자원·환경경제연구 제 30 권 제 2 호
Environmental and Resource Economics Review
Volume 30, Number 2, June 2021 : pp. 169~205
DOI: https://doi.org/10.15266/KEREA.2021.30.2.169

새로운 연산가능일반균형모형을 이용한 온실가스 감축정책의 영향 분석†

한민수* · 문진영**

요 약 : 본 연구는 온실가스 감축정책이 세계경제에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해서 생산에 따른 온실가스 배출, 온실가스 배출에 의한 비효용의 발생, 각국 정부의 온실가스 감축정책이라는 세 가지 요소를 포함하고 있는 다국가-다산업 정태적 연산가능일반균형모형을 개발하였다. 이렇게 개발된 모형의 파라미터 값을 추정하고 모형에 적용할 수 있는 가장 최근의 방법론(exact hat algebra)을 사용해서 모형의 해를 계산하였다. 모형의 예측에 따르면 국가별 개별적인(unilateral) 온실가스 감축정책의 강화는 해당 국가의 국내 생산과 탄소 배출을 감소시키지만, 생산이 다른 국가로 재배치되기 때문에 반드시 세계의 탄소 배출량을 감소시키지는 않는 것으로 나타났다. 반면 모든 주요국들이 동시에 OECD(2016)에서 제안된 강화된 감축정책을 추진할 경우에 전 세계의 온실가스 배출을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 우리 분석결과는 온실가스 감축정책이 효과를 발휘하기 위해서는 주요국들의 조율된(aligned) 감축노력이 필요하다는 점을 시사한다.

주제어 : 기후변화, 온실가스(GHG) 감축정책, 연산가능일반균형모형(CGE), Exact Hat Algebra

JEL 분류 : D51, D58, F12, Q54, Q56, Q58

접수일(2021년 3월 17일), 수정일(2021년 5월 27일), 게재확정일(2021년 5월 28일)

† 본 논문은 대외경제정책연구원이 발간한 연구보고서 17-31 「온실가스 감축을 위한 국제사회의 탄소 가격제 도입과 경제영향 분석」 중 저자들이 작성한 부분을 대폭적으로 수정 및 보완한 것입니다. 논문의 완성도를 높일 수 있도록 유익한 논평을 해주신 권율 박사, 오경수 박사, 오일영 과장, 정지원 박사, 두 분의 익명 심사위원에게 감사드립니다.

* 대외경제정책연구원 국제거시금융실 연구위원, 교신저자(e-mail: mshan@kiep.go.kr)

** 대외경제정책연구원 국제개발협력센터 연구위원, 공저자(e-mail: jymoon@kiep.go.kr)

New Computable General Equilibrium Analysis of the Effects of Greenhouse Gas Emissions Reduction Policies

Minsoo Han* and Jin-Young Moon**

ABSTRACT : This study quantitatively analyzes the impact of greenhouse gas (GHG) emissions reduction policies on the global economy. To this end, we develop a multi-national and multi-industry static computational general equilibrium model that includes three components—GHG emissions from production, disutility due to GHG emissions, and governments' GHG emissions reduction policies. Then we calibrate the model with the relevant data and solve for the equlibrium using the most recent methodology (exact hat algebra). We find that the strengthening of unilateral GHG emissions reduction policies for each country reduces carbon emissions from domestic producers, but does not necessarily reduce global carbon emissions as production is relocated to other countries. On the other hand, we can reduce GHG emissions when all major countries simultaneously implement the strengthened reduction policies proposed by the OECD (2016). Our results imply that aligned reduction efforts of major countries are necessary to reduce global GHG emissions.

Keywords : Climate Change, Greenhouse Gas (GHG) Emissions Reduction Policies, Computable General Equilibrium Model, Exact Hat Algebra

Received: March 17, 2021. Revised: May 27, 2021. Accepted: May 28, 2021.

* Research Fellow, International Macroeconomics & Finance Department, Corresponding author(e-mail: mshan@kiep.go.kr)

** Research Fellow, Center for International Development Cooperation, Coauthor(e-mail: jymoon@kiep.go.kr)

I. 서 론

2015년 UN 기후변화협약 당사국총회에서 파리기후협정이 채택된 이후 국제사회는 온실가스(Greenhouse Gas, GHG) 감축을 위한 다양한 정책수단을 도입해왔다. 각국의 이러한 정책 대응은 크게 두 가지 경로를 통해 세계경제에 영향을 줄 수 있다. 첫째, 온실가스 감축정책을 도입한 국가가 온실가스 배출을 줄이게 되면서, 다른 국가들 역시 감축에 따른 긍정적인 외부효과를 얻을 수 있다. 둘째, 온실가스 감축정책을 도입한 국가가 생산하는 상품의 상대가격이 상승하고 국제시장에서 가격경쟁력을 잃게 되면서 다른 국가로 생산의 재배치(production shifting)가 발생할 수 있다. 이때 이러한 생산의 재배치는 전 세계의 온실가스 배출을 증가시키는 방향으로 작용할 수도 있다. 본 연구는 이러한 효과들을 고려하여 주요국의 온실가스 감축정책의 영향을 정량적으로 분석하고자 한다.

이를 위해서 Ossa(2014, 2016)의 다국가-다산업을 가진 정태적 일반균형모형을 기초로 하되 생산에 의한 온실가스 배출, 온실가스 배출에 의한 비효용의 발생, 각국 정부의 온실가스 감축정책이라는 세 가지 요소를 모형 안에 추가하였다.[1] 이렇게 개발된 일반균형모형의 균형을 닫힌 해(closed form solution)로서 도출하는 것은 불가능하므로, Dekle, Eaton, and Kortum(2008), Arkolakis, Costinot, and Rodríguez-Clare(2012), Costinot and Rodríguez-Clare(2014), Ossa(2014, 2016) 등이 제안한 바와 같이 모형에서 균형을 보여주는 연립방정식을 수준(level)이 아닌 온실가스 감축정책의 변화에 따른 변화율을 구하기 위한 체계로 변형하는 방법(exact hat algebra)을 이용하여 정책 변화의 영향을 살펴보았다. 이를 위해서 우선 이렇게 개발된 모형의 파라미터를 Aguiar, Narayanan, and McDougall(2016), OECD(2016), Feenstra, Inklaar and Timmer(2015) 등의 가용한 데이터를 사용하여 추정하였다. 그리고 모형을 활용한 가상적인 시나리오 분석(counterfactual experiments)을 통해 온실가스 감축정책의 영향을 정량적으로 분석하였다.

1) 분석모형은 Ossa(2014, 2016)과 유사하나 Ossa는 분석모형의 경쟁적 균형이 아닌 다른 균형 조건을 적용하여 선의의 사회계획가(social planner)의 문제, 국가 간 상호작용도 고려하는 네쉬균형, 국가 간 담합을 고려하는 균형의 세 가지 균형식의 해를 수치계산을 통해서 계산하였다.

우리 연구에서 분석하는 두 가지의 가상적인 시나리오는 다음과 같다. 첫 번째 시나리오인 '개별 시나리오'에서는 우리 모형에서 고려하고 있는 국가인 중국, EU, 일본, 한국, 미국 등 중에서 한 국가만이 개별적으로(unilaterally) 탄소세 정책을 강화하는 경우를 분석했다. 특히 탄소세 정책을 강화한 국가의 온실가스 배출량과 생산에 미치는 영향뿐 아니라 세계 온실가스 배출량과 생산에 미치는 영향도 살펴보았다. 두 번째 시나리오인 '공동 시나리오'에서는 모든 주요국들이 탄소 감축을 위해서 공동으로(aligned) 탄소세 정책을 동시에 강화할 경우 세계경제에 미치는 영향을 분석하였다. 그리하여 '개별 시나리오'에서의 전 세계 탄소 배출의 변화와 '공동 시나리오'의 결과를 비교함으로써 2015년 파리기후협정 이후 국제사회가 공동으로 추진하고 있는 조율된 온실가스 감축 노력의 필요성에 대해서 살펴볼 것이다.

우리 연구의 가장 중요한 분석결과는 국가별 탄소세 정책의 강화는 해당 국가의 상품가격 상승에 따른 가격효과 때문에 그 국가의 탄소 배출량과 국내생산, 후생을 감소시키지만, 반드시 세계의 탄소 배출량과 생산량을 감소시키지는 않는다는 것이다. 이를테면 중국이 자국의 탄소세 정책을 강화할 경우 중국의 생산과 탄소 배출과 함께 세계의 산업생산과 탄소 배출도 감소되는 반면에 EU, 일본, 한국, 미국이 탄소세 정책을 강화할 경우 생산의 재배치 효과 때문에 세계의 탄소 배출량은 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 EU, 일본, 한국, 미국 등의 국가와 같이 배출규모가 상대적으로 작고 탄소 배출의 탄력성도 작은 국가가 개별적으로 온실가스 감축정책을 강화할 경우 이들 국가에서 중국 등 탄소 배출의 탄력성이 큰 국가로 생산이 재배치되면서 탄소 배출은 오히려 증가하게 되기 때문이다. 반면 중국 등 탄소 배출의 탄력성이 큰 국가의 감축정책의 강화는 이들 국가로부터 탄력성이 작은 국가로 산업생산을 재배치시키면서 탄소 배출을 감소시키는 것이다. 특히 중국 등은 전 세계 생산에서 차지하는 비중도 상당해서 이들의 산업생산 감소는 전 세계 산업생산과 탄소 배출의 감소로 연결되게 되었다.

반면에 모든 주요국들이 감축에 합의하면서 OECD(2016)에서 제시한 강화된 감축정책을 추진하는 경우 전 세계 탄소 배출을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 온실가스 감축정책이 효과를 발휘하기 위해서는 모든 주요국들의 공동으로 일치된 감축 노력이 필요하다는 점을 시사한다. 다만 이 경우에도 국가별 효과는 차이가 있었는데 중국, EU, 일본, 한국은 탄소 배출이 증가하고 있는 반면에 미국 등은 국내의 생산

과 탄소 배출이 감소하면서 전 세계 생산과 탄소 배출 감소를 주도하고 있는 것으로 나타나고 있다.

또한 우리의 연구결과에 따르면 탄소 배출 감소를 위한 기업의 내생적인 기술 진보 노력이 없는 경우 탄소세 등 가격효과를 통한 탄소 저감 정책이 효과를 거두기 위해서는 상당히 높은 가격을 부과해야 하는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과는 온실가스 감축을 위한 기술혁신 없이는 가격효과만을 타깃으로 한 정부 정책은 한계가 있을 수 있으며 탄소 배출 감소를 위해서는 기업의 내생적인 기술 진보(green innovation)가 중요하다는 점을 시사한다. 따라서 우리의 분석결과는 정부가 온실가스 배출에 따른 외부효과를 내제화시키는 정책뿐 아니라 기업으로 하여금 온실가스를 줄일 수 있는 기술투자를 통해 새로운 산업으로의 진출을 유도하기 위한 정책 마련도 중요하다는 것을 의미한다.

이미 기존의 많은 연구가 연산가능일반균형모형(CGE)을 활용하여 온실가스 감축정책의 영향을 분석하였다. 서정민 외(2010)는 에너지 부분이 고려된 Hertel et al.(2012)의 GTAP-E 모형을 활용하여 배출권거래제의 다양한 시나리오를 분석하였으며, 전병목 외(2011)는 일반균형모형을 활용하여 탄소세 도입에 따른 국내 경제성장과 세대별 후생수준에 미치는 영향을 분석하였다. 김용건 외(2014)는 OECD에서 개발한 축차동태 연산가능일반균형모형인 ENV-Linkage 모형을 보완한 KEI-Lingkage 모형을 활용했으며, 오경수·김창훈(2014)와 오경수(2015)는 우리나라 및 주요 무역 상대국의 배출권거래제 도입 여부가 국가의 경제 효율성과 산업 부문의 생산 및 무역에 미칠 영향을 업종별로 분석하기 위해서 Babiker and Rutherford(2005)의 모형을 활용하여 분석하였다. 마지막으로 문진영 외(2020)도 GTAP-E모형을 활용하여 EU에서 최근 강화되고 있는 온실가스 감축정책의 영향을 분석하였다.

