을 보유한다.[39] 하지만 배출권가격 충격의 거시경제 전반에 대한 유의

38) 본 모형에서 소비자물가지수에 대한 실질GDP의 탄력성은 0.76으로, BOK20의 탄력성(0.53)과 유사하며, 양 모형 모두 소비자물가지수에 대한 생산자물가지수의 탄력성에 비해 높은 실질GDP의 탄력성에 대한 추정결과를 제시한다.

39) 에너지다소비업종에 해당되는 코크스 및 석유정제품, 화학 및 화학제품, 1차금속, 비금속광물 제조업은 시장 독점력을 바탕으로 가격설정력(price setting power)이 높은 것으로 알려져 있다(한민정 · 김영덕, 2011). 광업, 음식료품, 목재, 종이, 인쇄 및 복제업, 기계 및 장비 등 4개 업종에서 나타나는 양(+)의 파급효과는 업종별 실질 부가가치에 대한 생산자물가의 양(+)의 추정계수에서 기인한다. 이는 전방산업(downstream)에 속하는 해당 업종의 특성을 고려할 때, 후방산업(upstream)에 비해 높은 생산비 인상분의 소비자물가 전가율의 영향으로 해석할 수 있다. 다만 보다 강건한 분석을 위해 업종별로 구분된 생산자물가지수 데이터의 활용 및 업종별 생산자물가의 소비자물가 전가율에 대한 추정을 검토할 수 있으며, 이는 후속 연구의 과제로 남긴다.

미한 파급력으로 전산업평균 영향의 크기(−0.089%)에 비해 높은 에너지다소비업종의 생산 위축이 발견되었다. 이는 배출권거래제의 대상업체에 포함되지 않는 업종인 농림어업(−0.021%), 기타 제조업(−0.015%), 건설업(−0.006%), 서비스업(−0.058%) 등에서 모두 생산 감소가 나타나는 현상에 대한 이유와 동일하다.

〈표 4〉 생산 부문에 대한 파급효과

(단위: %)

구분	1년차	2년차	3년차	4년차	연평균 변화율
농림어업	−0.018	−0.023	−0.026	−0.016	−0.021
광업	0.022	0.051	0.084	0.105	0.066
음식료품	0.082	0.095	0.110	0.073	0.090
섬유 및 가죽제품	−0.048	−0.093	−0.132	−0.137	−0.102
목재, 종이, 인쇄 및 복제업	0.125	0.110	0.141	0.075	0.113
코크스 및 석유정제품	−0.134	−0.259	−0.367	−0.373	−0.283
화학물질 및 화학제품	−0.054	−0.106	−0.150	−0.151	−0.115
비금속광물	−0.143	−0.147	−0.177	−0.097	−0.141
1차금속	−0.081	−0.154	−0.215	−0.214	−0.166
금속가공제품	−0.120	−0.230	−0.323	−0.323	−0.249
컴퓨터, 전자 및 광학기기	−0.024	−0.053	−0.084	−0.098	−0.065
전기장비	−0.104	−0.149	−0.174	−0.119	−0.136
기계 및 장비	0.027	0.012	0.019	0.015	0.018
운송장비	−0.201	−0.405	−0.595	−0.638	−0.460
기타 제조업	−0.005	−0.013	−0.020	−0.023	−0.015
전기, 가스 및 수도사업	−0.025	−0.055	−0.087	−0.105	−0.068
건설업	−0.002	−0.006	−0.009	−0.009	−0.006
서비스업	−0.035	−0.061	−0.076	−0.060	−0.058
전산업평균	−0.041	−0.083	−0.116	−0.116	−0.089

배출권거래제의 거시경제 파급효과에 대한 박경원 · 권오상(2018)의 연구 결과에 따르면 배출권가격의 인상은 실질GDP와 대부분의 업종 생산량에서 음(−)의 성장률이 나타나는 등 본 연구와 유사한 분석결과가 확인된다. 다만, 소비자물가 인하에 따른 소비

증가 효과를 언급하는 점은 본 연구와의 유의미한 차이점에 해당한다. 이러한 차이점은 본 연구가 박경원 · 권오상(2018)과 달리 소비 규모가 거시경제 여건에 의해 결정되도록 하였기 때문에 나타나는 것으로 보인다.

2) 세수환원 파급효과

2022년 3월 시행된 「기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법」은 유상할당된 배출권 경매수입을 기후대응기금 재원으로 활용하는 방안을 명시한다. 배출권가격이 인상되고 배출권의 유상경매 비율이 상향될수록 정부의 재정수입은 증가한다. 다수 연구에서 탄소중립 이행과정의 경제적 피해비용을 최소화하는 세수환원(revenue recycling)의 역할을 강조하고 있다(Hepburn et al., 2006; Kim et al., 2023).

