

한국의 기후변화 경제적 비용 추정: 피해비용과 탄소 감축비용을 모두 고려하여*

유 종 현** · 최 요 한*** · 오 진 호****

논문초록

본 연구는 기후변화로 인한 한국의 경제적 비용(기후변화 피해비용 및 탄소 감축 비용)을 정량적으로 추정하였다. 추정 결과, 가장 효율적인 거시경제 및 탄소 감축 정책 도입시 기후변화로 인한 우리나라의 경제적 비용은 503조원(평균, 현재 가치)으로 나타났으며, 이는 주로 기후변화에 따른 사회·경제적 피해(피해비용)에서 기인한다. 반면, 우리나라에서 현재 추진 중인 2030 NDC(국가자발적기여) 목표와 2050 탄소중립 목표의 달성은 저탄소 경제 전환에 따른 탄소 감축비용을 단기간에 급증시켜 결과적으로 경제적 비용이 현저하게 상승하는 것으로 나타났다(각각 1,539조원, 2,517조원, 평균, 현재가치). 다만, 경제적 비용 추정에 영향을 미치는 세 가지 주요 불확실성(장기 인구·경제 전망, 피해함수, 사회적 할인율)을 고려할 때 NDC나 탄소중립과 같은 급진적인 탄소 감축 목표가 경제적 효율성을 충족하는 상황(예를 들어 장기 인구·경제의 저성장, 극단적인 기후재난의 발생, 낮은 사회적 할인율 등)을 배제할 수 없다. 이러한 결과는 불확실성을 감소시키기 위한 노력(기후변화 연구 활성화 등)이 최적 기후 정책의 수립에 중요함을 시사하는 동시에 향후 불확실성 하에서의 최적 기후 정책에 대한 심도있는 논의가 필요함을 역설한다. 이 분석은 거시경제학을 기반으로 한 대표적 기후-경제 통합평가모형인 RICE 모형을 활용하여 수행되었다.

핵심 주제어: 기후변화의 경제학, 기후변화 피해비용, 탄소 감축비용, 2030 NDC, 2050 탄소중립, 최적 기후정책, 불확실성, 기후경제 통합평가모형

경제학문헌목록 주제분류: Q54, D81, D61, H23

투고 일자: 2024. 2. 21. 심사 및 수정 일자: 2024. 3. 18. 게재 확정 일자: 2024. 5. 3.

* 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00218794).

** 제1저자, 서울시립대학교 도시공학과 부교수, e-mail: jyoo@uos.ac.kr

*** 공동저자, 서울시립대학교 도시공학과 박사과정, e-mail: yohan0711@uos.ac.kr

**** 공동저자, 국립한밭대학교 수리과학과 부교수, e-mail: jhoh75@hanbat.ac.kr

I. 서론

최근 기후변화로 인해 전 세계적으로 극한 기후 및 자연재해의 발생 빈도와 강도가 증가하고, 해수면이 빠르게 상승하고 있다. 경제학자들은 실증 분석을 통해 기후변화가 농업생산성(Mendelsohn et al., 1994; Deschenes and Greenstone, 2007)과 노동생산성(Graff Zivin and Neidell, 2014)을 저하시키고, 보건비용(Patz et al., 2005)과 정치적 불안정성(Hsiang et al., 2011)을 증가시키며, 부동산(Bernstein et al., 2019)을 비롯한 금융부문의 안정성(NGFS, 2023)에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측하고 있다. 거시경제적 관점에서도 기후변화는 일시적인 피해 뿐 아니라 장기적인 경제 성장에 부정적 영향을 미칠 것으로 분석된다(Dell et al., 2012; Burke et al., 2015; Kahn et al., 2021).

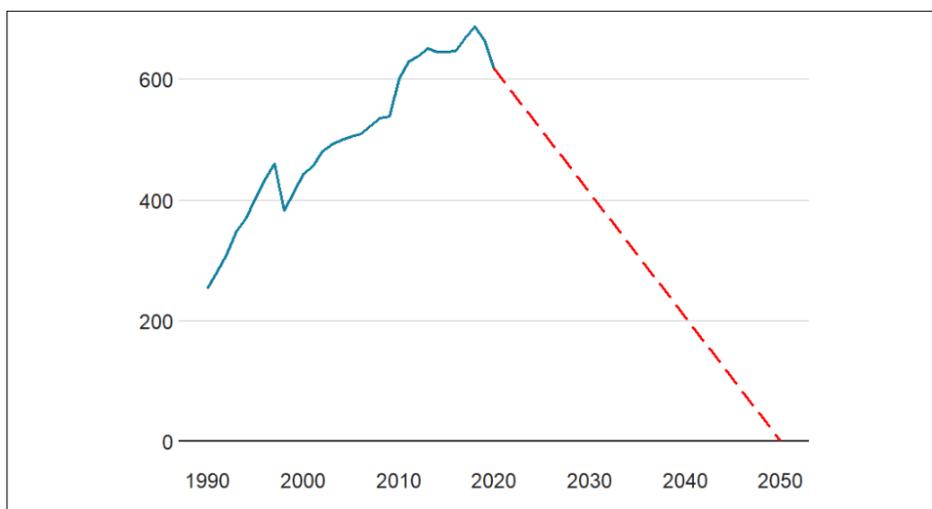
이러한 상황에서, 각국 정부와 국제기구들은 기후변화를 경제적 위협 요소로 인식하고 다양한 기후목표를 설정하고 있다(World Bank, 2010; IMF, 2019; CRS, 2022; ECB, 2023). 대표적으로는 파리협약, 2030 NDC(국가자발적기여), 탄소중립 목표 등이 있는데, 파리협약은 전 세계적인 온실가스 감축 협력을 통해 전 지구 평균 온도 상승폭을 산업혁명 이전 대비 2.0°C(또는 1.5°C)로 제한하는 것을 목표로 하며, 2030 NDC는 국가별 탄소 감축 노력의 규모와 시기(2030년)를 구체적으로 설정한다. 더 나아가, 탄소중립은 2050년 전후로 개별 국가의 온실가스 배출(순 배출)이 전혀 없는 것을 목표로한다. 우리나라도 최근 2030년 NDC 목표의 상향조정(2018년 배출량 대비 40% 감축) 및 2050년 탄소중립 달성을 선언하고, 이를 위한 실천계획을 수립하고 있다.