본 연구가 이러한 기존의 연구와 차별화된 점은 기존의 연구들이 13,000개 이상의 파라미터 값이 주어진 GTAP-E 모형 등과 같이 좀 더 전통적인 연산가능일반균형모형을 활용한 반면에 본 연구에서는 Adao et al.(2017)에서 논의한 바와 같이 모형의 파라미터 수를 줄이고 함수의 형태에도 제한을 두는 Eaton and Kortum(2002) 이후 보다 최근의 연산가능일반균형모형을 사용했다는 점이다. 이때 탄소 가격제 도입이 세계경제에 미치는 영향을 모형을 통해서 제대로 추정하기 위해서는 모형의 파라미터의 추정치가 현실 경제를 잘 반영하고 있어야 한다. 본 연구에서는 시나리오 분석을 위해 추정해야 하는

파라미터의 수를 줄이기 위해서 Dekle, Eaton, and Kortum(2008), Arkolakis, Costinot, and Rodríguez-Clare(2012), Costinot and Rodríguez-Clare(2014), Ossa(2014, 2016) 등과 마찬가지로 모형을 구성하는 연립방정식을 변화율 형식으로 좀 더 간결하게 변형시키는 동시에 주요국들의 생산, 무역, 관세, 탄소 배출량은 물론 탄소세, 배출권 가격, 탄소세의 적용 범위, 배출권거래제의 적용 범위를 반영할 수 있도록 모형의 파라미터를 추정하였다.

또한 기존의 몇몇 연구들이 좀 더 미시적인 관점에서 유럽 그린딜 등 특정한 사건의 효과를 살펴본 반면에 본 연구는 거시적인 정책방향을 제안하고 있다. 이를테면 본 연구는 모형을 활용한 정량적 분석을 통해서 한국만이 온실가스 감축정책을 강화할 경우 오히려 전 세계 탄소 배출은 증가할 것이며 전 세계의 탄소 감축을 위해서는 주요국들과의 조율된 감축 노력의 중요성을 강조하고 있는데, 기존 연구의 정량분석에서는 이러한 정책적 시사점이 뚜렷하게 드러나고 있지 않다.

이런 관점에서 우리 분석결과는 Nordhaus(2015)와 관련이 있다. Nordhaus(2015)는 교토 의정서(Kyoto Protocol)가 제대로 작동하고 있지 않음을 지적하면서, 국가 간 조율된 온실가스 감축 노력으로서 기후클럽(Climate Club)을 제안한 바 있다. 보다 최근 연구인 Kortum and Weisbach(2020) 역시 한 지역에서의 개별적인 감축정책은 생산의 재배치에 따른 비효율을 유발할 수 있다고 주장하고 있다. 이러한 주장을 뒷받침하기 위해서 이들 연구는 모두 상대적으로 단순한 모형을 통한 이론적인 접근법을 사용하고 있다. 반면에 우리 연구는 좀 더 현실에 근접한 다국가-다산업 모형을 통한 경험적인 접근법(empirical approach)을 사용하였다. 따라서 국가 간 조율된 탄소 감축 노력이 필요하다는 정량적 결과를 제시한다는 점에서 우리 연구결과는 기후클럽 등 조율된 감축 노력을 뒷받침하는 또 다른 근거로서 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. II장에서는 모형과 균형조건을 제시하고 III장에서는 정량적 분석을 위해서 모형을 정책 변화에 따른 변화율을 구하기 위한 형태로 변화시킨 후 데이터와 파라미터 추정 방법에 대해서 설명할 것이다. IV장에서는 분석결과를 제시하는 한편 V장에서는 우리 연구의 한계와 정책적 시사점을 논의할 것이다. 그리고 마지막으로 VI장에서는 우리 연구의 결론을 제시할 것이다.

II. 모형과 균형조건

본 장에서는 우리 연구에서 활용하는 모형을 설명하고 균형조건을 제시하고자 한다. 모형경제는 N개의 국가와 S개의 산업으로 이루어져있으며, 국가는 i, j, m, n으로 표시하고 산업은 s로 표시하기로 한다. 국가 i의 산업 s에서는 다른 산업과는 차별화된 상품(differentiated variety) ω_{is}을 생산된다. 상품 ω_{is}는 0과 M_{is} 사이의 연속적인 공간에 분포하며 이들의 총량(mass)은 M_{is}이다($\omega_{is} \in [0, M_{is}]$). 이때 국가 j의 가계는 산업 내 상품 ω_{is}의 소비에 대해서는 CES(constant elasticity of substitution) 함수를 통해서 그리고 산업 간에서는 Cobb-Douglas 함수를 통해서 효용을 얻는 반면에 탄소 배출에 대해서는 이차식 함수 형태로 비효용(quadratic damage)을 얻는다. 그리하여 가계는 다음 식 (1)과 같은 중첩된 효용함수(nested Cobb-Douglas-CES utility function)를 갖는다.

$$C_j = \left(\Pi_{s=1}^{S} \left(\sum_{i=1}^{N} \int_0^{M_{is}} c_{ijs}(\omega_{is})^{\frac{\sigma_s - 1}{\sigma_s}} d\omega_{is} \right)^{\frac{\sigma_s}{\sigma_{s-1}} \mu_{js}} \right) \times \left(\frac{1}{1 + \left(\xi_j \sum_{i=1}^{N} EM_i \right)^2} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 $c_{ijs}(\omega_{is})$은 상품 ω_{is}의 국가 j에서의 소비를, $\sigma_s > 1$는 산업 s에서 ω_{is} 간 대체탄력성을 의미한다. 우리 연구에서는 각각의 국가가 생산하는 상품 간 차별화되어 있는 것으로 가정하는 일반적인 Armington 모형을 좀 더 세분화시켜서 한 국가의 산업 내에서 차별화된 상품이 존재하는 것으로 가정하였다.[2] 이때 μ_{js}는 국가 j의 산업 s에 대한 Cobb-Douglas 효용함수의 파라미터를, ξ_j는 국가 j의 탄소 배출의 사회적 비용과 관련된 파라미터를, EM_i는 국가 i에 의한 탄소 배출량을 의미한다.

한편 탄소 배출량에 의해 발생하는 비효용(damage function)은 Shapiro(2016)와 같은 형태를 가정하였다. 그리하여 식 (1)은 국가 j의 가계는 상품 ω_{is}에 대한 소비의 증가로부터는 양(+)의 효용을 얻는 반면 전 세계 탄소 배출량의 합계인 $\sum_{i=1}^{N} EM_i$의 증가로부터는

2) 일반적인 Armington 모형에서는 각 국가는 서로 차별화된 상품을 생산하며 각 국가의 소비자는 Cobb-Douglas 혹은 CES 형태의 효용함수를 가지고 있어서 상품 간 대체 가능하나 모든 국가의 상품을 소비하기를 원하는 것으로 가정하고 있다.

비효용을 얻는 두 가지 경로를 통해서 가계의 효용이 영향을 받는다는 것을 보여준다. 특히 두 번째 경로를 통해서 자국의 탄소 배출뿐 아니라 타국의 탄소 배출에 의해서도 영향을 받기 때문에 탄소 배출에 따른 외부효과가 발생하고 있다. 마지막으로 국가 j의 가계는 L_j만큼의 노동력을 공급하며 노동소득, 기업의 이윤, 정부수입은 결국 모두 국가 j의 가계에게 귀속되는 것으로 가정하였다.

상품 ω_{is}은 다음 식 (2)와 같은 규모수확불변(constant return to scale) 생산기술을 가지고 있는 독점적 경쟁(monopolistic competition) 기업에 의해서 생산된다.

$$y_{is}(\omega_{is}) = \phi_{is} l_{is}(\omega_{is}) \tag{2}$$

식 (2)에서 $l_{is}(\omega_{is})$, $y_{is}(\omega_{is})$은 각각 ω_{is}를 생산하는 기업의 노동고용량과 생산량이며, φ_{is}는 국가 i의 산업 s 기업의 생산성을 의미한다. 국가 i의 생산성은 산업별로는 차별화되어 있으나 산업 내에서는 동일하며, 국가 i의 산업 s의 기업 총량은 M_{is}로 표시한다. 유일한 생산요소인 노동은 완전경쟁시장인 노동시장에서 거래된다.

온실가스를 감축하기 위해 정부는 탄소세와 탄소 배출권 가격을 부과하는데, 국가 j의 탄소세, 탄소세 적용 범위, 탄소 배출권 가격, 배출권거래제 적용 범위를 각각 Ψ_{1j}, Λ_{1j}, Ψ_{2j}, Λ_{2j}와 같이 표시한다. 따라서 t_{ijs}가 국가 i의 산업 s에서 생산된 상품에 대해서 국가 j가 부과되는 관세를 의미할 때 국가 j가 국가 i의 산업 s의 기업에게 부과하는 탄소세, 배출권 가격, 관세 모두를 고려한 실효세금은 $\tau_{ijs} \equiv (1+t_{ijs})(1+\Lambda_{1j}\Psi_{1j}+\Lambda_{2j}\Psi_{2j})$으로 주어진다. 이렇게 주어진 τ_{ijs}가 우리 분석에서의 정책변수이다.

관세 외에 기타 무역장벽으로서 빙산형 수송비용(iceberg shipping cost)을 가정하였다. 따라서 국가 i의 산업 s에서 생산된 상품 ω_{is} 1단위가 국가 j에 도착하기 위해서는 $\theta_{ijs} \geq 1$만큼의 상품이 i에서 보내져야 하며, $i=j$일 경우 수송비용은 0이다($\theta_{ijs}=1$). 또한 관세와 기타 무역장벽을 이용한 차익거래는 가능하지 않다고 가정한다(no arbitrage condition). 이러한 가정으로부터 아래 식 (3)을 도출할 수 있다.

$$p_{ijs}(\omega_{is}) = p_{is}(\omega_{is})\theta_{ijs}\tau_{ijs} \tag{3}$$

식 (3)에서 $p_{ijs}(\omega_{is})$는 국가 i의 산업 s에서 생산된 상품 ω_{is}의 국가 j에서의 판매가격이고 $p_{is(\omega_{is})}$는 국가 i의 산업 s에서 생산된 상품 ω_{is}의 공장출하가격(ex-factory price)을 의미한다. 이때 국가 i의 산업 s에서 생산되어 j에서 소비되는 공장출하가격으로 계산된 무역액 X_{ijs}는 아래의 식 (4)와 같이 주어질 것이다.

$$X_{ijs} \equiv \int_0^{M_{is}} p_{is}(\omega_{is})\theta_{ijs}c_{ijs}(\omega_{is})d\omega_{is} \tag{4}$$

또한 국가 i의 무역수지흑자(trade surplus) Ω_i는 아래 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\Omega_i \equiv \sum_{s=1}^{S}\sum_{j=1}^{N}(X_{ijs} - X_{jis}) \tag{5}$$

한편 한 국가의 각 산업에서의 탄소 배출은 그 국가의 해당산업에서의 생산에 비례하는 것으로 가정하였다. 이 가정은 Shapiro(2016)와 유사하나 Shapiro(2016)는 국제무역이 탄소 배출에 미치는 효과를 추정하기 위해 무역의 운송수단에 의해서 탄소 배출이 달라질 수 있다고 가정한 반면 우리 분석에서는 한 국가의 산업별로 탄소 배출에 영향을 미치고 탄소 가격제 등의 정책이 생산과 탄소 배출에 미치는 영향에 보다 초점을 맞추었다. 따라서 국가 i의 탄소 배출 EM_i은 아래 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$EM_i \equiv \sum_{s=1}^{S} EM_{is} = \sum_{s=1}^{S}\chi_{is}\sum_{j=1}^{N}X_{ijs} \tag{6}$$

식 (6)에서 EM_{is}는 국가 i의 산업 s에서 발생하는 탄소량이며 χ_{is}는 국가 i의 산업 s의 생산에 대해 탄소 배출의 탄력성을 나타내는 파라미터이다.

모형의 경쟁균형(competitive equilibrium)은 다음과 같이 정의한다.

[정의] 경쟁균형(competitive equilibrium)은 외생변수 $\{M_{is}\}$가 주어졌을 때 다음 조건을 만족하는 $\{p_{is}(\omega_{is})\}$, $\{w_i\}$ $\{c_{ijs}(\omega_{is})\}$, $\{y_{is}(\omega_{is})\}$, $\{l_{is}(\omega_{is})\}$, $\{\pi_{is}(\omega_{is})\}$ $\{X_{ijs}\}$, $\{C_i\}_i$, $\{\Omega_i\}$, $\{Emi_i\}$으로 정의된다.