「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 시행령」 제18조(배출권의 무상할당비율 등)에 따르면, 무상할당을 원칙으로 하는 배출권거래제 1차 계획기간을 지나 2차 계획기간부터 3% 유상할당을 시작으로 3차 계획기간에는 유상할당 비율을 10% 수준까지 확대해야 한다. 2019년 1월 23일 55만 톤의 배출권에 대한 최초 낙찰을 시작으로 총 유상경매 수입은 2019년 2,324억 원, 2020년 2,483억 원, 2021년 2,948억 원, 2022년 2,988억 원으로 확인된다.[40] 본 고는 10% 수준의 유상할당 비율의 유지와 배출권가격 및 낙찰가격 상승률의 일대일 대응관계를 가정한다.[41]

법인세 감면 및 경상이전지출 증대를 통한 세수환원을 반영한 시나리오 분석결과는 다음 <표 5>와 같다. 법인세 감면은 세수환원으로 인한 가처분소득 증가 효과와 생산자물가 인상에 의한 소득 감소효과가 혼재되어 긍정 및 부정적 성장효과가 연차별로 번갈아 등장했다. 반면, 경상이전지출 증대는 상대적으로 높은 소매가격 전가에 대한 규제강도의 영향으로 양(+)의 성장효과가 나타났다. 다만 본 고는 모형 내 소득계층에 따른 배출권가격 인상의 이질적 영향을 반영하지 않고 있다. 탄소가격의 역진성을 고려할 때 본 모형의 경상이전지출 확대의 효과는 하계(lower bound)로 해석할 수 있다.

40) https://ets.krx.co.kr/board/ETS01030000/bbs(최종 접속일: 2023.10.17)

41) 2019년 1월부터 2023년 10월에 걸친 낙찰가격과 해당 월의 배출권가격의 상관계수가 0.9에 달하는 것으로 나타난다. 유상경매 수입에 대한 보다 강건한 추정은 후속 연구로 진행하는 방안을 고려할 수 있다.

〈표 5〉 세수환원의 최종수요 부문에 대한 파급효과

(단위: %)

구분		1년차	2년차	3년차	4년차	연평균 변화율
민간소비	법인세 감면	0.0000	0.0000	−0.0002	−0.0003	−0.0001
	경상이전지출 확대	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0002
민간투자	법인세 감면	0.0008	0.0003	−0.0058	−0.0038	−0.0021
	경상이전지출 확대	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
GDP	법인세 감면	0.0002	0.0001	−0.0012	−0.0006	−0.0004
	경상이전지출 확대	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000

3) 에너지 및 환경 파급효과[42)]

배출권가격 인상에 따른 거시경제 파급효과와 에너지소비의 축차적(recursive) 관계를 고려할 때, 경제 부문의 음(−)의 충격은 에너지소비 감소를 유발할 것으로 예상할 수 있다. 배출권가격 인상의 에너지소비 감소 효과는 전환 부문에서 가장 높게(−0.068%) 나타나며, 이는 전환 부문의 석탄 및 가스 에너지원 소비 감소에 기인한다. 반면, 화석연료 소비량의 감소(−0.035%)와 더불어 1차에너지 중 신재생에너지 비율의 상승(0.017%)은 전환 부문의 에너지원 대체를 가속화할 것으로 보인다.

산업, 건물, 수송 부문의 기후정책에서 전력화가 큰 비중을 차지하는 등 정부의 기후정책 흐름을 고려할 때, 전력 및 열 에너지원 소비량의 상방 이동을 예상할 수 있다. 하지만 배출권가격의 인상은 전력(−0.052%) 및 열 에너지원(−0.011%) 소비량을 감소시키는 것으로 나타난다. 이는 배출권가격 인상의 부정적 성장효과에 따른 1차 및 최종에너지원 소비 전반의 하향 추세의 영향으로 해석된다.[43)]

2050년 부문별 전환 속도를 제시하는 정부의 「2050년 탄소중립 시나리오」에 따르면, 2018년 기준 2050년까지의 화석연료 소비량 감소 속도는 석탄(10%), 석유(4%), 도시가스(4%)에 달한다.[44)] 본 고의 추정결과에 따르면, 에너지원별 감축속도는 석탄(0.064%),

42) 연도별 시나리오 분석결과는 [부록 3]과 [부록 4]의 부록 표 2와 부록 표 3에 정리되어 있다. 본문에서는 연평균 변화율을 기준으로 서술한다.