다만, 경제학의 관점에서 이러한 탄소 감축 목표가 과연 효율적(efficient)인지에 대해서는 심도있는 고찰이 필요하다(Nordhaus, 2019). 기후변화와 관련한 경제적 비용은 크게 기후변화 피해비용과 탄소 감축비용으로 구분할 수 있다.¹⁾ 앞서 소개하였듯이 기후변화가 초래하는 다양한 경제부문 혹은 거시경제의 영향은 피해비용이라 할 수 있으며, 이에 대처하기 위해 각국 정부가 추진하는 파리협약, NDC, 탄소중립과 같은 탄소 감축 목표 추진에 따른 비용(탄소세 부과, 생산비용 증가 등)은 감축비용이라 할 수 있다. 경제학적인 관점에서 효율적인 기후목표는 상기 두 비용

1) 금융부문에서는 피해비용을 물리적 리스크(physical risks), 감축비용을 이행(또는 전환) 리스크(transition risks)로 지칭하기도 한다.

(피해비용과 감축비용)의 합을 최소화한다고 정의할 수 있는데, 탄소 감축 정책은 감축비용을 초래하는 대신 그보다 큰 편익(피해비용의 저감)을 발생시킴으로써 효율성을 달성할 수 있다. 다만, NDC 또는 탄소중립과 같이 급진적인 탄소 감축 목표는 단기적으로 대규모의 감축비용을 발생시켜 비용이 편익을 크게 상회하는, 비효율성을 초래할 가능성이 있다. 우리나라의 온실가스 순배출량 추이를 나타내고 있는 <Figure 1>에서 나타나듯이, 우리나라는 2020년 기준 과거 30년간 OECD 국가 중 가장 빠른 수준으로 온실가스 배출량을 증가시켜왔는데²⁾ 2050년 탄소중립 달성을 위해서는 향후 30년간 이보다 더 빠른 속도로 온실가스 감축이 필요하다. 이는 탄소중립 목표 달성을 위해 현저한 탄소 감축비용이 발생될 수 밖에 없음을 시사한다.

<Figure 1> Annual Greenhouse Gas Emissions in Korea (Unit: MtCO_{2eq})



Note: The emissions from 1990 to 2020 represent the observed net emissions, and the emissions from 2021 to 2050 are projected as a straight line to align with Korea's net-zero goal by 2050.

Source: Greenhouse Gas Inventory and Research Center (2023).

그렇다면, 비효율적일 것으로 예측되에도 불구하고 급진적인 탄소 감축 목표를 추구하는 이유는 무엇인가? 한 가지 주요한 이유는 경제적 비용(피해비용 및 감축비

2) 지난 30년간(1990-2020년) 우리나라의 온실가스 배출량은 튀르키예, 칠레 등과 함께 OECD 국가 중 가장 빠른 수준으로 증가하였다(OECD, 2023).

용)에 대한 불확실성이라 할 수 있다. 일반적인 경제적 비용과는 달리 탄소 배출로 인한 피해비용은 100여년 이상의 이산화탄소의 수명을 충분히 반영하기 위해 초장기(향후 100년 이상)에 걸쳐 발생하는 비용을 포괄하며, 이와 같은 초장기적인 비용 추정에는 필연적으로 불확실성이 동반된다. 따라서, 불확실한 경제적 비용 추정치를 기반으로 효율적 기후목표를 주장하는 데는 한계가 있으며, 반대로 비효율적인 기후목표의 비효율성 규모를 추정하는데도 어려움이 따른다(Pindyck, 2017; Stern and Stiglitz, 2021).³⁾ 또한, 향후 기후변화로 인해 돌이킬 수 없는(irreversible) 극단적인 상황의 발생 가능성은, 비록 비효율적이더라도 단기적인 편익(극단적인 기후피해의 저감)을 추구하기 위한 탄소중립과 같은 기후목표의 수립을 정당화한다(Weitzman, 2009). 결과적으로, 현재 국제사회에서는 급진적인 탄소 감축목표로 인한 대규모 감축비용의 가능성에도 불구하고 피해비용 저감에 초점을 맞추고 있으며, 이에 따른 결과가 2030 NDC와 탄소중립 목표라 할 수 있다.