(1) 국가 j의 가계는 다음과 같이 예산제약하에서 식 (1)의 효용을 극대화한다.

$$\max_{\{c_{ijs}(\omega_{is})\}_{i,s}} \quad C_j \tag{7}$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^{N}\sum_{s=1}^{S}\int_0^{M_{is}} p_{is}(\omega_{is})\theta_{ijs}\tau_{ijs}c_{ijs}(\omega_{is})d\omega_{is} \leq w_j L_j + \sum_{s=1}^{S}\int_0^{M_{js}} \pi_{js}(\omega_{js})d\omega_{js} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{s=1}^{S}(\tau_{ijs}-1)X_{ijs} - \Omega_j$$

(2) 국가 j의 산업 s의 기업은 다음과 같이 이윤을 극대화한다.

$$\pi_{js}(\omega_{js}) = \max_{\{p_{js}(\omega_{js})\}_{n,s}} \sum_{n=1}^{N} p_{js}(\omega_{js})\theta_{js}c_{jns}(\omega_{js}) - w_j l_{js}(\omega_{js}) \tag{8}$$

$$s.t. \quad y_{js}(\omega_{js}) = \varphi_{js} l_{js}(\omega_{js})$$

(3) 모든 시장은 청산되며 무역수지의 총합계는 0이다.

<노동시장 청산조건>

$$\sum_{s=1}^{S}\int_0^{M_{is}} l_{is}(\omega_{is})d\omega_{is} - L_i \leq 0, \ \forall i \tag{9}$$

<산출물시장 청산조건>

$$\sum_{j=1}^{N}\theta_{ijs}c_{ijs}(\omega_{is}) - y_{is}(\omega_{is}) \leq 0, \ \forall i, \ \forall s \tag{10}$$

<무역수지의 총합계에 대한 제약>

$$\sum_{i=1}^{N}\Omega_i = 0 \tag{11}$$

(4) 탄소 배출량 EM_i는 식 (6)에 의해서 결정된다.

Ⅲ. 모형 분석

본 장에서는 앞 장에서 제시된 모형의 균형식을 도출하고 균형식의 해를 정량적으로 구하는 방법에 대해서 설명하기로 한다.

1. 균형식 도출

가계의 효용극대화를 나타내는 식 (7)으로부터 국가 j의 가계가 국가 i의 산업 s에서 생산된 상품에 대한 수요는 다음 식 (12)과 같이 도출할 수 있다.

$$c_{ijs} = \frac{(p_{is}\theta_{ijs}\tau_{ijs})^{-\sigma_s}}{P_{js}^{1-\sigma_s}}\mu_{js}\left(w_j L_j + \sum_{s=1}^{s} M_{js}\pi_{js} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{s=1}^{S}(\tau_{ijs}-1)X_{ijs} - \Omega_j\right) \quad (12)$$

이때 식 (12)의 P_{js}는 국가 j의 산업 s의 이상적인 가격지수(ideal price index)를 의미하며 다음 식 (13)과 같이 주어진다.[3)]

$$P_{js} = \left(\sum_{i=1}^{N} M_{is}(p_{is}\theta_{ijs}\tau_{ijs})^{1-\sigma_s}\right)^{\frac{1}{1-\sigma_s}} \quad (13)$$

한편 아래 식 (14)가 보여주듯이 식 (8)의 기업 이윤극대화로부터 국가 i의 산업 s의 독점적 경쟁기업은 한계비용에 마크업을 추가하여 가격을 책정한다.

$$p_{is} = \frac{\sigma_s}{\sigma_s - 1}\frac{w_i}{\varphi_{is}} \quad (14)$$

이때 식 (2), (4), (10), (14)으로부터 기업의 이윤은 $\pi_{is} = \frac{1}{\sigma_{is}}\sum_{j=1}^{N} X_{ijs}$와 같이 주어지

3) 국가 j의 산업 s의 이상적인 가격지수 P_{js}는 다음 조건을 만족하는 가격벡터 $\{p_{is}\}_i$의 함수로서 정의된다.

$v(\{p_{is}\}_i, E) = v\left(\{p'_{is}\}_i, \frac{EP'_{js}}{P_{js}}\right)$

위 식에서 v는 간접효용(indirect utility), E는 소득, P_{js}, P'_{js}는 각각 $\{p_{is}\}_i$, $\{p'_{is}\}_i$의 함수를 의미한다.

므로 노동소득은 아래 식 (15)와 같이 도출될 수 있다.

$$w_i L_i = \sum_{j=1}^{N} \sum_{s=1}^{S} \left(1 - \frac{1}{\sigma_s}\right) X_{ijs} \tag{15}$$

또한 가계의 효용 극대화인 식 (7)의 제약식으로 부터 국가 j의 총소비지출 E_j는 아래 식 (16)과 같이 주어진다.

$$E_j = \sum_{n=1}^{N} \sum_{s=1}^{S} X_{jns} + \sum_{i=1}^{N} \sum_{s=1}^{S} t_{ijs} X_{ijs} - \Omega_j \tag{16}$$

한편 식 (4)에 식 (14)와 (16)을 적용함으로써 공장출하가격으로 평가한 무역액은 식 (17)과 같이 주어진다.

$$X_{ijs} = M_{is} (\tau_{ijs})^{-\sigma_s} (p_{is}\theta_{ijs})^{1-\sigma_s} p_{js}^{\sigma_s - 1} \mu_{js} E_j \tag{17}$$

마지막으로 식 (13)에 식 (14)를 적용하면 국가 j의 산업 s의 이상적인 가격 지수는 다음의 식 (18)과 같이 주어진다.

$$P_{js} = \left(\sum_{i=1}^{N} M_{is} \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s - 1} \frac{w_i}{\varphi_{is}} \theta_{ijs} \tau_{ijs} \right)^{1-\sigma_s} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_s}} \tag{18}$$

따라서 각각 N개의 w_i와 E_i를 미지수로 가진 $2N$개의 연립방정식을 구성하는 식 (15)와 (16)은 X_{ijs}와 P_{is}를 정의하는 식 (17)과 (18)과 함께 모형의 균형식을 보여준다. 한편 이상적인 총가격지수(ideal aggregate price index)는 산업 간 소비에 대한 효용이 Cobb-Douglas이므로 $P_j = \prod_{s=1}^{S} \left(\frac{P_{js}}{\mu_{js}} \right)^{\mu_{js}}$이다. 이때 식 (12)를 효용함수 식 (1)에 대입함으로써 아래 식 (19)와 같은 간접효용함수(indirect utility function)를 도출할 수 있다.

$$C_j = \frac{E_j}{P_j}\left(\frac{1}{1+\left(\xi_j \sum_{i=1}^{N} EM_i\right)^2}\right) \tag{19}$$

위의 연립방정식의 해인 E_j, P_j과 EM_i에 대한 데이터를 식 (19)에 적용해서 정부의 탄소 감축정책의 변화에 따른 효용의 변화를 추정할 수 있다.

2. 변화율 형식으로의 균형식 전환

앞 절에서 균형식을 보여주는 연립방정식(식 (15)~(18))의 모든 파라미터의 값만 알 수 있다면 수치적 방법론(numerical method)을 통해서 균형식의 해를 손쉽게 도출할 수 있다. 하지만 파라미터 중에서는 θ_{ijs}와 같이 추정하기 위해서는 추가적인 가정이 필요하거나 M_{is}과 같이 추정하는 것이 상당히 어려운 파라미터도 존재한다. 따라서 우리 분석에서는 이렇게 추정하기 어려운 파라미터의 추정을 피하기 위해서 연산가능 일반균형모형(Computable General Equilibrium Model, CGE)의 해를 도출하는 가장 최근의 방법론을 활용할 것이다. 이 방법론(exact hat algebra)에 따르면 연립방정식 체계를 변형시켜서 수준(level)이 아닌 정책 변화에 따른 변화율을 구하기 위한 체계로 변형할 경우 몇 가지 파라미터는 우리가 풀어야 할 균형식에서 사라지게 되기 때문에 그 파라미터 값을 추정할 필요가 없다는 것이다. 이 방법론을 사용한 기존 연구에 대한 소개는 다음 3절에서 제시하기로 하겠다.

우선 균형식을 변화율 체계로 전환하기 위해서 몇 가지 부호와 파라미터를 정의하도록 하겠다. 첫 번째로 정책 변화 이전의 변수를 x라 할 때 정책 변화 이후의 변수를 x', 그 변화율을 $\hat{x} = \frac{x'}{x}$라 표시하기로 하겠다. 이를테면 우리 분석의 경우 정부가 온실가스 감축정책을 추진하면서 τ_{ijs}가 τ'_{ijs}로 변화할 때 τ_{ijs}하에서 식 (15)~(18)을 만족하는 내생변수 E_i, w_i, P_{is}, X_{ijs} 역시 τ'_{ijs}하에서는 새로운 값 E'_i, w'_i, P'_{is}, X'_{ijs}로 변화할 것이다. 이때 아래 상술하는 바와 같이 식 (15)~(18)을 변화율을 구하기 위한 균형식 체계로 변형하도록 하겠다. 그러기 위해서는 우선 전환된 균형식을 좀 더 단순하게 만들어주는 다음의 네 가지 파라미터를 정의하겠다.

$$\alpha_{mis} \equiv \frac{\tau_{mis} X_{mis}}{\sum_{n=1}^{N} \tau_{nis} X_{nis}} \tag{20}$$

$$\beta_{jns} \equiv \frac{X_{jns}}{E_j} \tag{21}$$

$$\gamma_{ijs} \equiv \frac{X_{ijs}}{E_j} \tag{22}$$

$$\delta_{ijs} \equiv (1 - \frac{1}{\sigma_s}) \frac{X_{ijs}}{w_i L_i} \tag{23}$$

이때 X_{ijs}와 τ_{ijs}에 대한 데이터가 있고 σ_s에 대한 추정치가 있다면 $E_j = \sum_{i=1}^{N} \tau_{ijs} X_{ijs}$와 식 (15)로부터 위의 식 (20)~(23)의 파라미터 값은 모두 계산이 가능하다. 그리하여 식 (20)~(23)의 파라미터 값을 이용해서 식 (15)와 (16)을 변화율 형식으로 표현하면 각각 다음과 같다.

$$\hat{w}_i = \sum_{j=1}^{N} \sum_{s=1}^{S} \delta_{ijs} \hat{X}_{ijs} \tag{24}$$

$$\hat{E}_i = \sum_{i=1}^{N} \sum_{s=1}^{S} \beta_{ins} \hat{X}_{ins} + \sum_{m=1}^{N} \sum_{s=1}^{S} t'_{mis} \gamma_{mis} \hat{X}_{mis} - \frac{\Omega'_i}{E_i} \tag{25}$$

이때 위의 식 (24)와 (25)에서 $\hat{X}_{ijs}$와 $\hat{P}_{is}$는 식 (17)과 (18)로부터 도출된 아래 식 (26)과 (27)과 같이 주어진다.

$$\hat{X}_{ijs} = (\hat{\tau}_{ijs})^{\sigma_s} (\hat{w}_i)^{1-\sigma_s} (\hat{P}_{js})^{\sigma_s - 1} \hat{E}_j \tag{26}$$

$$\hat{P}_{is} = \left(\sum_{m=1}^{N} \alpha_{mis} \left(\hat{w}_m \hat{\tau}_{mis} \right)^{1-\sigma_s} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_s}} \tag{27}$$

따라서 각각 N개의 $\hat{w}_i$와 $\hat{E}_i$를 미지수로 가진 $2N$개의 연립방정식인 식 (24)와 (25)는 식 (26)과 (27)과 함께 변화율로 표현된 모형의 균형식을 보여준다. 또한 앞 절의 균형식 (15)~(18)과는 달리 식 (24)~(27)와 같이 변화율 형식으로 균형식을 표현할 경우 연립방정식의 해를 구하기 위해서 L_i, M_i, φ_{is}, θ_{ijs}의 네 가지 파라미터는 균형식에서 사라져 버려서 이들의 추정치는 필요하지 않다는 것도 보여주고 있다.