43) 각 부문의 전력화를 모형 설계에 반영할 경우 본 연구의 시나리오 분석결과와 상이한 결과가 도출될 수 있다. 이는 본 고의 향후 과제로 남긴다.

44) 시나리오 A에 따르면, 석탄 에너지원 소비량은 32.5(2018년)→0 백만 TOE(2050년), 석유 116.3→26.7백만 TOE, 도시가스 28.6→6.9백만 TOE의 목표가 설정되어 있다. 이때 석탄 에너지원은 연평균 성장률(CAGR) 계산이 불가하여, 0에 가까운 임의의 수치(1백만 TOE)를 적용해 계산한다.

석유(0.011%), 천연 및 도시가스(0.041%)로 확인된다. 2050년 온실가스 감축목표 달성을 위해 배출권가격 전가 채널의 다변화 등 추가적인 노력이 요구되는 것을 정량적으로 확인할 수 있다. 아울러 본 고의 추정결과에 따르면 가정(1.22%), 상업 및 공공 부문(1.19%)의 신재생에너지 소비에 대한 소득탄력성이 수송 부문의 신재생에너지 소비의 탄력성(0.0002%)에 비해 높은 것으로 나타난다. 배출권가격 인상의 소득에 대한 음(−)의 충격에 따른 신재생에너지 소비 감소(−0.023%)의 대안이 요구된다.

환경 부문에서 배출권가격 전가에 따른 온실가스 감축효과는 총배출량을 기준으로 −0.043%에 이른다. 이는 2023년 4월 발표된 부문별 · 연도별 온실가스 감축목표의 속도(−5.19%)와 비교할 때, 배출권가격 인상의 온실가스 감축에 대한 영향력이 유의미하지 않은 것으로 평가할 수 있다. 에너지 분야(연료연소+탈루) 온실가스 배출량은 0.045% 감소하며, 산업공정 분야 배출량은 0.011% 감소하는 것으로 나타난다. 이는 연료 전환에 비해 상대적으로 높은 공정 및 원료 전환의 장벽을 유추할 수 있다. 에너지 부문과 마찬가지로 전환 부문에서 가장 높은 온실가스 감축효과(−0.070%)가 나타나며, 다배출업종(철강, 석유화학, 시멘트, 정유)에서 모두 배출량이 감소하는 것으로 확인된다.

Ⅵ. 결론 및 향후 과제

2023년 4월 발표된 「탄소중립 · 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획」에 따르면, 배출권거래제는 전환 및 산업 부문을 아우르는 대표적인 기후정책으로 총배출량의 87%(2021년 기준)에 대한 감축 유인체계를 형성한다. 배출권거래제의 넓은 포괄범위를 고려할 때, 배출권가격 충격의 온실가스 감축경로에 대한 영향관계의 지속적인 관찰이 요구된다. 아울러 산업 부문의 배출원이 특정 업종(철강, 석유화학, 시멘트, 정유)에 집중되는 과점적 특징을 고려할 때, 배출권거래제의 제도적 특수성을 고려한 E3 동학 연구는 학술적 가치를 지닌다.

본 고는 총량변수의 관점에서 경제, 에너지와 환경의 상호연관성을 동태적으로 분석하고자 거시계량 기반 연립방정식 모형을 구축한다. 이 모형은 정부의 기후정책 설계에 앞서 이행경로의 변화를 정량적으로 제시하는 데 적절한 방법론으로 고려된다.[45] 본 고는 거시계량모형을 통해 배출권거래제의 정책효과를 분석한 국내 최초의 연구로, 한국

표준산업분류(경제), 에너지밸런스(에너지), 국가온실가스인벤토리(환경)를 연결해 현실 설명력을 제고한 데 의의를 지닌다. 특히, 그 영향이 에너지 및 환경 영역에 한정된 것으로 인식되어 온 기후정책의 경제시스템에 대한 영향을 분석하기 위해 통합평가모형(IAM, Integrated Assessment Model)의 필요성이 증가하고 있다. 본 연구는 이와 같은 학술적 흐름에 기여한다고 할 수 있다.