이러한 배경에서 본 연구는 기후변화로 인한 두 측면의 경제적 비용(피해비용 및 감축비용)을 추정하였다. 다만 앞서 주지하듯이 경제적 비용 추정에 있어 불확실성 문제는 매우 중대한 요인이므로, 선행연구에서 주요 불확실성 요소로 강조하는 장기 인구 및 경제 전망, 피해함수, 사회적 할인율 등 세 요소의 불확실성을 명시적으로 고려한 경제적 비용을 추정하였다. 추정된 비용을 기반으로 2030 NDC 및 탄소중립과 같은 현재 우리나라에서 추진 중인 탄소감축 목표의 효율성을 평가하고, 우리나라에서 가장 효율적인 탄소 감축 정책을 도출하여 비교·평가하였다. 동 분석은 거시경제학 이론(최적성장이론)을 기반으로 한 기후-경제 통합평가모형인 RICE(Regional Integrated Climate-Economy) 모형을 사용해 진행되었다.

본 연구는 기후변화에 따른 경제적 비용을 피해비용과 감축비용을 모두 고려해 종합적으로 추정한 데 의의가 있다. 기존 연구는 주로 피해비용(채여라 외, 2017; 권용재 외, 2019; 정국모·황다슬, 2022; 한국환경연구원, 2022; 이지원, 2023) 또는 감축비용(조경화, 2000; 김재윤·전은경, 2021; Kim et al., 2023; 이제훈·조수진, 2024) 추정에 집중한 반면, 본 연구는 두 비용을 동시에 추정하여 탄소 감축목표의 감축비용과 이로 인한 편익(피해비용의 저감)을 비교하였다. 이를 기반으로 본 연구

3) 기후변화 피해비용을 나타내는 탄소의사회적비용(social cost of carbon)이 대표적인 사례인데, 연구자별 결과(추정치)가 매우 상이하며(Havranek et al., 2015), 이에 따라 정책적 활용성에 한계가 존재한다(Stern and Stiglitz, 2021).

는 피해비용과 감축비용의 합을 최소화하는 우리나라의 효율적 탄소감축 경로와 이로 인한 결과(경제적 비용)를 도출하고, 우리나라의 대표적인 탄소감축 정책과 정량적으로 비교·분석하였다. 또한 본 연구는 경제적 비용의 엄밀한 추정을 위해 세 종류의 불확실성을 명시적으로 고려하였으며, 이를 기반으로 경제적 비용을 확률론적으로 산정한 것 역시 기존 연구에서는 찾기 어려운 차별성이라 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 본 연구에 사용된 기후-경제 통합평가모형(RICE 모형)을 소개하고, 본 연구에서 고려한 세 가지의 불확실성 요인(인구 및 GDP 장기전망, 기후변화 피해함수, 사회적 할인율)과 네 가지 정책 시나리오에 대해서 설명한다. 제Ⅲ장에서는 추정 결과를 분석하며, 제Ⅳ장에서는 결과를 정리하고 이에 따른 정책적 시사점을 도출한다.

Ⅱ. 모형 및 분석 방법

1. 기후-경제 통합평가모형

기후변화로 인한 경제적 비용 추정은 2018년 노벨경제학상 수상자인 예일대학교의 William Nordhaus 교수가 개발한 기후-경제 통합평가모형 RICE (Regional Integrated Climate-Economy) 모형을 기반으로 한다(Nordhaus and Yang, 1996). RICE 모형은 기후과학 모형과 거시경제학 모형을 하나로 통합시켜 기후변화와 경제성장간의 상호관계를 동태적으로 통합한 모형이다. 특히 최적성장이론(Ramsey, 1928; Cass, 1965; Koopmans, 1963) 기반의 거시경제학 모형이란 점에서 기후변화 분야에서 보통 사용되는 공학기반의 에너지시스템 모형과 차별화된다.

다만, RICE 모형은 1990년대 이후 최신 버전이 공개되지 않고 있으며, 특히 우리나라가 개별 국가가 아닌 여러 국가와 함께 지역으로 묶여있어 우리나라 대상의 경제적 비용 추정이 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 RICE 모형의 업데이트 버전인 RICE50+ 모형(Gazzotti et al., 2021)을 사용하였다. RICE50+ 모형은 RICE 모형을 기본으로 하되 최신 연구를 반영해 주요 모수 및 함수를 업데이트하였다.⁴⁾ 특히, 10개 국가 및 지역 대상의 모형을 57개 국가 및 지역으로 확장시켰으며, 우리

4) RICE50+ 모형은 아래 주소에서 다운받을 수 있다: <https://github.com/witch-team/RICE50xmodel>

나라는 개별 국가로 구분되어 우리나라 대상의 기후변화 경제적 비용(기후변화 피해비용 및 탄소 감축비용) 추정이 가능하다.⁵⁾

본 연구에서는 RICE50+ 모형을 기반으로, 57개 국가 및 지역의 정책결정자 (social planner)가 각각 자국의 시점간효용(intertemporal utility)을 극대화하기 위하여 자국의 소비($\{c_t\}$)와 탄소 감축규모($\{\mu_t\}$)를 결정하도록 목적함수를 설정하였다.⁶⁾ 주지할 점은 최적성장이론에서 정책결정자는 소비(혹은 저축) 경로만을 결정하는 반면, 동 모형에서는 소비 외에도 탄소 감축 경로를 결정해 가장 효율적으로 기후변화에 대처한다. 각 국가가 당면하는 문제를 식으로 나타내면 아래와 같으며,⁷⁾ 경제모형이 아닌 기후모형(예를 들어 탄소배출(E_t)로 인한 기온 상승($T_t = T(E_t)$)은 여기에서 생략하였다.⁸⁾