마지막으로 온실가스 감축정책이 효용에 미치는 효과를 분석하기 위해서 식 (19) 역시 변화율 형식으로 전환할 경우 아래 식 (28)을 도출할 수 있다.

$$\hat{C}_j = \frac{\hat{E}_j}{\hat{P}_j} \left(\frac{1 + (\xi_j \sum_{i=1}^{N} EM_i)^2}{1 + (\xi_j \sum_{i=1}^{N} EM_i')^2} \right) \tag{28}$$

3. 방법론에 대한 기존 연구 논의

일반균형모형의 해를 수치적으로 계산하기 위해서 우리 연구에서 사용한 방법론은 Dekle, Eaton, and Kortum(2008)에 의해서 처음 개발되었으며 Costinot and Rodríguez-Clare(2014)에 의해서 'exact hat algebra'라는 이름으로 불리기 시작한 이후 최근의 CGE분석의 다양한 시나리오 분석에서 사용되기 시작하였다. 기존 연구에 대한 문헌연구인 Costinot and Rodríguez-Clare(2014)에 따르면 최근의 CGE분석은 모형 안에 현실의 세세한 요소를 모두 갖추기보다는 중요한 요소(first order features)만을 갖추는 방식으로 단순화하고 대부분의 파라미터 값도 모형 내에서 추정이 가능한 중간 규모의 모형(middle sized model)을 사용하고 있다. 따라서 이렇게 정책 변화가 영향을 미치는 중요한 채널만을 고려하고 있는 최근의 CGE 분석결과는 정책 결정과 관련해서 유용한 벤치마크로서 의미가 있을 것이다. 또한 좀 더 실용적인 관점에서는 이 방법론은 다양한 시나리오 분석(counterfactual analysis)에서 종종 추정하기는 어렵지만 시나리오 전후로 변화하지 않는 파라미터(fixed effect)에 대한 추정을 피할 수 있다는 점에서도 의미가 있다.

이 방법론을 가장 처음 개발한 Dekle, Eaton, and Kortum(2008)도 이러한 실용적인 유

용성에 대해서 명확하게 언급하고 있다. 이들은 2004년 당시 경상수지 적자가 GDP의 6%에 이르는 미국 등 많은 국가에서 경상수지의 불균형이 상당하다는 점을 지적하면서 경상수지가 조정되면서 이러한 불균형이 갑자기 사라질 경우의 경제적 영향을 가상적인 시나리오를 통해서 살펴보았다. 이를 위해서 42개국으로 이루어져 있는 Eaton and Kortum(2002)의 리카디안 모형을 설정하고 현재의 경상수지 불균형이 가상적으로 사라지는 시나리오를 분석하였다. 이들의 결과에 따르면 경상수지 불균형이 갑자기 사라질 경우 미국의 GDP는 최대 30% 가량 감소할 수 있다고 추정하였다.

Dekle, Eaton, and Kortum(2008)의 방법론을 다양한 시장구조를 가진 무역모형에 적용한 연구는 Arkolakis, Costinot and Rodríguez-Clare(2012)이다. 2000년대 이후 국제무역 연구에서 미시데이터가 사용되기 시작했는데, 이들은 이러한 미시데이터를 고려할 경우 개방의 효과에 대한 기존의 추정치가 변화할 것인지에 대해서 살펴보았다. 특히 가상적인 경제적 효과를 추정하기 위해서는 모형이 필요한데 이들은 Armington 모형, 리카디안 모형, Melitz 모형 등 여러 가지 모형에 Dekle, Eaton, and Kortum(2008)의 방법론을 적용하여 모든 국가가 완전한 폐쇄경제가 되는 가상적인 시나리오를 분석하였다. 이들의 결론은 어떤 모형을 사용하던지 모형이 예측하는 무역의 경제적 효과는 크게 차이 나지 않다는 것을 보여주었다.

한편 Ossa(2014, 2016)는 기존의 무역모형에 다양한 균형조건을 적용하여 주어진 관세에 대한 경쟁균형, 최적의 관세(optimal tariff), 비협조적 관세(noncooperative Nash tariff), 협조적 관세(cooperative tariff)를 정량적으로 계산하였다. 특히 협조적 관세(cooperative tariff)를 정량적으로 계산하는 것은 상당한 계산시간이 소요되기 때문에 정량적으로 분석한 기존의 연구는 많지 않은데, Ossa에서는 최근의 최적화기법과 함께 Dekle, Eaton, and Kortum(2008)의 방법론을 통해서 추정해야 하는 파라미터의 수를 줄여줌으로써 수치계산 방법론을 통한 협조적 관세의 계산이 가능해질 수 있었다. Ossa의 결과에 따르면 국가 간 협상 없이 관세를 설정하는 무역분쟁 시나리오의 경우(trade war) 모든 국가가 손실이 입는 반면에, 협상을 통해서 최적의 관세를 설정하는 시나리오의 경우(trade talk) 무역분쟁 시나리오 결과와 비교해서 모든 국가가 이득을 볼 수 있는 것으로 나타났다.

여기에서 언급된 연구 이외에도 많은 정량분석에서 Dekle, Eaton, and Kortum(2008)

의 방법론은 다양하게 활용되고 있다.[4] 우리 연구는 Ossa(2014, 2016)의 다국가-다산업을 가진 정태적 일반균형모형을 기초로 하되 생산에 의한 온실가스 배출, 온실가스 배출에 의한 비효용의 발생, 각국 정부의 온실가스 감축정책이라는 세 가지 요소를 모형 안에 추가하고 경쟁균형하에서 온실가스 감축정책 관련 시나리오가 변화할 때 배출량과 생산의 변화를 살펴보았다는 점에서 위의 연구들과는 차별화되어 있다.

4. 모수추정과 균형식의 해 도출 방법

앞으로의 분석에서는 앞 장에서 정의된 모형의 균형이 존재한다고 가정하고 온실가스 감축정책의 효과를 정량적으로 분석하겠다.[5] 균형식은 복잡한 비선형 연립방정식이라서 닫힌 형태의 해(closed form solution)를 도출할 수 없다. 따라서 MATLAB을 이용해서 근사적인 해(approximate solution)를 수치적으로 계산하기로 한다. 보다 구체적으로는 식 (24)~(27)의 균형식의 해를 구하기 위해서 MATLAB에 내제된 비선형 연립방정식의 해를 계산하는 fsolve의 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용한다. 균형식의 해를 구한 후에는 식 (6)을 이용하여 새로운 균형에서의 탄소 배출량을 계산하고 식 (28)에 균형식의 해와 새로운 탄소 배출량을 적용하여 효용의 변화를 추정할 것이다.

한편 무역수지를 포함하는 경상수지는 저축과 투자에 의해서 결정되므로 정태적 일반균형모형에서는 무역수지를 내생변수로서 분석하기는 어렵다. 따라서 실제 데이터에서 국가들의 무역수지 적자 혹은 흑자는 상당한 수준이기는 하지만, 우리 연구에서는 Caliendo and Parro(2015), Ossa(2014, 2016) 등 대부분의 정태적 일반균형모형을 이용

4) 이를테면 Caliendo and Parro(2015)는 NAFTA의 경제적 효과를 분석했으며, Eaton, Kortum, Neiman, and Romalis(2016)는 글로벌 금융위기 동안 세계무역 감소의 원인을 분석하는 방법론(accounting framework)을 개발했으며, Allen, Arkolakis, and Takahashi(2019)는 국제무역과 지리(geography)가 결합된 모형의 분석방법을 제안했다.

5) Antras and Chor(2018)와 Allen, Arkolakis, and Takaashi(2020)는 일반적인 개방경제 일반균형모형의 균형이 존재하고 유일하기 위한 조건을 제시하고 있다. 하지만 이들의 결과는 무역마찰(trade friction)이 있는 경우에는 적용될 수 있지만 무역마찰이 관세일 경우에는 적용될 수 없다. 현재까지의 연구결과에 따르면 일반적으로는 관세를 고려한 개방경제 일반균형모형에서 균형의 존재 여부를 증명할 수는 없다. Alvarez and Lucas(2007)가 관세가 있는 모형에서 균형이 존재함을 증명하기는 했지만, 비교역부문(non tradable sector)의 비중이 충분히 커야 한다. 따라서 Alvarez and Lucas의 증명은 미국과 같은 내수시장이 큰 국가에는 적용할 수 있으나 소규모 개방경제도 존재하는 우리의 모형경제에는 적용할 수 없을 것이다. 본 연구는 정량적 분석에 보다 초점을 맞추고 있으므로 최근의 많은 연구와 마찬가지로 균형이 존재하는 것으로 가정하고 컴퓨터를 통해서 수치적으로 균형을 분석하도록 하겠다.

한 분석과 마찬가지로 초기 균형상태에서 무역수지 적자를 0으로서 외생적으로 고정된 것으로 가정할 것이다.

균형식의 해를 도출하기 위해 필요한 데이터와 파라미터 값은 $\{\sigma_s\}$, $\{\tau_{ijs}\}$, $\{\xi_j\}$, $\{\chi_{is}\}$, $\{\Psi_{1i}\}$, $\{\Lambda_{1i}\}$, $\{\Psi_{2i}\}$, $\{\Lambda_{2i}\}$, $\{X_{ijs}\}$, $\{EM_{is}\}$이다. 산업별 무역탄력성 $\{\sigma_s\}$는 Feenstra(2010)의 방법론을 이용한 Ossa(2016)의 추정치를 사용하였다(Ossa(2016)의 Table 1 참조). 한편 국가·산업별 무역액 $\{X_{ijs}\}$과 관세 $\{\tau_{ijs}\}$에 대한 데이터는 Aguiar, Narayanan, and McDougall(2016)의 Global Trade Analysis Project(GTAP) 데이터베이스를 이용하였다. 2019년이 출시된 가장 최근 버전인 GTAP 10A는 2004년, 2007년, 2011년, 2014년의 네 개 년도의 데이터를 제공하고 있는데 우리 연구에서는 가장 최근 년도인 2014년과 2011년 데이터를 사용하였다. 또한 국가별 탄소세와 배출권 가격 $\{\Psi_{1i}\}$, $\{\Psi_{2i}\}$은 OECD(2016) 데이터를 탄소 배출 비중으로 가중 평균하여 계산하였으며, 탄소세와 배출권 거래제 적용 범위 $\{\Lambda_{1i}\}$, $\{\Lambda_{2i}\}$은 OECD(2016)의 적용 범위를 국가별로 가중 평균하여 합산한 값을 이용하였다. OECD(2016)의 탄소세와 배출권 가격의 단위는 배출 톤당 유로(EURO)인데 이를 Feenstra, Inklaar and Timmer(2015)의 Penn World Table(PWT 10.0)의 환율을 이용해서 달러화로 변환하였다. 마지막으로 효용함수에서 탄소의 비효용과 관련된 파라미터 $\{\xi_j\}$을 구하기 위해서 우선 식 (2)를 $\sum_{i=1}^{N} EM_i$으로 일차미분하고 ξ_j^2에 대한 방정식의 해를 구하여 정리하면 식 (29)를 도출할 수 있다.

$$\xi_j^2 = -\left(\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)^2} + \frac{\partial V_j}{\partial\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)}\frac{E_j/P_j}{\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)^3}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)^2} + \frac{\partial V_j}{\partial\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)}\frac{E_j/P_j}{\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)^3}\right)^2 - \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)^4}} \tag{29}$$

식 (29)를 이용해서 ξ_j의 값을 구하기 위해서는 탄소 배출($\sum_{i=1}^{N} EM_i$), 총소비지출($\frac{E_j}{P_j}$), 그리고 탄소의 사회적 비용($\frac{\partial V_j}{\partial\left(\sum_{i=1}^{N} EM_i\right)}$)에 대한 추정치가 필요하다. 탄소 배출은

GTAP의 국가별 산업별 국내생산에 의한 추정치(MDF) EM_{is}를 국가별로 합산한 값을 사용했으며, 총소비지출은 PWT의 지출 측면에서의 GDP를 이용하였다. 이때 국가별 탄소의 사회적 비용의 경우 미국의 추정치는 Interagency Working Group on the Social Cost of Greenhouse Gases(2016)에서 추정한 탄소의 사회적비용 값 중 할인율 3%에 따라서 제시된 이산화탄소 배출 톤당 $35를 이용하고 다른 국가들의 경우 Shapiro(2016)와 마찬가지로 미국의 탄소의 사회적 비용을 미국 대비 상대적인 GDP의 비율로 가중평균한 값을 국가별 탄소 비용으로 사용하였다. 그리하여 χ_{is}은 탄소 배출과 양자무역 데이터를 식 (6)에 적용하여 도출하였다(<부록 표 2> 참조).