배출권가격의 전가 채널은 연료의 열량단가, 소매 전기요금, 수출물가, 배출권 구매로 구분되며, 본 고는 배출비용이 생산자물가에 반영되는 직접 경로를 중심으로 논의한다. E3 동학에 대한 분석결과에 따르면, 배출권가격의 4년에 걸친 매년 50% 인상 충격은 생산자물가 인상(0.415%)과 함께 주요 거시변수인 실질GDP(−0.058%), 민간소비(−0.003%) 및 투자(−0.301%) 등의 하방 이동으로 귀결된다. 또한, 해당 충격은 18개 업종 중 에너지다소비업종을 포함한 13개 업종(약 72%)의 부가가치를 감소시킨다. 거시경제 전반의 음(−)의 충격은 에너지소비와 온실가스 배출량 감소(−0.043%)로 이어지나, 감축목표에서 밝히고 있는 감축속도(−5.19%)와 비교할 때 정책의 효과성이 유의미하지 않은 것으로 나타난다. 이는 배출권가격 전가 채널의 다변화를 위한 제도 설계의 필요성을 시사한다.

배출권가격의 인상은 온실가스 감축목표 달성의 필수불가결한 요소로, 가격 인상 충격에 따른 이행리스크에 대응함으로써 거시경제의 지속가능성을 담보하기 위해 배출권 경매수익을 활용한 세수환원 방안을 검토할 수 있다. 본 고는 법인세 경감 및 경상이전지출 확대 등의 세수환원 수단을 적용한 시나리오 분석결과를 도출했으며, 성장 측면에서 후자의 정책 비교우위를 확인했다. 다만, 모형 설계 및 데이터의 한계로 세수환원과 더불어 기후변화 이행 과정에서 예상되는 양(+)의 편익을 반영하지 못했다. 저탄소기술의 혁신 및 친환경 투자 확대에 따른 실물경제의 긍정적인 영향이 모형 설계에 포함된다면 배출권가격의 전가로 인한 부정적인 성장효과 상쇄에 요구되는 세수환원의 크기가 감소할 것으로 예상된다.

본 모형은 설계와 분석의 관점에서 다음과 같은 보완 및 후속 연구가 요구된다. 첫째,

45) 본 모형의 외생변수에 대한 전제치 구축을 통해 본래의 목적인 정책효과 분석과 함께 단기 전망에 활용할 수 있다. 또한 안지운(2011)은 거시계량모형의 효용성으로 회귀식 및 항등식들을 통해 변수 간의 구조가 명확하게 관측되고 구조식들이 모듈화되어 있어 구조의 이해 및 확장이 용이하다는 점을 제시한다.

배출권가격 충격의 분배 영향을 고려하기 위해 노동 및 자산시장의 모형 편입이 요구된다. 둘째, 경제 모듈의 에너지 및 환경 모듈에 대한 축차적(recursive) 관계의 상호적(interactive) 관계로의 확장이 요구된다. 예를 들어, 온실가스 배출량 증가에 따른 효익 감소가 소비 및 투자 행위에 영향을 미치는 관계를 고려할 수 있다. 셋째, 금융 및 자산시장을 모형에 포함해 배출권가격 충격이 금융시장의 전반적인 안전성에 어떠한 영향을 주는지, 나아가 통화정책과 같은 외생적 충격과 어떻게 상호작용을 할 것인 지에 대한 이해를 넓혀야한다. 마지막으로, 정책적 의지에 의해 전력화가 이루어지는 산업, 건물, 수송 부문에서의 전력 에너지원 수요에 대한 별도 모듈화가 요구된다. 즉, 모형의 특성상 과거 인과관계 및 구조가 유지되는 시계열 분석의 속성을 지니고 있어 급격히 변하는 기술 및 정책 요소에 대한 대안이 요구된다.[46)]

거시계량 기반 연립방정식 모형의 핵심 가정은 과거 데이터에서 관찰되는 움직임이 향후에도 유사하게 나타날 것으로 상정하는 것이다. 이는 경제주체의 미래에 대한 합리적 기대를 반영하지 못한다는 한계(Lucas critique)에 직면한다(박경훈 외, 2020).[47)] 다만, 상기에서 케인지안 이론 기반의 거시계량모형과 최적화 기반의 모형은 경제주체의 행동 및 시장 청산 등에 대한 상이한 관점을 보유해 상호 보완적 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Klein, 1988; Hall, 1995). 이의 일환으로 한국을 포함한 주요국 중앙은행은 분석의 목적성과 모형의 기능성을 고려해 다모형접근방식(multi-model approach)을 따른다(황상필 외, 2005). 따라서 근래 경제주체의 행동을 반영하기 위한 데이터 최신성 확보를 통해 구조적으로 보완[48)]하는 동시에, 모형의 정치성에 대한 지속적인 개선이 필요하다.