$$\max_{\{c_t\}, \{\mu_t\}} \sum_{t=2020}^T L_t \frac{c_t^{(1-\alpha)}}{(1-\alpha)(1+\rho)^{(t-2020)}}$$

$$\text{s. t. } Q_t = A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$$

$$Y_t = Q_t - \Omega_t - D_t$$

$$C_t = Y_t - I_t, C_t \geq 0, C_0 \text{ is given}$$

5) 다만, RICE(혹은 RICE50+) 모형은 산업별(혹은 경제주체별) 경제적 비용을 추정하지 않는다. 산업별 탄소 감축비용은 보통 CGE(Computable General Equilibrium; 연산가능일반균형) 모형을 통해 추정가능하나, CGE 모형은 장기적인 피해비용을 추정하는데 한계가 존재한다.

6) RICE50+ 모형에서 인구 및 경제적인 측면에서의 주요 국가는 개별 국가(총 44개 국가)로 구분되어 있으며, 나머지 군소 국가는 지리적인 근접성을 고려하여 13개 지역으로 묶여 있다. 각 국가의 사회·경제가 기후변화에 미치는 영향, 혹은 반대로 기후변화가 각 국가의 사회·경제에 미치는 영향은 해당 국가의 사회·경제·지리적 특성에 기반하며, RICE50+ 모형의 국가/지역 구분은 이러한 특성을 고려하고 있다. RICE50+ 모형의 국가 및 지역 구분은 Gazzotti et al. (2021)을 참고.

7) 여기에서 지역(국가)을 나타내는 표현은 생략하였으며, 이후에서는 지역을 i 로 표현하였다.

8) 기후모형이 지닌 비선형적 특성으로 인하여 기후-경제 통합평가모형에서는 보통 분석적인 해(analytic solution)를 도출하기 어렵다. 간혹 간단한 구조(선형구조)의 기후모형을 가정하여 분석적인 해를 도출한 연구도 존재하나(e. g. Golosov et al., 2014), 이로 인한 결과의 편향이 상당할 수 있다(Dietz et al., 2021). RICE 모형의 기후모형은 Nordhaus and Yang (1996)을 참고할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 c_t &= \frac{C_t}{L_t}, L_t \text{ is given } \forall t \\
 K_{t+1} &= (1 - \delta)K_t + I_t, K_t \geq 0 \text{ and } K_0 \text{ is given} \\
 E_t &= (1 - \mu_t)\sigma_t Q_t, \mu_t \geq 0 \\
 \Omega_t &= \Omega(\mu_t), \Omega'(\mu_t) \geq 0, \Omega''(\mu_t) \leq 0 \\
 D_t &= D(T_t), D'(T_t) \geq 0, D''(T_t) \leq 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

효용함수로는 일정상대위험회피(Constant Relative Risk Aversion) 효용함수를 사용하며, 해당 연도(t)의 효용을 인구수(L_t)로 가중한다. α 는 소비의 한계효용 탄력성을, ρ 는 시간선호율(pure rate of social time preference)을 의미한다. α 와 ρ 는 기본적으로 모든 국가에 대해 동일($\alpha=1.45$, $\rho=0.015$)하다.

대부분의 변수는 거시경제학에서 일반적으로 사용되는 것과 같다. Q_t, A_t, K_t, L_t, I_t 는 각각 t 연도의 총생산, 총요소생산성, 자본, 인구, 투자를 의미하며, γ, δ 는 각각 자본소득분배율과 자본의 감가상각률을 의미한다. 기후변화를 고려함에 따라 최적성장모형에 추가된 변수는 $\Omega_t, D_t, E_t, \mu_t$ 인데 각각 탄소 감축비용, 기후변화 피해비용, 탄소배출량, 탄소 감축률을 의미한다. 본 모형에서 총소득(Y_t)은 총생산(Q_t)과 같지 않고 총생산에서 두 종류의 경제적 비용인 피해비용(D_t)과 감축비용(Ω_t)을 차감한 것과 같다. 이에 따라 두 종류의 경제적 비용은 최적성장모형의 소비와 저축간 결정에 영향을 미친다. 감축비용(Ω_t)은 탄소 감축률(μ_t)에 의해서 피해비용(D_t)은 탄소배출(E_t)로 인한 기온변화(T_t)에 의해서 결정되는데, 탄소 감축률이 높을수록 감축비용이 증가하고, 탄소배출량 증가에 따른 기온상승은 피해비용을 증가시킨다. 감축비용과 피해비용의 구체적인 함수식은 상기 식에서 생략하였으나, 선행연구를 따라 한계 감축비용과 한계 피해비용 모두 체증하는 볼록 함수 형태로 가정한다.⁹⁾ 탄소 감축을 고려하지 않은 기본적(business-as-usual)인 탄소배출은 경제규모(Q_t)와 비례하며, 경제규모가 커질수록 탄소배출량도 증가한

9) RICE50+ 모형에서 감축비용함수의 경우 다양한 출처(Enerdata, European Commission, IPCC 등)의 자료를 기반으로 복잡한 함수식을 사용하고 있다. 구체적인 함수식은 Gazzotti et al. (2021)을 참고할 수 있다. 피해함수의 경우 다음 절에서 자세하게 설명될 예정인데, 본 연구에서 함수 선택에 따른 불확실성을 고려하기 위해 여러 피해함수를 사용하였다.