〈표 1〉 모형의 국가 및 산업 분류

국가	산업	
중국 EU 일본 한국 미국 RoW	쌀(rice) 밀(wheat) 기타 곡물(other cereal grains) 채소 등(vegetables, etc) 울 등(wool, etc) 설탕(sugar) 식물성 섬유(plant-based fibers) 기타 작물(other crops) 소 등(bovine cattle, etc) 기타 축산물(other animal products) 유제품(dairy) 오일 시드(oil seeds) 임업(forestry) 소고기류 제품(bovine meat products) 기타 육류제품(other meat products) 식물성오일 등(vegetable oils, etc) 기타 식품류(other food products) 석유(oil) 해상·비행수송(sea and air transport) 기타 서비스(construction, trade, communication, financial service nec, insurance, business services nec, recreation and other services, public administration/ health/education, dwellings) 기타(fishing, minerals nec)	음료 등(beverages, etc) 섬유(textiles) 의복(wearing apparel) 가죽제품(leather products) 목공품(wood products) 종이류 제품(paper products) 화학제품 등(chemical products, etc) 기타 광물제품(other mineral products) 철 금속(ferrous metals) 기타 금속(other metals) 금속제품(metal products) 자동차 등(motor vehicle, etc) 기타 수송장비(other transport equipment) 전자장비(electronic equipment) 기타 기계류(other machinery, etc) 기타 제조업(other manufactures) 석탄(coal) 가스(gas) 기타운송(transport nec) 유틸리티(electricity, gas manufacture/ distribution, water)

자료: 저자 작성.

<표 1>은 분석대상인 국가와 산업을 보여준다. 중국은 중국과 홍콩을 EU는 유럽연합 28개국을 포함하며, RoW(Rest of the World)는 중국, EU, 일본, 한국, 미국을 제외한 나머지 모든 국가의 집합을 의미한다. 산업은 GTAP 데이터베이스의 57개 산업을 33개 산업으로 재분류하여 분석하였다.

마지막으로 <표 2>는 우리 모형에서의 국가들의 생산, 수출, 수입 그리고 CO_2배출량과 세계 전체 대비 각 국가의 비중을 요약해서 보여주고 있다.

〈표 2〉 2014년 산업생산, 수출입 및 탄소 배출량

(단위: 백만US달러, 메가톤)

	중국	EU	일본	한국	미국	RoW
산업생산	16,156,729	11,119,055	3,277,716	1,729,960	8,448,369	17,055,404
(%)	(28.0)	(19.2)	(5.7)	(3.0)	(14.6)	(29.5)
수출	2,432,551	5,289,714	799,422	587,501	1,428,780	4,637,099
(%)	(16.0)	(34.9)	(5.3)	(3.9)	(9.4)	(30.6)
수입	1,519,715	4,899,979	545,470	367,459	1,913,933	5,928,513
(%)	(10.0)	(32.3)	(3.6)	(2.4)	(12.6)	(39.1)
CO_2배출량	7,533	2,689	906	447	4,120	10,268
(%)	(29.0)	(10.4)	(3.5)	(1.7)	(15.9)	(39.5)

자료: Aguiar, Narayanan, and McDougall(2016)의 GTAP 데이터베이스를 이용하여 저자 작성.

IV. 분석 결과

본 장에서는 아래 상술하는 네 가지의 가상적인 시나리오(counterfactual experiments)를 앞 장에서 개발한 연산가능일반균형모형에 적용하여 온실가스 감축정책이 세계경제에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보겠다. 우리 분석에서는 GTAP데이터의 가장 최신년도인 2014년과 2011년 데이터를 활용했는데, 본 장에서는 2014년 분석결과에 대해서만 보고하고 논의하며 2011년 데이터를 활용한 결과는 <부록 표 1>에 제시하도록 하겠다. 우리 연구의 중요한 정성적인 결과와 정책적인 시사점은 두 데이터 중 어느 데이터를 사용하든지 동일하게 발견할 수 있었다. 또한 본 장에서는 모형의 결과와 결과에 대한 직접적인 해석만을 제시하고, 기존의 다른 연구에 대한 논의 및 이와 관련된 우리 연구의

한계와 정책적 시사점은 다음 장에서 좀 더 중점적으로 논의하도록 하겠다.

<표 3>는 두 가지 시나리오의 가상실험 내용을 요약해서 보여주고 있다. 첫 번째 시나리오인 '개별 시나리오'에서는 우리 모형에서 고려하고 있는 국가인 중국, EU, 일본, 한국, 미국, RoW 중 한 국가만이 개별적으로(unilaterally) 탄소세 정책을 강화하는 경우를 분석했다. 특히 탄소세 정책을 강화한 국가의 온실가스 배출량과 생산에 미치는 영향뿐 아니라 세계 온실가스 배출량과 생산에 미치는 영향도 살펴보았다. 두 번째 시나리오인 '공동 시나리오'에서는 모든 주요국들이 탄소 감축을 위해서 공동으로(aligned) 탄소세 정책을 동시에 강화할 경우 세계경제에 미치는 영향을 분석하였다. 그리하여 '개별 시나리오'에서의 전 세계 탄소 배출의 변화와 '공동 시나리오'의 결과를 비교함으로써 2015년 파리기후협정 이후 국제사회가 공동으로 추진하고 있는 조율된 온실가스 감축 노력의 필요성에 대해서 살펴볼 것이다.

〈표 3〉 시나리오 구성 및 내용(Counterfactual Exercise)

구분	정책 변화 충격 대상 국가	내용
개별 시나리오	중국, EU, 일본, 한국, 미국, RoW 중 한 국가만 개별적으로 변화	특정 한 개국만 기존 탄소세와 탄소세 적용 범위를 강화
공동 시나리오	모든 국가가 공동으로 동일하게 변화	탄소세를 30EURO/tCO_2로 증가시키고 탄소세 적용 범위도 60%로 강화

자료: 저자 작성.

한편 OECD(2016)는 농업, 전력, 산업, 비도로부문 수송, 주거 및 상업, 도로 수송의 6개 부문으로 구분하여 각 부문의 탄소 배출량, 평균 탄소세, 탄소세가 적용되는 범위, 평균 배출권거래권의 가격, 배출권거래제가 적용되는 범위에 대한 정보를 제공하고 있다. 우리 연구에서는 국가별 탄소세와 배출권거래가격 및 이들의 적용 범위를 추정하기 위해서 OECD(2016)의 부문별 가격과 탄소 배출량을 활용한 가중평균을 계산하였다. 또한 탄소세와 배출권 거래제의 적용 범위를 추정하기 위해서 국가별 총 탄소 배출량 중 탄소 가격제가 적용되는 부문의 비율도 계산하였다. 이때 이렇게 계산된 탄소 가격제에 적용된 범위와 가격이 국가 별로 상이한 것을 확인할 수 있다. 이를테면 중국의 탄소세는 27.5유로로 분석에서 고려한 주요 국가 중에서 가장 높았으나 탄소세의 적용 범위는 2.2%에 불과하였다. 한편 배출권가격의 경우 한국, EU는 5.1유로와 4.2유로로 다른 지

역에 비해서 크게 높은 수준은 아니었으나 적용 범위는 각각 69.1%와 40.1%로 상대적으로 높은 수준이었다. <표 4>는 이렇게 국가별로 추정된 탄소세, 배출권가격 및 이들의 적용 범위를 보여주고 있다.

〈표 4〉 주요국의 탄소세와 배출권 거래가격 추정치

	중국	EU	일본	한국	US	RoW
탄소세 (EURO/tCO_2)	27.5	13.5	6.7	9.9	0.3	3.7
탄소세 범위(%)	2.2	41.4	57.2	16.7	4.0	23.4
배출권가격 (EURO/tCO_2)	3.9	4.2	66.1	5.1	3.5	0.4
배출권가격범위(%)	9.1	40.1	1.0	69.1	4.4	0.5

자료: OECD(2016)을 이용하여 저자작성.

<표 5>는 우리 연구의 가장 핵심적인 결과이다. 여기서는 다른 국가들은 기존의 정책을 유지하는 가운데 한 국가만이 개별적으로 탄소세 정책을 강화하는 '개별 시나리오'가 발생할 경우 해당 국가와 전 세계의 탄소 배출, 생산, 후생의 변화를 보여주고 있다. 이때 표의 각각의 열은 어느 국가에서 정책 변화가 발생했는지 보여주고, 각각의 행은 구체적으로 탄소세와 탄소세 적용 범위가 얼마나 강화되었는지를 보여준다. 따라서 표의 각각의 요소는 우리 모형에서 이전 균형과 새로운 균형 간의 차이를 퍼센트(%)로 보여주고 있다.

<표 5>의 분석결과에 따르면 국가별 탄소세 정책의 강화는 해당 국가의 상품가격 상승에 따른 가격효과 때문에 그 국가의 탄소 배출량과 국내생산, 후생을 감소시키지만, 반드시 세계의 탄소 배출량과 생산량을 감소시키지는 않는 것으로 나타났다. 이를테면 중국이나 RoW가 자국의 탄소세 정책을 강화할 경우 이 두 국가의 산업생산과 탄소 배출과 함께 세계의 산업생산과 탄소 배출도 감소되는 반면에 EU, 일본, 한국, 미국이 탄소세 정책을 강화할 경우 생산의 재배치(production shifting) 효과 때문에 세계의 탄소 배출량은 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

이렇게 중국 및 RoW와 다른 국가들 사이에 차별화된 결과가 나타나는 이유는 크게 두 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 중국과 RoW가 세계경제에서 산업생산과 탄소 배출량에서 상당한 비중을 차지하고 있기 때문이다. 이를테면 <표 2>에서 보고한 바와 같이 중국과 RoW는 생산에서는 28.0%, 29.5%를 차지하는 반면에 나머지 다른 국가들 각각은 전체 생산의 20% 미만을 차지하고 있다. 탄소 배출량에 있어서도 이들 두 국가는 각각 29.0%와 39.5%를 차지하고 있어서 각각 16% 미만인 다른 국가들 보다 많은 탄소를 배출하고 있다. 따라서 이들 두 국가가 차지하는 비중을 고려할 때 비록 이들 국가 만의 개별적인 정책이라도 세계 산업생산과 탄소 배출에 미치는 영향은 상당할 수 있는 것이다.

둘째, 산업생산 증가에 따른 탄소 배출의 탄력성을 나타내는 파라미터 χ_{is}가 중국과 RoW는 다른 지역에 비해서 상대적으로 높기 때문이다(<부록 표 2> 참조). 이를테면 모든 국가에서 단위 생산에 따른 탄소 배출이 높은 산업에 속하는 기타광물제품(other mineral products) 산업의 경우 중국과 RoW는 대략 0.0008 혹은 0.0010의 값을 가지는 것으로 모형 안에서 추정되는 반면에 다른 모든 지역은 이러한 값의 절반에도 미치지 못하는 수준을 보여주고 있다. 따라서 각국의 탄소세 정책이 강화됨에 따라서 동일한 양만큼 산업생산이 줄어드는 경우에도 다른 지역에 비해서 중국과 RoW의 탄소 배출이 좀 더 많이 감소하게 된다.

한편 EU의 경우에는 국내 생산 감소와 함께 세계 생산은 감소하고 있으나 중국과 RoW와는 달리 세계 탄소 배출량은 오히려 증가하고 있다. 이것은 EU 역시 세 번째로 큰 생산규모(19.2%)를 차지하고 있어서 국내 생산 감소가 세계 생산 감소로 연결되기는 하였으나 다른 지역 대비 탄소 배출량은 상대적으로 작고(10.4%), 탄소 배출 탄력성 파라미터 χ_{is}의 값 역시 상대적으로 작기 때문이다. 이를테면 기타 광물제품 산업의 경우에도 EU가 전 지역 중 가장 낮은 수준이다. 따라서 EU의 탄소세 정책 강화 이후 이 지역의 생산이 줄어들면서 다른 지역의 상품으로 대체되는 생산의 재배치가 일어나는데, 이들 다른 지역은 탄소 배출의 탄력성이 EU보다 대체로 높기 때문에 오히려 세계의 탄소 배출은 증가하게 되었다.