46) Cambridge Econometrics는 저탄소경제로 이행하는 과정의 신기술 도입 효과를 분석하기 위해 전력(power), 도로 수송(road transport), 가정 열(household heat), 철강(steel) 분야에 별도 개발한 FTT(Future Technology Transformations) 모듈을 활용한다(출처: https://www.e3me.com/what/ftt/,최종 접속일: 2023.11.15.).

47) 루카스는 전통적 거시계량모형의 파라미터들은 정부 정책변화로 인해 유발되는 경제주체들의 기대 및 행태변화를 반영하지 못하므로 모형을 통해 나타난 정책실험의 결과가 유효하지 않다는 루카스 비판(Lucas critique)를 제기하였다(차경수 · 오세신, 2014).

48) 모형에서 사용된 요소들끼리의 새로운 영향력 관계가 관측되거나 새로운 변수가 출현한 경우 이를 모형화하는 작업을 의미한다. 이러한 구조적 보완이 상대적으로 용이한 경우 모형의 확장성이 우수하다고 할 수 있는데, 거시계량모형은 이러한 측면에서 유리하다(안지운, 2011).

[References]

고유경 “국내석유제품가격의 국제유가 대칭성 분석-Opinet (오피넷) 개통을 중심으로”, 「자원 · 환경경제연구」, 제22권 제4호, 2013, pp. 581~612.

김재윤 · 전은경, “기후변화 이행리스크와 금융안정”, 한국은행조사통계월보, 제75권 제12호, 2021.

김재혁, “경제-에너지-환경(3E)의 상호작용에 관한 경제동학적 접근”, 학위논문, 2016.

김재혁, “신기후체제와 저탄소경제를 위한 한국형 거시계량-3E 모형의 구축과 활용: 국제유가의 파급효과 분석”, 「국제통상연구」, 제26권 제2호, 2021, pp. 1~31.

김종우 · 박상규, “건물에너지 효율개선 정책패키지지화를 위한 효율통계 구축방안 연구”, 에너지경제연구원기본연구보고서, 21-06, 2021.

문명배 · 서승범 · 이창섭, “유연탄 가격결정 요인에 관한 실증분석 연구”, 「연세경영연구」, 제59권 제2호, 2022, pp. 55~71.

박경원 · 권오상, “불완전경쟁CGE 모형을 이용한 배출권거래제의 경제효과 분석”, 「환경정책」, 제26권 제3호, 2018, pp. 233~265.

박경훈 · 임현준 · 노경서, “한국은행 거시계량모형(BOK20) 구축 결과”, 한국은행, 조사통계월보(857), 2020, pp. 16~42.

박년배 · 심성희, “감축목표 업종 분류체계에 따른 산업부문의 에너지소비 및 온실가스 배출 요인분해 분석”, 「자원 · 환경경제연구」, 제24권 제1호, 2015, pp. 189~224.

박철웅 · 박철호, “국제유가와 천연가스가격 간의 관계 분석 및 한국의LNG 가격 추정”, 「산업경제연구」, 제35권 제1호, 2022, pp. 119~139.

박혜진, “기후리스크와 자산가격의 관계에 대한 조사 및 분석”, [KCMI] 조사보고서, 23-01, 2023.

부경진, “에너지 · 환경 · 경제 통합 계량경제시뮬레이션 모형에 의한 온실가스저감수단의 평가”, 에너지경제연구원, 기본연구보고서(기본2002-11), 2002.

부경진 · 최도영 · 노동운, “분기별 계량경제 시뮬레이션 모형 개발을 통한 에너지 · 환경 · 경제지표의 전망 및 관련 정책의 평가”, 에너지경제연구원 연구보고서, 2003, pp. 1~125.

손민규 · 김대용 · 황상필, “한국은행 분기거시계량모형(BOK12) 재정모형 구축 결과”, 한국은행 조사통계월보(2013.6월), 2013.