다. 다만, 국가 내 산업구조(σ_i)를 고려한다.

솔루션은 내쉬 균형으로 정의된다. 이는, 모형 내 다른 모든 국가들($-i$)의 결정 ($\{c_{t,-i}^*\}, \{\mu_{t,-i}^*\}$)이 주어진 상황에서 각 개별 국가(i)가 최적의 결정 ($\{c_{t,i}^*\}, \{\mu_{t,i}^*\}$)을 내리며, 모든 57개 국가 및 지역이 자신의 결정을 더 이상 바꾸지 않는 균형 상태를 의미한다.¹⁰⁾ 각국의 저축율 및 탄소 감축 결정은 자국의 탄소 배출량을 결정한다. 다만, 개별 국가의 탄소 배출은 전 지구적인 기후변화를 초래하므로, 이는 자국뿐 아니라 모든 국가의 경제에 영향(경제적 비용)을 미친다. 결과적으로 각국의 최적 결정은 다른 국가의 결정에 의존한다.¹¹⁾

2. 정책 시나리오 설정

(1) OPT

OPT 시나리오는 최적 경제성장을 달성하는 시나리오로서, 57개 각 국가의 정책 결정자가 장기적인 시각(forward-looking)에서 기후변화로 인한 경제적 비용(피해비용 + 감축비용)을 최소화하는 최적의 탄소 감축규모와 최적의 소비율(혹은 저축율)을 결정한다. 결과적으로 기후변화에 따른 경제적 비용이 네 가지 정책 시나리오 중 가장 낮다.

(2) BAU

BAU(business-as-usual) 시나리오는 기후변화에 대한 대응이 전혀 이뤄지지 않는 상황을 가정한다. 탄소가 전혀 감축되지 않기 때문에¹²⁾ 탄소배출에 따른 외부효과는 시장에 피해비용으로 나타나며, 각국의 정책결정자는 이러한 피해비용을 반영

10) 솔루션은 수치적(numerical)으로 구하며, 최적화 프로그램인 GAMS(General Algebraic Modeling System)를 사용하였다.

11) 기후변화에 대한 전망은 탄소 감축규모뿐 아니라 저축율 결정에도 영향을 미친다. 예를 들어 타국이 탄소 감축 노력을 감소시켜 향후 전 세계 기후변화가 가속화될 것으로 예측한다면, 자국은 소비평탄화(consumption smoothing)를 위해 저축율을 증가시킨다(Chang and Yoo, 2023).

12) 제약식으로 나타내면, $\mu_{t,i} = 0, \forall t, i$.

해 장기 경제성장을 위한 최적 소비율(혹은 저축율)을 결정한다.¹³⁾

(3) NDC

NDC 시나리오는 파리협약의 결과로 각 국가가 자율적으로 목표한 2030년 국가 자발적기여(Nationally Determined Contribution; NDC)를 달성하는 시나리오다. 우리나라를 포함한 57개 모든 국가 및 지역은 공표한 NDC를 2030년에 달성하는 것으로 가정하였다. 우리나라의 경우 최근 수정·발표한 목표치(2018년 대비 40% 감축)를 반영하였다. 탄소 감축경로는 2020년부터 2030년까지 선형으로 감축하도록 가정하였으며, 2030년 목표 달성 이후는 각 국가가 최적 경제성장 경로를 따른다.¹⁴⁾

다만, 본 연구에서 극단적인 경우를 모두 고려함에 따라 목표(2030 NDC) 달성이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 예를 들어, 향후 인구나 GDP가 급격히 성장하여 대량의 탄소가 단기간에 배출되는 경우, NDC 달성을 위한 탄소 감축비용이 상당한 규모로 발생한다. 만약 이와 함께 기후변화로 인한 피해비용도 현저할 경우, 경제적 총 비용(피해비용+감축비용)이 국가 총생산을 상회하는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 극단적인 상황에서는 2030 NDC 목표를 포기하는 것으로 가정하였다.

(4) NZ

마지막으로 NZ 시나리오는 2050 탄소중립 달성을 가정한다. 현재 100여개가 넘는 국가가 2050년 전후의 탄소중립을 선언하였으며(Net Zero Tracker, 2023), 본 시나리오에서는 모형 내 57개 모든 국가 및 지역이 2050년에 탄소중립(순배출량=0)을 달성하는 것으로 가정하였다.¹⁵⁾ NDC 시나리오와 마찬가지로 탄소 감축경로는

13) 정책 시나리오별 가정은 모든 국가에게 동일하게 적용된다. 예를 들어, BAU 시나리오에서는 모든 국가가 탄소 감축을 하지 않으며, NDC와 NZ 시나리오 하에서는 전 세계 모든 국가가 해당 탄소 감축 목표(2030년 NDC 또는 2050년 탄소중립)를 달성한다. 이에 따라 본 연구에서는 개별 국가의 탄소 감축목표 이탈에 따른 국제사회에서의 차별(기후클럽, 국경조정세 등)은 명시적으로 고려하지 않는다.

14) 제약식으로 나타내면, $\mu_{t,i} = \overline{\mu_{t,i}}$, for $t \leq 2030$, $\forall i$.