따라서 <표 5>의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 배출규모가 상대적으로 작고 탄소 배출의 탄력성도 작은 국가(EU, 일본, 한국, 미국)가 개별적으로 탄소세 정책을 강화할 경우 이들 국가에서 탄소 배출의 탄력성이 큰 국가(중국, RoW)로 생산이 재배치되면서 탄소 배출은 오히려 증가하게 된다. 반면 탄소 배출의 탄력성이 큰 국가(중국, RoW)

의 경우 개별국가의 정책이 이들 국가로부터 탄력성이 작은 국가로 생산을 재배치시키면서 탄소 배출을 감소시키는 것으로 나타났다. 특히 중국, RoW는 전 세계 생산에서 차지하는 비중도 상당해서 이들의 생산 감소는 전 세계 산업생산과 탄소 배출의 감소로 연결되게 되었다. 한편 EU는 이 두 종류의 국가 사이에서 중간적인 위치에 있다. 이를테면 세계생산에서 차지하는 비중은 상당해서 EU의 생산 감소는 전 세계의 생산 감소로 연

〈표 5〉 '개별 시나리오'의 결과

(단위: %)

	탄소세 변화	적용 범위 변화	중국	EU	일본	한국	미국	RoW
국내CO_2	30EURO 상승	10%p 상승	-2.6	-6.0	-7.0	-3.4	-2.5	-8.6
	60EURO 상승	10%p 상승	-3.6	-8.7	-10.0	-5.4	-5.1	-13.2
	90EURO 상승	10%p 상승	-4.5	-10.7	-11.9	-7.0	-7.2	-16.4
	30EURO 상승	20%p 상승	-4.1	-6.9	-7.7	-4.4	-4.4	-10.4
	60EURO 상승	20%p 상승	-5.5	-9.7	-10.7	-6.8	-8.1	-15.3
	90EURO 상승	20%p 상승	-6.5	-11.8	-12.7	-8.7	-10.9	-18.8
	30EURO 상승	30%p 상승	-5.3	-7.6	-8.3	-5.3	-6.1	-11.9
	60EURO 상승	30%p 상승	-6.8	-10.6	-11.4	-8.0	-10.5	-17.2
	90EURO 상승	30%p 상승	-8.0	-12.7	-13.3	-10.0	-13.7	-20.8
국내생산	30EURO 상승	10%p 상승	-1.3	-3.4	-3.3	-1.4	-0.8	-5.4
	60EURO 상승	10%p 상승	-2.1	-5.2	-5.2	-2.6	-2.3	-9.1
	90EURO 상승	10%p 상승	-2.8	-6.7	-6.6	-3.6	-3.6	-12.1
	30EURO 상승	20%p 상승	-2.5	-4.0	-3.7	-2.0	-1.9	-6.8
	60EURO 상승	20%p 상승	-3.6	-6.0	-5.7	-3.5	-4.1	-11.1
	90EURO 상승	20%p 상승	-4.5	-7.6	-7.2	-4.7	-6.0	-14.3
	30EURO 상승	30%p 상승	-3.4	-4.5	-4.0	-2.6	-2.9	-8.0
	60EURO 상승	30%p 상승	-4.8	-6.7	-6.2	-4.3	-5.7	-12.8
	90EURO 상승	30%p 상승	-5.9	-8.4	-7.8	-5.7	-7.9	-16.3
후생	30EURO 상승	10%p 상승	-0.3	-0.9	-1.0	-0.7	-0.3	-1.5
	60EURO 상승	10%p 상승	-0.4	-1.3	-1.5	-1.2	-0.7	-2.3
	90EURO 상승	10%p 상승	-0.5	-1.6	-1.9	-1.5	-1.0	-3.0
	30EURO 상승	20%p 상승	-0.4	-1.0	-1.1	-1.0	-0.6	-1.8
	60EURO 상승	20%p 상승	-0.6	-1.4	-1.6	-1.5	-1.1	-2.8
	90EURO 상승	20%p 상승	-0.7	-1.8	-2.0	-1.9	-1.6	-3.5
	30EURO 상승	30%p 상승	-0.6	-1.1	-1.2	-1.2	-0.8	-2.1
	60EURO 상승	30%p 상승	-0.7	-1.6	-1.7	-1.8	-1.5	-3.1
	90EURO 상승	30%p 상승	-0.9	-1.9	-2.2	-2.3	-2.1	-3.9

〈표 5〉 '개별 시나리오'의 결과 (계속)

(단위: %)

	탄소세 변화	적용 범위 변화	중국	EU	일본	한국	미국	RoW
세계CO_2	30EURO 상승	10%p 상승	-0.5	0.5	0.6	0.4	0.3	-2.1
	60EURO 상승	10%p 상승	-0.7	0.8	0.9	0.6	0.4	-3.2
	90EURO 상승	10%p 상승	-0.8	1.0	1.2	0.8	0.6	-3.9
	30EURO 상승	20%p 상승	-0.8	0.6	0.7	0.5	0.4	-2.5
	60EURO 상승	20%p 상승	-1.0	0.9	1.0	0.8	0.6	-3.6
	90EURO 상승	20%p 상승	-1.2	1.1	1.3	1.1	0.8	-4.4
	30EURO 상승	30%p 상승	-1.0	0.7	0.8	0.6	0.5	-2.9
	60EURO 상승	30%p 상승	-1.3	1.0	1.1	1.0	0.8	-4.0
	90EURO 상승	30%p 상승	-1.6	1.2	1.4	1.3	1.1	-4.8
세계생산	30EURO 상승	10%p 상승	-0.2	-0.0	0.4	0.3	0.1	-0.7
	60EURO 상승	10%p 상승	-0.3	-0.1	0.6	0.5	0.2	-1.2
	90EURO 상승	10%p 상승	-0.4	-0.2	0.8	0.7	0.2	-1.6
	30EURO 상승	20%p 상승	-0.4	-0.1	0.4	0.4	0.1	-0.9
	60EURO 상승	20%p 상승	-0.5	-0.1	0.7	0.6	0.2	-1.5
	90EURO 상승	20%p 상승	-0.7	-0.2	0.8	0.8	0.3	-1.9
	30EURO 상승	30%p 상승	-0.5	-0.1	0.5	0.5	0.2	-1.1
	60EURO 상승	30%p 상승	-0.7	-0.1	0.7	0.8	0.3	-1.7
	90EURO 상승	30%p 상승	-0.9	-0.2	0.9	1.0	0.3	-2.1

자료: 저자 작성.

결되었지만, 탄소 배출의 산업생산에 대한 탄력성도 낮아서 EU의 탄소세 정책의 강화는 탄소 배출의 탄력성이 높은 국가로의 생산의 재배치 때문에 오히려 세계 탄소 배출의 증가를 가져오게 되었다.

<표 6>는 '공동 시나리오'에서 모든 주요국들이 전 세계 탄소 배출 감축에 합의하면서 공동으로 강화된 탄소 정책을 수립하는 경우의 영향을 분석하였다. 다른 여러 가지 시나리오가 있을 수 있지만 특히 여기서는 강화된 탄소세로서 30유로로 설정하였는데, 이것은 각국이 보다 의욕적인 탄소 감축을 촉진하기 위해서 OECD(2016)에서 제안한 탄소 가격인 30유로를 반영한 것이다. 또한 모든 주요국이 동시에 강화된 탄소 정책을 수립함으로써 비슷한 수준의 탄소 감축에 동참하는 상황을 가정하기 위해서 각 국가의 탄소세의 적용 범위도 모든 주요국에 대해서 지금보다 높은 수준인 60%로 동일하게 적용하였다.

<표 6>에 따르면 우리 모형은 이러한 탄소 감축을 위한 모든 국가들의 참여는 전 세계

의 생산을 1.0%만큼 감소시키면서 탄소 배출도 2.2%만큼 감소시키는 것으로 예측하고 있다. 다만 국가별 효과는 차이가 있는데 중국, EU, 일본, 한국은 탄소 배출이 증가하고 있는 반면에 미국과 RoW가 국내의 생산과 탄소 배출이 감소하면서 전 세계 생산과 탄소 배출 감소를 주도하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이것은 '공동 시나리오'에서 OECD (2016)에 따라서 모든 국가에 공통으로 설정한 탄소세(30유로)와 적용 범위(60%)가 미국과 RoW의 현재 수준 대비 가장 큰 차이를 보이고 있기 때문이다. 이를테면 모든 지역의 두 정책변수의 변화율의 곱을 계산해보면 미국과 RoW 두 지역에서 가장 높은 수준인 것으로 나타나고 있다. 또한 상대적으로 탄소 배출이 많으며 생산에 대한 탄소 배출의 탄력성이 높은 RoW에서의 정책 변화에 따른 생산과 탄소 배출의 감소가 특히 큰 것으로 나타났다.

〈표 6〉 '공동 시나리오'의 결과

(단위: %)

	중국	EU	일본	한국	미국	RoW	세계
CO_2	0.3	2.7	2.5	6.0	-4.5	-6.1	-2.2
생산	1.4	3.2	3.9	4.7	-1.0	-3.9	-1.0
후생	-0.2	0.1	0.1	-0.5	-0.6	-1.6	

자료: 저자 작성.

V. 연구결과에 대한 논의

우리 연구에서 사용된 모형과 정책실험의 시나리오 모두 기존 연구와는 다소 차이가 있어 정확한 비교는 어렵다. 하지만 대략적으로는 우리 연구가 예측하는 온실가스 감축 정책의 효과가 기존 연구와 비교할 때 다소 작다는 것을 확인할 수 있었다. 이를테면 Elliott et al.(2010)은 전 세계의 탄소세를 175달러까지 증가시킬 경우 전 세계의 탄소 배출을 40% 이상 줄일 수 있으며 미국의 경우 29달러까지 증가시킬 경우 미국의 탄소 배출을 33%만큼 감소시킬 수 있다고 보고하고 있다. 또한 보다 최근의 연구인 Fried(2018) 역시 미국이 24.5～30.3달러로 탄소세를 설정할 경우 30～34.6%만큼 탄소 배출을 줄일 수 있다고 주장하고 있다.

반면 우리 연구의 분석결과는 정량적으로 이들의 결과와는 차이가 있는데, 이렇게 차

이가 발생하는 이유는 크게 세 가지로 정리할 수 있다.

첫째 우리 모형은 자본축적 등 동태적 현상을 고려하고 있지 않은 반면에 Elliott et al.(2010), Nordhaus(2017) 등은 모형 내에 내생적으로 자본축적이 일어나는 신고전파 성장모형을 기초로 하고 있다. 자본축적이 있을 경우 탄소세 등의 감축정책의 강화는 자본축적도 감소시켜서 장기균형 상태에서의 탄소세의 효과 역시 좀 더 크게 나타날 수 있다. 특히 관련된 연구로서 Ravikumar et al.(2019)은 자본축적이 가능한 동태적 무역모형에서의 정책효과는 정태적 무역모형보다 클 수 있음을 정량적으로 보여준 바 있다.

둘째, 우리 모형에서는 탄소 감축을 위한 기술혁신을 내생적으로 고려하지 않았다. 반면에 현실의 기업들은 온실가스 감축정책에 대해서 보다 능동적으로 대응할 수 있다. 이를테면 기업들은 녹색성장(green innovation) 혹은 화석연료산업의 성장(fossil innovation) 등으로 기술 진보의 방향을 결정할 수 있다. 기존의 연구 중에서도 숙련편향적 기술 진보(Skill-Biased Technological Change, SBTC)를 고려하고 있는 내생적 성장모형에 기반을 둔 Acemoglu et al.(2012), Fried(2018) 등은 특정 방향으로의 기술 진보가 가능하다. 그리하여 이들 분석에서는 온실가스 감축정책의 강화는 기업의 기술 진보를 탄소 배출이 적은 방향으로 유도함으로써 상대적으로 작은 감축정책의 강화도 상당한 배출 감소 효과로 이어질 수 있다.