손인성 · 김동구, “EU 배출권거래제 개정과 탄소국경조정제 도입의 정책적 함의”, 「에너지경

제연구」, 제22권 제1호, 2023, pp. 101~133.
신석하, “거시계량모형을 이용한 외생적 요인의 경제파급효과 분석”, 한국개발연구원 정책연구시리즈, 2005-14, 2005.
신희철 · 허성윤, “국내 재생에너지 수요 결정요인 분석: 문헌 고찰 및 성장모형 적용을 중심으로”, 「에너지공학」, 제32권 제3호, 2023, pp. 99~116.
안지운, “기술경제 분석을 통한 미래 에너지 시스템 구축 전망: 기술 · 경제 통합 에너지 전망 모형 구축”, 에너지경제연구원 기본연구보고서, 2011, pp. 11~33.
양준모 · 김영덕 · 유정식 · 이동우, “에너지-거시경제모형을 이용한 유가상승 파급효과 추정”, 「에너지경제연구」, 제7권 제1호, 2008, pp. 1~41.
에너지경제연구원, 2022 에너지통계연보, 2022.
온실가스종합정보센터, 2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 2022a.
온실가스종합정보센터, 2021 온실가스 감축 이행실적 평가, 2022b.
이상엽 · 임형우 · 신동원 · 류소현, “국내 배출권거래제 쟁점과 과제”, 한국환경연구원 정책보고서, 2022-11, 2022.
정수관 · 원두환, “원유가격과 전력가격의 연계성”, 「에너지경제연구」, 제19권 제1호, 2020, pp. 153~176.
조경엽 · 김창배 · 장경호, “KERI 2010 한국경제 거시계량모형”, 한국경제연구원연구, 11-08, 2011.
조하현 · 이제훈 · 임형우, “구조변화를 반영한 한국형 전력-E3 모형 구축 연구”, 「경제연구」, 제37권 제3호, 2019, pp. 117~150.
차경수 · 오세신, “거시계량모형을 이용한 유가변동 및 유류세 변화의 파급효과 분석”, 「에너지경제연구」, 제13권 1호, pp. 83~119.
최봉석 · 이유수 · 정용훈, “거시계량모형을 이용한 전력요금 파급효과 분석”, 「에너지경제연구」, 제13권 제1호, 2014, pp. 23~56.
한국은행, 지역경제보고서, 2023.
한민정 · 김영덕, “온실가스 저감정책에 대한 에너지 다소비 제조업의 경쟁력 분석: 가격설정력 모형을 이용하여”, 「자원 · 환경경제연구」, 제20권 제3호, 2011, pp. 489~529.
환경부, 온실가스 배출권거래제 제1차 계획기간(2015년~2017년) 국가 배출권 할당계획, 2014.
황상필 · 문소상 · 윤석현 · 최영일, “한국은행 분기 거시계량경제모형의 재구축”, 한국은행 통

계조사월보, 한국은행, 제59권, 2005, pp. 23~91.

Blanchard, O. J., “The wage price spiral,” *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 101, No. 3, 1986, pp. 543~565.

Cludius, J., S. de Bruyn, K. Schumacher, and R. Vergeer, “Ex-post investigation of cost pass-through in the EU ETS-an analysis for six industry sectors,” *Energy Economics*, Vol. 91, 2020, 104883.

Econometrics, C., *Decarbonising European transport and heating fuels-Is the EU ETS the right tool?* European Climate Foundation, 2020.

Fabra, N., and M. Reguant, “Pass-through of emissions costs in electricity markets,” *American Economic Review*, Vol. 104, No. 9, 2014, pp. 2872~2899.

Guivarch, C., E. Kriegler, J. Portugal-Pereira, V. Bosetti, J. Edmonds, M. Fischedick, P. Havlík, P. Jaramillo, V. Krey, F. Lecocq, A. Lucena, M. Meinshausen, S. Mirasgedis, B. O’Neill, G.P. Peters, J. Rogelj, S. Rose, Y. Saheb, G. Strbac, A. Hammer Strømman, D. P. van Vuuren, and N. Zhou, *Annex III: Scenarios and Modelling Methods*, IPCC, 2022.

Hall, S., “Macroeconomics and a bit more reality,” *The Economic Journal*, Vol. 105, No. 431, 1995, pp. 974~988.

Hanley, N., “Macroeconomic measures of ‘sustainability’,” *Journal of Economic Surveys*, Vol. 14, No. 1, 2000, pp. 1~30.

Hepburn, C., M. Grubb, K. Neuhoff, F. Matthes, and M. Tse, “Auctioning of EU ETS phase II allowances: how and why?” *Climate Policy*, Vol. 6, No. 1, 2006, pp. 137~160.

Herrera, A. M., L. G. Lagalo, and T. Wada, “Oil price shocks and industrial production: Is the relationship linear?” *Macroeconomic Dynamics*, Vol. 15, No. S3, 2011, pp. 472~497.

Jouvet, P. A., and B. Solier, “An overview of CO_2 cost pass-through to electricity prices in Europe, *Energy Policy*, Vol. 61, 2013, pp. 1370~1376.

Kandil, M., “The wage–price spiral: International evidence and implications,” *Journal of Economics and Business*, Vol. 59, No. 3, 2007, pp. 212~240.

Känzig, D. R., “The macroeconomic effects of oil supply news: Evidence from OPEC announcements,” *American Economic Review*, Vol. 111, No. 4, 2021, pp. 1092~1125.