15) 실제 국가별 탄소중립 달성 목표시기는 상이하며, 탄소중립 목표를 선언하지 않은 국가도 존

2020년부터 선형으로 가정하였으며, 2050년 탄소중립 달성 이후는 각 국가가 자국의 최적 경제성장 경로를 따른다.¹⁶⁾ NZ 역시 2050년 탄소중립이 실현가능하지 않는 경우(경제적 비용이 국가 총생산을 상회할 경우), 탄소중립 목표를 포기하는 것으로 가정하였다.

3. 불확실성의 고려

(1) 장기 인구·경제 전망

본 연구는 기후변화로 인한 경제적 비용 추정에 영향을 미치는 세 가지 주요 불확실성 요소를 명시적으로 고려하였다.¹⁷⁾ 첫 번째는 장기 인구 및 경제 전망이다. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2017)은 장기 인구 및 경제 전망에 내재된 불확실성을 기후변화의 경제적 비용, 특히 피해비용의 불확실성에 영향을 미치는 주요 요소로 강조하였다. 피해비용은 탄소배출로 인해 발생되며, 탄소배출량은 인구 및 경제 규모에 의존한다. 더욱이, 장기적으로는 탄소배출에 따른 한계 피해비용이 증가하기 때문에, 장기적인 인구 및 경제의 불확실성은 피해비용의 불확실성과 더욱 연관된다. 최근 Rennert et al. (2022)은 확률론적 (probabilistic) 인구 및 경제 전망 자료를 사용하여 이와 관련된 불확실성을 고려한 피해비용을 추정하였는데,¹⁸⁾ 본 연구는 동 방식을 채택하여 장기 인구 및 경제 전망 자료를 확률론적으로 구축하고, 이를 모형에 반영하여 관련 불확실성을 고려하였다.

우리나라 장기 인구 전망의 경우, 급속한 저출산과 같은 우리나라의 최근 인구

재하나, 본 연구에서는 분석의 편의를 위하여 모든 국가가 동일한 시기(2050년)에 탄소중립을 달성하는 것으로 가정하였다.

16) 제약식으로 나타내면, $\mu_{i,t} = \widetilde{\mu}_{i,t}$, for $t \leq 2050$, $\forall i$.

17) 이 외 선행연구에서 고려하는 주요 불확실성 요소로는 기후민감도 모수(Gillingham et al. 2018), 기후모형(Dietz et al., 2021), 탄소감축기술 및 감축비용(Emmerling and Tavoni 2018) 등이 있다.

18) 선행연구에서 장기 인구 및 GDP 시나리오 구축시 일반적으로 사용되는 SSP (Shared Socioeconomic Pathways, 공통사회 경제경로) 시나리오는 확률론적인 시나리오가 아닌 결정론적인 시나리오이며, 이에 따라 동 불확실성을 해결하지 못한다. 예를 들어, 5개 SSP 시나리오는 조건부 시산이며, 시나리오별 확률을 포함하고 있지 않다.

동향을 충분히 고려하기 위하여 해외의 전망 자료를 사용하는 대신 국가 공식 통계를 기반으로 직접 추정하였다.^{19) 20)} 구체적으로, 출산율, 사망률, 국제순이동자수 등 인구변동 3요인별로 각각 예측한 후 예측값에 무작위성 (randomness) 을 부여하는 방식으로 우리나라의 인구를 전망하였으며, 이는 확률론적 인구 전망에 널리 사용되는 방법이다. 이를 위하여 통계청 (2023) 의 1970~2022년 연령별출산율, 사망률, 국제순이동자 자료를 활용하였다. 식 (2) 에서 t 는 연도, x 는 연령이며, $randomness$ 는 $N(0, s^2)$ 따르고, 표준편차 s^2 은 예측값의 표준편차를 의미한다.

$$\begin{cases} \text{출산율} : f_t(x) = f_{t-1}(x) + randomness \\ \text{사망률} : m_t(x) = m_{t-1}(x) + randomness \\ \text{국제순이동} : Net.mi_t(x) = Net.mi_{t-1}(x) + randomness \end{cases} \quad (2)$$

우리나라의 확률론적 장기 경제 전망은 직접 추정하는 대신 Muller, Stock and Watson (2022) (이후 MSW) 및 Rennert et al. (2022) (이후 Rennert) 의 (확률론적) 전망 자료²¹⁾ 를 사용하였다. MSW는 계량적으로 100여 개 국가의 향후 100년간 GDP 전망을 확률론적으로 추정하였으며, Rennert는 전문가 의견을 반영하여 MSW 추정치의 불확실성 범위를 조정하였다. 인구 전망과는 달리 GDP 전망은 직접 추정하지 않고 MSW와 Rennert의 자료를 사용한 이유는 다음과 같다: 첫째, MSW와 Rennert가 전망한 우리나라의 장기 경제 전망은 우리나라 공식 장기 경제 전망 자료인 한국개발연구원 (2022), 국회예산정책처 (2022) 자료와 매우 유사한 경로를 보인다. 둘째, MSW에서 보이듯이, 타 국가의 경제 성장을 고려하지 않고 개별 국가의 성장 경로가 독립되었다고 가정하기 어렵다. 본 연구에서는 궁극적으로 우리나라뿐 아니라 모든 국가의 확률론적 GDP 성장 경로가 필요하므로 100여개 국가의 상호의존성을 고려해 구축한 MSW 및 Rennert의 전망치를 사용하는 것이

19) Rennert et al. (2022) 는 우리나라에 대한 확률론적 인구 전망 자료를 제공하고 있으나, 연구진이 통계청 (2023) 자료를 활용해 직접 추정한 인구 전망에 비해 대체적으로 높은 인구를 제시하고 있다. 예를 들어, 2100년 기준 Rennert et al. (2022) 의 25%, 50%, 75% 분위 인구 전망은 23백만, 27백만, 31백만인 반면, 연구진의 추정 결과에서는 20백만, 22백만, 24백만으로 전망되었다.