마지막으로 Shapiro(2016)와 마찬가지로 우리 연구 역시 산업 간의 투입·산출 관계(input output linkage)를 고려하고 있지는 않다. 반면 많은 기존의 연구에서는 석탄, 석유 등 다양한 종류의 에너지 중간재 등 투입·산출 관계를 고려하고 있다. 이미 Jones(2011) 등 많은 기존의 연구에서 주장하고 있듯이 이렇게 투입·산출구조하에서는 작은 정책 변화도 일반균형효과에 의한 중간재 가격 변화를 통해서 커다란 효과로 이어질 수 있음을 보여주고 있다.

이렇게 우리 모형은 기존 연구에서 고려하고 있는 중요한 요소를 포함하고 있지는 않다. 하지만 Dekle, Eaton, and Kortum(2008), Arkolakis, Costinot, and Rodríguez-Clare (2012) 등 국제무역에서 개발된 새로운 CGE 방법론을 사용했다는 점에서 기존의 연구와 차별화될 뿐 아니라 다음에 상술하는 바와 같이 두 가지 측면에서 향후 온실가스 감축정책 방향과 관련된 중요한 의의를 제시하고 있다.

첫째, 우리 연구결과의 직접적인 정책적 시사점은 선진국의 경우 한 국가의 개별적인 노력만으로는 온실가스 감축에 제한적인 영향만을 미칠 수 있으며 국가 간 조율된 감축 노력이 필요하다는 점을 시사하고 있다. 우리 연구의 발견과 관련해서 Nordhaus(2015)는 교토 의정서(Kyoto Protocol)가 제대로 작동하고 있지 않음을 지적하면서, 국가 간 조율된 온실가스 감축 노력으로서 기후클럽(Climate Club)을 제안한 바 있다. 보다 최근 연구인 Kortum and Weisbach(2020) 역시 한 지역에서의 개별적인 감축정책은 생산의 재배치에 따른 비효율을 유발할 수 있다고 주장하고 있다. 이러한 주장을 뒷받침하기 위해서 이들 연구는 모두 상대적으로 단순한 모형을 통한 이론적인 접근법을 사용하고 있다. 반면에 우리 연구는 좀 더 현실에 근접한 다국가-다산업 모형을 통한 보다 경험적인 접근법(empirical approach)을 사용하였다. 그리하여 온실가스 감축정책의 강도가 약한 국가로 생산이 재배치된다는 오염피난처 가설(pollution heaven hypothesis)을 경험적으로 뒷받침한다는 점에서 정책적 의의가 있다.

둘째, 우리의 연구결과에 따르면 탄소 배출 감소를 위한 기업의 내생적인 기술 진보 노력이 없는 경우 탄소세 등 가격효과를 통한 탄소 저감 정책이 효과를 거두기 위해서는 상당히 높은 가격을 부과해야 하는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과는 간접적으로 온실가스 감축을 위한 기술혁신 없이는 가격효과만을 타깃으로 한 정부 정책은 한계가 있을 수 있으며 탄소 배출 감소를 위해서는 기업의 내생적인 기술 진보(green innovation)가 중요하다는 점을 시사한다. 따라서 우리의 분석결과는 정부가 온실가스 배출에 따른 외부효과를 내제화시키는 정책뿐 아니라 기업으로 하여금 온실가스를 줄일 수 있는 기술투자를 통해 새로운 산업으로의 진출을 유도하기 위한 정책 마련도 중요하다는 것을 의미한다. 그리하여 탄소세 정책과 함께 다른 정책수단도 도입할 필요가 있는데, 기업들로 하여금 탄소 배출을 줄이기 위한 R&D를 시행할 수 있는 녹색성장을 위한 보조금(green innovation subsidy)이 그 한 가지 정책방향이 될 수 있다. Acemoglu et al.(2012), Lemoine(2020) 등 최근의 이론 연구들도 최적의(optimal) 저감정책은 탄소세와 함께 기업들의 저탄소 산업에 대한 R&D 투자를 유도할 수 있는 보조금 정책의 시행이라고 주장한 바 있다. 우리 연구의 결과는 이런 이론적인 결과에 간접적이지만 보완적인 경험적인 근거를 제시하고 있다.

Ⅵ. 결 론

본 연구는 온실가스 감축정책이 세계의 산업생산과 온실가스 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 다국가-다산업 정태적 연산가능일반균형모형을 개발하였다. 또한 이렇게 개발된 모형의 파라미터 값을 추정하고 모형에 적용할 수 있는 가장 최근의 방법론(exact hat algebra)을 사용해서 모형의 해를 계산하였다. 우리 모형의 예측에 따르면 국가별 탄소세 정책의 강화는 해당 국가의 상품가격 상승에 따른 가격효과 때문에 그 국가의 탄소 배출량과 국내생산, 후생을 감소시키지만, 반드시 세계의 탄소 배출량과 생산량을 감소시키지는 않는 것으로 나타났다. 반면 모든 주요국들이 공동으로 조율하여 OECD(2016)에서 제시한 강화된 감축정책을 추진할 경우에 전 세계의 온실가스 배출을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

그리하여 본 연구에서는 분석결과로부터 다음과 같은 두 가지 정책적 시사점을 제시하였다.

첫째, 온실가스의 외부효과를 고려할 때 국제사회 차원에서 주요 국가 간의 조율된 행동이 필요함을 시사하고 있다. 2016년 발효된 파리기후협정도 이러한 인식하에 출발하였으나, 각 국가별로 감축 정책의 추진 강도는 여전히 상이하다. 본 연구의 분석대로 탄소 가격제가 도입되더라도 적용 범위와 가격 수준에 따라 생산을 포함한 경제지표의 영향이 다르게 나타난다. 따라서 파리기후협정 이후에도 국제사회는 각 국가 간 정책을 꾸준히 모니터링하면서, 다른 국가와의 일관되고 조율된 기후변화 대응 방안을 수립하는 체계 마련이 필요하다.

둘째, 온실가스 감축을 위한 기술혁신 없이는 정부 정책은 한계가 있으며 단기적으로 경제에 부정적인 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 정부는 온실가스 배출에 따른 외부효과를 내제화시키는 정책뿐 아니라 기업으로 하여금 온실가스를 줄일 수 있는 기술투자를 통해 기술 진보의 방향을 배출을 줄이는 방식으로 유인하기 위한 정책 마련도 필요할 것이다.

한편 연산가능일반균형모형을 활용한 기존의 다른 연구와 마찬가지로 본 연구도 모형에 대한 가정에 기초 하고 있다. 특히 다음에 제시하는 세 가지 요소는 후속연구를 통해서 보완한다면 중요한 연구성과가 될 것이다.

첫째, 본 연구의 모형은 정태적 일반균형모형으로 탄소 배출이 즉각적으로 경제에 영향을 미치는 것으로 가정했다. 따라서 여기서의 정태적 모형을 장기적 변화를 분석하는 모형의 단순화한 형태(short cut representation of long run model)로서 생각할 수도 있다. 하지만 배출된 탄소 축적을 통해 물적·인적 자본축적 등에 지속적으로 영향을 미치면서 균형 간의 이동경로와 장기균형에도 영향을 미칠 수도 있다.

둘째 우리의 분석에서는 탄소 감축을 위한 기술혁신을 내생적으로 고려하지 않았다. 정부의 정책을 탄소 가격제 등 가격정책에만 한정하고 있으며, 기업 역시 주어진 가격에 대해서 생산을 조정할 뿐 내생적으로 기술투자를 통한 탄소 가격제에 대해 대응할 수 있음을 고려하고 있지 않다. 반면에 현실의 기업들은 온실가스 감축정책에 대해서 보다 능동적으로 대응할 수 있다. 이를테면 기업들은 기술 진보의 방향을 녹색성장(green innovation) 혹은 화석연료산업의 성장(fossil innovation) 등으로 결정할 수 있으며 정부도 이러한 기업의 대응을 미리 고려한 정책을 수립할 수 있다.

마지막으로 우리 모형은 산업 간의 투입·산출 관계(input output linkage)를 고려하고 있지는 않다. 많은 기존의 연구에서 주장하고 있듯이 이렇게 투입·산출구조하에서는 작은 정책 변화도 일반균형효과에 의한 중간재 가격 변화를 통해서 커다란 효과로 이어질 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 투입·산출 구조를 포함하는 것은 우리 분석결과의 방향을 정성적으로 바꾸지는 않더라도 정량적으로 정책효과를 변화시킬 수는 있다는 점을 유의할 필요가 있다.

[References]

김용건·강성원·서영·이황랑·양유경,『온실가스 감축정책 평가를 위한 환경경제모형 개발 운용』, 사업보고서 2014-06, 한국환경정책·평가연구원, 2014.

문진영·오수현·박영석·이성희·김은미,『국제사회의 온실가스 감축 목표 상향과 한국의 대응방안』, 연구보고서, 대외경제정책연구원, 2020.

문진영·한민수·송지혜·김은미,『온실가스 감축을 위한 국제사회의 탄소 가격제 도입과 경제영향 분석』, 연구보고서 17-31, 대외경제정책연구원, 2017.

서정민 · 김영귀 · 박지현 · 김정곤 · 금혜윤,『포스트교토체제하에서 한국의 대응전략: 탄소 배출권 시장의 국제적 연계를 중심으로』, 연구보고서 10-03, 대외경제정책연구원, 2010.

오경수, 김창훈,『온실가스 감축정책이 산업부문 무역에 미치는 영향의 업종별 분석』, 기본연구보고서 14-12, 에너지경제연구원, 2014.

오경수,『신기후협약하에서의 선진국 국경탄소조치의 파급효과에 관한 연구』, 기본연구보고서 15-13, 에너지경제연구원, 2015.

전병목 · 성명재 · 전영준,『탄소세와 에너지과세의 조화방안』, 연구보고서 12-06, 한국조세연구원, 2012.

Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztynand, and D. Hemous, "The Environment and Directed Technical Change," *American Economic Review*, Vol. 102, No. 1, 2012, pp. 131~166.

Adao, R., A. Costinot, and D. Donaldson, "Nonparametric Counterfactual Predictions in Neoclassical Models of International Trade," *American Economic Review*, Vol. 107, No. 3, 2017, pp. 633~689.

Aguiar, A., B. Narayanan, and R. McDougall, "An Overview of the GTAP 9.0 Data Base," *Journal of Global Economic Analysis*, Vol. 1, No. 1, 2016, pp. 181~208.

Allen, T., C. Arkolakis, and Y. Takahashi, "Universal Gravity," *Journal of Political Economy*, Vol. 128, No. 2, 2020, pp. 393~433.

Alvarez, F., and R. E. Lucas, "General Equilibrium Analysis of the Eaton-Kortum Model of International Trade," *Journal of Monetary Economics*, Vol. 54, 2007, pp. 1726~1768

Antras, P., and D. Chor, *On the Measurement of Upstreamness and Downstreamness in Global Value Chains*, In World Trade Evolution: Growth, Productivity and Employment, edited by L. Y. Ing and M. Yu, Routledge, 2018.

Arkolakis, C., A. Costinot, and A. Rodríguez-Clare, "New Trade Models, Same Old Gains," *American Economic Review*, Vol. 102, No. 1, 2012, pp. 94~130.

Babiker, M. H., and T. F. Rutherford, "The Economic Effects of Border Measures in Subglobal Climate Agreements," *The Energy Journal*, Vol. 26, No. 4, 2005, pp. 101~126.

Caliendo, L., and F. Parro, "Estimates of the Trade and Welfare Effects of NAFTA," *Review of Economic Studies*, Vol. 82, 2015, pp. 1~44.

Costinot, A., and A. Rodríguez-Clare, "Trade Theory with Numbers: Quantifying the Consequences of Globalization," *In Handbook of International Economics*, Vol. 4, edited by

G. Gopinath, E. Helpman, and K. Rogoff, 2014.

Dekle, R., J. Eaton, and S. Kortum, "Global Rebalancing with Gravity: Measuring the Burden of Adjustment," *IMF Staff Papers*, Vol. 55, No. 3, 2008, pp. 511~540.

Eaton, J., and S. Kortum, "Technology, Geography, and Trade," *Econometrica*, Vol. 70, No. 5, 2002, pp. 1741~1779.