Känzig, D. R., *The unequal economic consequences of carbon pricing (No. w31221)*, National

Bureau of Economic Research, 2023.

Kilian, L., “The economic effects of energy price shocks,” *Journal of Economic Literature*, Vol. 46, No. 4, 2008, pp. 871~909.

Kim, Y. G., J. Moon, and J. Kim, “Evaluating the economic impacts of Korea’s NDC (nationally determined contributions) implementation via carbon pricing: A global multiregional computable general equilibrium analysis,” *Journal of Climate Change Research*, Vol. 14, No. 3, 2023, pp. 253~275.

Kiss-Dobronyi, B., and D. Fazekas, *Modelling the decarbonisation of energy intensive industries in the EU*, ETUI aisbl, Brussels, 2022.

Klein, L. R., “Carrying forward the Tinbergen initiative in macroeconometrics,” *De Economist*, Vol. 136, No. 1, 1988, pp. 3~21.

Moessner, R., *Effects of carbon pricing on inflation*, 2022.

Munnings, C., W. Acworth, O. Sartor, Y. G. Kim, and K. Neuhoff, “Pricing carbon consumption: synthesizing an emerging trend,” *Climate Policy*, Vol. 19, No. 1, 2019, pp. 92~107.

Neuhoff, K., and R. Ritz, *Carbon cost pass-through in industrial sectors*, 2019.

Nishigaki, H., “The impact of rising EU Allowance prices on core inflation in the Eurozone,” *Economic Affairs*, Vol. 43, No. 2, 2023, pp. 245~264.

Perman, R., *Natural resource and environmental economics*, Pearson Education, 2003.

Pollitt, H., K. Neuhoff, and X. Lin, “The impact of implementing a consumption charge on carbon-intensive materials in Europe,” *Climate Policy*, Vol. 20(sup1), 2020, S74-S89.

Sijm, J., Y. Chen, and B. F. Hobbs, “The impact of power market structure on CO_2 cost pass-through to electricity prices under quantity competition–A theoretical approach,” *Energy Economics*, Vol. 34, No. 4, 2012, pp. 1143~1152.

[부록 1] 주요 행태식 및 정의식 소개[49)]

LRPC = C(1) + C(2)*LRPC(−1) + C(3)*LRGNDI + C(4)*LRCBR + C(5)*LERUS + C(6)*LEPU + C(7)*LAPDR (Adjusted R-squared: 0.99, D.W.: 1.76)

LRPCI = C(1) + C(2)*LRCGNDI + C(3)*LHSPI + C(4)*LERUS + C(5)*LBPA (Adjusted R-squared: 0.91, D.W.: 1.28)

LRPEI = C(1) + C(2)*LRPEI(−1) + C(3)*LRCGNDI + C(4)*LERUS (Adjusted R-squared: 0.95, D.W.: 1.84)

LRPKPI = C(1) + C(2)*LRPKPI(−1) + C(3)*LRCGNDI + C(4)*L(RPCI+RPEI) (Adjusted R-squared: 0.99, D.W.: 1.74)

LREG = C(1) + C(2)*LWIQ + C(3)*L(ERUS/ERBUY) + C(4)*LEPI + C(5)*@TREND (Adjusted R-squared: 0.99, D.W.: 2.27)

LRIMG = C(1) + C(2)*LRDD + C(3)*LRFD + C(4)*L(ERUS/ERBUY) (Adjusted R-squared: 0.99, D.W.: 2.27)

LRES = C(1) + C(2)*LRES(−1) + C(3)*LWIQ + C(4)*L(ERUS/ERBUY) (Adjusted R-squared: 0.98, D.W.: 1.92)

LRIMS = C(1) + C(2)*LRIMS(−1) + C(3)*LRDD + C(4)*LRFD + C(5)*LERUS + C(6)*LEPU (Adjusted R-squared: 0.99, D.W.: 1.75)

RRES = C(1) + C(2)*(RPC+REG+RES) + C(3)*(REI+RIC) + C(4)*RIMG (Adjusted R-squared: 0.75, D.W.: 1.80)

LRGNI = C(1) + C(2)*LRGDP + C(3)*LNCTOT (Adjusted R-squared: 0.99, D.W.: 2.00)

49) 본 모형의 전체 행태식 및 정의식은 저자에게 요청 시 제공된다.