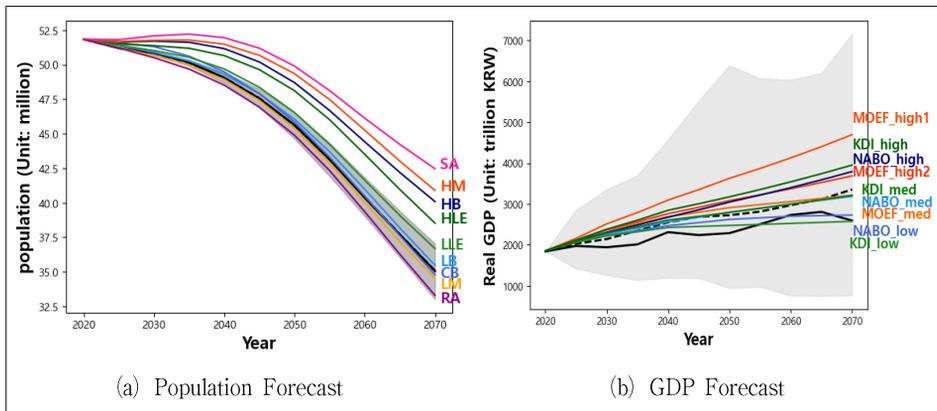
20) 동 자료는 아래 주소에서 이용가능하다: <https://www.climateconlab.com>

21) 동 자료는 아래 주소에서 이용가능하다: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6932028>

더 적절하다고 판단하였다.

우리나라 외 56개 국가 및 지역의 확률론적 장기 인구 및 GDP 전망 시나리오는 Rennert의 전망 자료를 사용하였다. 결과적으로 본 연구에서는 RICE50+ 모형의 국가 및 지역 구분에 따라 57개 국가 및 지역의 인구 및 GDP 장기 전망 자료를 확률론적으로 구축하였다. 모형에서는 2300년까지의 전망 자료를 사용하였으며, 시물레이션에 소요되는 시간적 한계를 고려하여 100개 전망을 임의추출하여 사용하였다.

〈Figure 2〉 Probabilistic Population and GDP Forecasts for Korea Used in this Research and Comparison with Government’s Official Projections



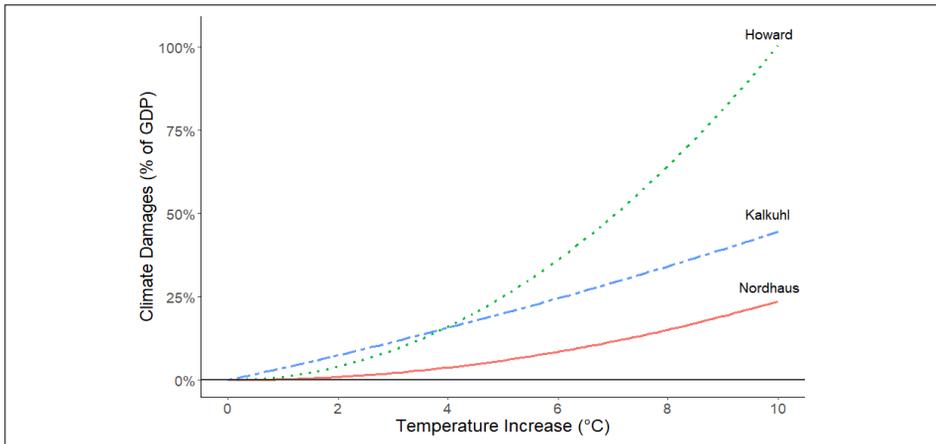
Note: This figure displays 100 randomly sampled forecasts, with the grey area representing the 5-95% confidence interval. The dotted black line represents the mean value of the forecasts, while the solid black line indicates the median value. In (a), the population forecasts are compared with projections from Statistics Korea (2021): SA (Slow Aging), RA (Rapid Aging), LM (Low Net International Migration), HM (High Net International Migration), LB (Low Birthrate), HB (High Birthrate), CB (Current Birthrate), HLE (High Life Expectancy), LLE (Low Life Expectancy). In (b), the GDP forecasts, based on 2005 prices, are compared with projections from the Ministry of Economy and Finance (2020), Korea Development Institute (2022), and National Assembly Budget Office (2022): MOEF_high1 (high economic growth scenario of MOEF), MOEF_high2 (high population growth scenario of MOEF), MOEF_med (medium economic growth scenario of MOEF), NABO_low (low economic growth scenario of NABO), NABO_med (medium economic growth scenario of NABO), NABO_high (high economic growth scenario of NABO), KDI_low (low economic growth scenario of KDI), KDI_med (medium economic growth scenario of KDI), KDI_high (high economic growth scenario of KDI).