Eaton, J., S. Kortum, B. Neiman, and J. Romalis, "Trade and the Global Recession," *American Economic Review*, Vol. 106, No. 11, 2016, pp. 3401~3438.

Elliot, J., I. Foster, S. Kortum, T. Munson, F. P. Cervantes, and D. Weisbach, "Trade and Carbon Taxes," *American Economic Review: Paper & Proceedings*, Vol. 100, 2010, pp. 465~469.

Feenstra, R. C., R. Inklaar, and M. P. Timmer, "The Next Generation of the Penn World Table," *American Economic Review*, Vol. 105, No. 10, 2015, pp. 3150~3182, available for download at www.ggdc.net/pwt.

Fried, S., "Climate Policy and Innovation: a Quantitative Macroeconomic Analysis," *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol. 10, No. 1, 2018, pp. 90~118.

Hertel, T. W., R. A. McDougall, B. Narayanan, and A. Aguiar, *Behavioral Parameters*, In Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 8 Data Base, edited by B. G. Narayanan, A. H. Aguiar, and R. A. McDougall. West Lafayette, IN: Purdue University Center for Global Trade Analysis, 2012.

Interagency Working Group on the Social Cost of Greenhouse Gases, *Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866*, (September 2016 Revision) Washington, DC: Interagency Working Group on the Social Cost of Carbon, 2016.

Jones, C. I., "Intermediate Goods and Weak Links in the Theory of Economic Development," *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol. 3, No. 2, 2011, pp. 1~28.

Kortum, S., and D. A. Weisbach, *Optimal Unilateral Carbon Policy*, Working Paper, 2020.

Lemoine, D., *Innovation-led Transitions in Energy Supply*, NBER Working Paper, 2020.

Nordhaus, W., "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change," *Journal of Economic Literature*, Vol. 45, No. 3, 2007, pp. 686~702.

Nordhaus, W., "Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy," *American Economic Review*, Vol. 105, No. 4, 2015, pp. 1339~1370.

OECD, *Effective Carbon Rates: Pricing CO_2 through Taxes and Emissions Trading Systems*, OECD Publishing, Paris, 2016.

Ossa, R., *Quantitative Models of Commercial Policy*, In Handbook of Commercial Policy, edited by K. Bagwell and R. Staiger, 2016.

Ossa, R., "Trade Wars and Trade Talks with Data," *American Economic Review*, Vol. 104, No. 12, 2014, pp. 4104~4146.

Ravikumar, B., A. M. Santacreu, and M. Sposi, "Capital Accumulation and Dynamic Gain from Trade," *Journal of International Economics*, Vol. 119, 2019, pp. 93~110.

Shapiro, J. S. "Trade Costs, CO_2, and the Environment," *American Economic Journal: Economic Policy*, Vol. 8, No. 4, 2016, pp. 220~254.

[부록]

〈부록 표 1〉 2011년 데이터를 활용한 탄소세 정책 강화의 영향

(단위: %)

	탄소세 변화	적용 범위 변화	중국	EU	일본	한국	미국	RoW
국내CO_2	30EURO 상승	10%p 상승	-3.2	-6.5	-5.2	-3.4	-3.5	-9.1
	60EURO 상승	10%p 상승	-4.6	-9.3	-8.0	-5.5	-6.9	-13.9
	90EURO 상승	10%p 상승	-5.7	-11.3	-10.0	-7.3	-9.6	-17.3
	30EURO 상승	20%p 상승	-5.2	-7.4	-5.8	-4.5	-6.1	-10.9
	60EURO 상승	20%p 상승	-7.1	-10.3	-8.7	-7.1	-10.6	-16.2
	90EURO 상승	20%p 상승	-8.7	-12.4	-10.7	-9.1	-13.9	-19.8
	30EURO 상승	30%p 상승	-6.9	-8.2	-6.4	-5.5	-8.2	-12.5
	60EURO 상승	30%p 상승	-9.1	-11.2	-9.4	-8.4	-13.5	-18.1
	90EURO 상승	30%p 상승	-11.0	-13.4	-11.4	-10.6	-17.0	-21.9
국내생산	30EURO 상승	10%p 상승	-2.0	-3.9	-2.6	-1.7	-1.3	-5.7
	60EURO 상승	10%p 상승	-3.1	-5.9	-4.4	-3.0	-3.2	-9.7
	90EURO 상승	10%p 상승	-4.1	-7.5	-5.9	-4.2	-4.8	-12.8
	30EURO 상승	20%p 상승	-3.7	-4.5	-2.9	-2.4	-2.7	-7.2
	60EURO 상승	20%p 상승	-5.3	-6.7	-4.9	-4.1	-5.4	-11.8
	90EURO 상승	20%p 상승	-6.8	-8.4	-6.5	-5.5	-7.5	-15.2
	30EURO 상승	30%p 상승	-5.1	-5.1	-3.3	-3.0	-3.9	-8.5
	60EURO 상승	30%p 상승	-7.2	-7.4	-5.4	-5.0	-7.2	-13.5
	90EURO 상승	30%p 상승	-9.1	-9.3	-7.0	-6.6	-9.6	-17.2
후생	30EURO 상승	10%p 상승	-0.4	-0.9	-0.8	-0.9	-0.4	-1.6
	60EURO 상승	10%p 상승	-0.5	-1.3	-1.2	-1.4	-0.9	-2.5
	90EURO 상승	10%p 상승	-0.7	-1.7	-1.6	-1.8	-1.3	-3.2
	30EURO 상승	20%p 상승	-0.6	-1.1	-0.9	-1.2	-0.8	-1.9
	60EURO 상승	20%p 상승	-0.8	-1.5	-1.4	-1.8	-1.5	-3.0
	90EURO 상승	20%p 상승	-1.1	-1.9	-1.8	-2.3	-2.0	-3.7
	30EURO 상승	30%p 상승	-0.8	-1.2	-1.0	-1.4	-1.1	-2.2
	60EURO 상승	30%p 상승	-1.1	-1.7	-1.5	-2.1	-1.9	-3.3
	90EURO 상승	30%p 상승	-1.4	-2.0	-1.9	-2.7	-2.5	-4.1

〈부록 표 1〉 2011년 데이터를 활용한 탄소세 정책 강화의 영향 (계속)

(단위: %)

	탄소세 변화	적용 범위 변화	중국	EU	일본	한국	미국	RoW
세계CO_2	30EURO 상승	10%p 상승	-0.5	0.4	0.5	0.4	0.1	-2.4
	60EURO 상승	10%p 상승	-0.7	0.7	0.9	0.7	0.2	-3.6
	90EURO 상승	10%p 상승	-0.9	0.9	1.1	0.9	0.3	-4.4
	30EURO 상승	20%p 상승	-0.8	0.5	0.6	0.5	0.2	-2.8
	60EURO 상승	20%p 상승	-1.1	0.8	1.0	0.9	0.3	-4.1
	90EURO 상승	20%p 상승	-1.3	1.0	1.2	1.1	0.5	-5.0
	30EURO 상승	30%p 상승	-1.0	0.6	0.7	0.7	0.2	-3.2
	60EURO 상승	30%p 상승	-1.4	0.9	1.0	1.0	0.4	-4.6
	90EURO 상승	30%p 상승	-1.7	1.1	1.3	1.3	0.6	-5.5
세계생산	30EURO 상승	10%p 상승	-0.2	-0.1	0.2	0.3	0.1	-0.9
	60EURO 상승	10%p 상승	-0.3	-0.2	0.4	0.5	0.1	-1.5
	90EURO 상승	10%p 상승	-0.4	-0.3	0.5	0.7	0.2	-1.9
	30EURO 상승	20%p 상승	-0.4	-0.2	0.2	0.4	0.1	-1.1
	60EURO 상승	20%p 상승	-0.5	-0.3	0.4	0.6	0.2	-1.8
	90EURO 상승	20%p 상승	-0.7	-0.4	0.5	0.9	0.2	-2.2
	30EURO 상승	30%p 상승	-0.5	-0.2	0.3	0.5	0.1	-1.3
	60EURO 상승	30%p 상승	-0.7	-0.3	0.4	0.8	0.2	-2.0
	90EURO 상승	30%p 상승	-0.9	-0.4	0.6	1.1	0.3	-2.5

자료: 저자 작성.

〈부록 표 2〉 탄소 배출의 산업생산에 대한 탄력성 파라미터 추정치

산업	중국	EU	일본	한국	미국	RoW
rice	7.68E-05	8.19E-05	7.04E-06	1.96E-05	0.00019789	2.83E-05
wheat	8.24E-05	0.00021805	2.34E-05	0.000242	0.00029413	0.00013284
other cereal grains	7.66E-05	0.00024411	6.69E-06	0.0001371	0.00021323	0.00011087
vegetables, etc	8.36E-05	7.36E-05	2.12E-05	6.52E-05	0.00016371	6.21E-05
wool, etc	4.84E-05	0.00011175	4.72E-06	1.85E-05	5.03E-05	6.91E-05
sugar	0.00015887	5.82E-05	0.00012111	7.72E-05	0.00042524	6.39E-05
plant-based fibers	9.38E-05	0.00014428	5.10E-05	0.00014647	0.00013232	0.00013488
other crops	4.49E-05	0.0001692	4.00E-05	0.00021571	0.00013913	8.24E-05
bovine cattle, etc	2.47E-05	5.92E-05	2.16E-06	8.78E-06	5.34E-05	5.58E-05
other animal products	2.43E-05	6.13E-05	2.98E-06	7.98E-06	0.00011534	4.59E-05
dairy	0.0002738	2.30E-05	3.33E-05	5.10E-05	5.32E-05	4.74E-05
oil seeds	9.49E-05	0.0002242	3.50E-05	3.42E-05	0.00010354	9.38E-05
forestry	0.00018136	7.40E-05	2.38E-05	3.82E-05	5.12E-05	0.00016519
bovine meat products	2.76E-05	1.21E-05	6.14E-06	1.93E-05	3.69E-05	2.25E-05
other meat products	1.83E-05	1.68E-05	2.31E-06	5.64E-06	1.99E-05	2.16E-05
vegetable oils, etc	5.17E-05	3.75E-05	2.34E-05	1.72E-05	0.00018211	4.30E-05
other food products	4.44E-05	3.84E-05	4.53E-05	1.47E-05	7.81E-05	4.55E-05
beverages, etc	9.36E-05	2.56E-05	1.35E-05	1.89E-05	4.82E-05	5.84E-05
textiles	4.09E-05	2.19E-05	0.00020154	4.07E-05	1.64E-05	5.66E-05
wearing apparel	1.72E-05	8.41E-06	3.86E-05	1.47E-05	1.12E-05	2.14E-05
leather products	2.57E-05	1.03E-05	6.10E-05	2.78E-05	9.05E-06	3.19E-05
wood products	6.26E-05	1.23E-05	2.28E-05	2.41E-05	1.69E-05	4.27E-05
paper products	0.00011508	4.92E-05	8.60E-05	3.14E-05	9.33E-05	0.00016223
chemical products, etc	0.00019186	8.71E-05	0.00011261	7.19E-05	0.00011391	0.00023302

〈부록 표 2〉 탄소 배출의 산업생산에 대한 탄력성 파라미터 추정치 (계속)

산업	중국	EU	일본	한국	미국	RoW
other mineral products	0.00075572	0.00023869	0.00038385	0.00032434	0.00034504	0.00097556
ferrous metals	0.00038185	0.00012386	9.11E-05	0.00013232	0.00019182	0.00069172
other metals	8.75E-05	3.73E-05	2.67E-05	1.90E-05	5.74E-05	0.00011322
metal products	3.56E-05	1.04E-05	1.98E-05	1.11E-05	3.21E-05	6.80E-05
motor vehicle, etc	1.28E-05	5.53E-06	3.34E-06	1.01E-05	1.27E-05	1.37E-05
other transport equipment	2.61E-05	6.97E-06	2.57E-06	2.12E-05	1.18E-05	2.16E-05
electronic equipment	5.45E-06	8.04E-06	7.92E-06	5.28E-06	1.50E-05	2.12E-05
other machinery, etc	1.62E-05	6.61E-06	6.05E-06	5.51E-06	1.47E-05	3.47E-05
other manufactures	1.59E-05	2.79E-06	5.56E-06	6.23E-06	1.16E-05	8.91E-05

자료: 저자 작성.