[부록 2] 주요 변수 소개[50)]

〈부록 표 1〉 변수명 및 변수설명 - 경제 모듈(변수명 순)

변수명	설명(외생변수 여부, ✓)	변수명	설명(외생변수 여부, ✓)
APDR	고령인구 부양비율(✓)	REI	설비투자
BPA	건축허가면적(✓)	RES	서비스수출
CID	관세	RFD	해외수요
CPI	소비자물가지수	RGC	정부소비(✓)
EAP	경제활동인구	RGDP	실질GDP
EPI	수출물가지수	RGEI	정부설비투자(✓)
EPU	불확실성지수(✓)	RGFCF	총정부고정자본형성(✓)
ERBUY	엔/달러환율(✓)	RGKPI	정부지식재산생산물투자(✓)
ERUS	원/달러환율(✓)	RGNI	실질GNI
FD	재정적자	RIMG	재화수입
GDF	GDP디플레이터	RIMS	서비스수입
GT	소비세	RPC	민간소비
HSPI	주택매매가격지수(✓)	RPCI	민간건설투자
IMPI	수입물가지수	RPEI	민간설비투자
NCTOT	순상품교역조건	RPFCF	총민간고정자본형성
NEP	취업자수	RPKPI	민간지식재산생산물투자
NGDP	명목GDP	RRES	재고증감 및 통계성 불일치
NU	실업자수	RTE	총수출
RGCI	정부건설투자(✓)	RTIM	총수입
PPI	생산자물가지수	RU	실업률
PPI_ETS	ETS 영향권 생산자물가지수	SSC	사회보장기여금
PPI_NETS	ETS 비영향권 생산자물가지수	TGFE	총재정지출(✓)
RCI	건설투자	TGFI	총재정수입
RCBR	실질금리(✓)	TIPCGC	법인세
R(C)GNDI	가계(기업)가처분소득	TIPCGI	개인소득세
RDD	국내수요	TP	재산세
REA	경제활동참가율	WAGE	명목임금
REG	재화수출	WIQ	세계수입물량(✓)

50) 본 모형의 전체 변수에 대한 정보는 저자에게 요청 시 제공된다.

[부록 3] 에너지 부문에 대한 파급효과

〈부록 표 2〉 에너지소비 부문에 대한 파급효과

(단위: %)

구분	1년차	2년차	3년차	4년차	연평균 변화율
산업(A)	−0.011	−0.022	−0.033	−0.035	−0.025
건물(B)	−0.020	−0.040	−0.055	−0.048	−0.041
수송(C)	−0.006	−0.015	−0.024	−0.026	−0.018
최종에너지(A+B+C)	−0.012	−0.024	−0.036	−0.036	−0.027
전환(D)	−0.024	−0.054	−0.087	−0.108	−0.068
1차에너지(A+B+C+D)	−0.016	−0.034	−0.052	−0.059	−0.040
1차에너지 중 신재생에너지 비율	0.007	0.014	0.022	0.026	0.017
석탄 및 석탄제품(a)	−0.025	−0.052	−0.083	−0.099	−0.064
석유 및 석유제품(b)	−0.005	−0.010	−0.014	−0.014	−0.011
천연가스 및 도시가스(c)	−0.012	−0.030	−0.052	−0.071	−0.041
화석연료(a+b+c)[1]	−0.013	−0.028	−0.045	−0.054	−0.035
신재생에너지 및 기타	−0.009	−0.020	−0.030	−0.033	−0.023
전력[2]	−0.022	−0.046	−0.068	−0.073	−0.052
열[2]	−0.003	−0.009	−0.015	−0.019	−0.011

주: 1) 1차에너지 소비량 기준
2) 최종에너지 소비량 기준

[부록 4] 환경 부문에 대한 파급효과

〈부록 표 3〉 환경 부문에 대한 파급효과

(단위: %)

구분	1년차	2년차	3년차	4년차	연평균 변화율
전환 부문	−0.024	−0.055	−0.090	−0.111	−0.070
철강 업종	−0.009	−0.027	−0.053	−0.078	−0.042
석유화학 업종	−0.015	−0.039	−0.067	−0.088	−0.052
시멘트 업종	−0.016	−0.018	−0.022	−0.013	−0.017
정유 업종	−0.000	−0.001	−0.001	−0.002	−0.001
산업 부문	−0.009	−0.022	−0.038	−0.051	−0.030
건물 부문	−0.009	−0.017	−0.023	−0.020	−0.018
수송 부문	−0.007	−0.015	−0.024	−0.027	−0.018
총배출량	−0.015	−0.033	−0.054	−0.068	−0.043
에너지 분야	−0.015	−0.035	−0.058	−0.073	−0.045
산업공정 분야	−0.005	−0.010	−0.014	−0.015	−0.011