Source: Statistics Korea (2021), Ministry of Economy and Finance (2020), Korea Development Institute (2022), National Assembly Budget Office (2022).

(2) 기후변화 피해함수

RICE 모형과 같은 기후-경제 통합평가모형은 기후변화에 따른 사회·경제적 피해(피해비용)를 소위 피해함수($D(T_t)$)라 불리는 축약형 방정식을 통해 모형화한다. 이 피해함수는 실증분석의 추정치를 기반으로 하는데, 실증연구마다 추정치가 다양하므로 피해함수 역시 다양한 형태로 나타나며, 어떤 피해함수를 가정하느냐에 따라 모형의 결과가 민감하게 반응한다. 본 연구는 이에 따른 불확실성을 고려하기 위해, 학계에서 널리 사용되는 세 가지 피해함수를 고려하였다. 첫 번째는 Nordhaus 교수가 RICE 모형에 사용하는 이차함수 형태의 피해함수이다. 이는 기온 상승과 경제적 피해를 실증분석한 여러 연구 결과를 메타분석을 통해 통합·구축한 것이다(Tol, 2009; Nordhaus and Moffat, 2018). 두 번째는 Howard and Sterner (2018)의 피해함수로, Nordhaus 교수의 피해함수와는 달리 극단적인 피해비용의 가능성을 명시적으로 고려하고 있다. 마지막으로, Kalkuhl and Wenz (2020)의 피해함수를 고려하였는데, 이는 기후변화가 생산량뿐 아니라 생산성에 미치는 영향을 추정하여 장기적인 경제성장과의 관계를 나타낸 것이다.²²⁾

(Figure 3) Climate Damage Functions Used in This Research



Note: Climate damages are represented as a percentage of GDP. The damage function by Kalkuhl and Wenz (2020) varies by regional climate or economic states, making it complex to depict in a single plot. The figure presented here is for informational purposes only.

22) 이 외에도 학계에서 널리 인용되나 본 연구에서는 고려하지 않은 피해함수로는 Dell et al. (2012), Burke et al. (2015) 등이 있다.

(3) 사회적 할인율

기후 경제학 분야에서 사회적 할인율은 Stern (2007) 이래로 여전히 논쟁적인 주제로 남아있다(Nordhaus, 2007; Weitzman, 2007; Arrow et al., 2014). 이는 향후 수십 년에서 수백 년까지의 경제적 비용을 고려해야 하는 특성상, 할인율 선택에 따라 비용 추정치가 민감하기 때문이다. 따라서, 선행연구에서는 다양한 할인율을 사용하여 비용을 추정하는 방식으로 할인율 선택에 따른 불확실성을 제한적으로 고려하고 있다(IWG, 2021).

〈Table 1〉 Social Discount Rate Used in This Research

Quantile	Elasticity of Marginal Utility of Consumption (α)	Pure Rate of Social Time Preference (ρ)	Social Discount Rate
50% (Default Value of the RICE Model)	1.45	0.015	3.4%/year (2020-2050 average) 4.3%/year (2050-2100 average)
25%	2	0.00001	2.8%/year (2020-2050 average) 4.0%/year (2050-2100 average)
75%	1	0.03	4.3%/year (2020-2050 average) 4.9%/year (2050-2100 average)

Note: The social discount rates in the last column are specific to Korea and represent the average of all simulations. The default parameters from the RICE model have been employed for the 50% quantile value, as this is akin to the median value of the constructed joint probability distribution.

본 연구에서는 할인율을 임의로 선택해 사용하는 대신, 확률론적으로 사회적 할인율의 불확실성을 고려하였다. 이를 위해 185명의 경제학자를 대상으로 적절한 소비의 한계효용 탄력성(α)과 시간선호율(ρ)에 대한 설문조사를 수행한 Drupp et al. (2018)의 결과를 활용하였다. 구체적으로, 소비의 한계효용 탄력성(α)과 시간선호율(ρ)에 대한 185개의 답변을 기반으로 결합확률분포(joint probability distribution)를 추정하였으며, 이를 통해 할인율별 확률을 추출하였다. 다만, 시뮬레이션에 소요되는 시간 한계상 3개의 조합만을 선택했으며, 설문조사의 답변 수(185개)가 적은 관계로 극단적인 값이 아닌 25%와 75% 분위의 조합을 중위값과

함께 사용하였다. 이렇게 선택된 소비의 한계효용 탄력성(α)과 시간선호율(ρ), 그리고 이에 따라 모형 내에서 내생적으로 결정된 사회적 할인율²³⁾은 <Table 1>과 같다.

(4) 불확실성을 고려한 경제적 비용 추정

본 연구에서는 앞서 설명한 세 가지(장기 인구·경제 전망, 피해함수, 할인율) 요소에 대한 불확실성을 고려하였다. 인구 및 경제 전망은 100개 경로를 추출하고, 3개의 피해함수, 3개의 할인율을 조합하여 정책 시나리오별로 총 900번의 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로 네 가지의 정책 시나리오를 위한 총 시뮬레이션 횟수는 3,600번이다. 모형에서 인구 전망 자료는 식 (1)의 L_t 에 국가별로 입력되며, Q_t 에 GDP 전망이 나타나도록 총요소생산성(A_t)을 비롯한 모형내 모수 값을 동태적으로 조정(calibration) 한다. 피해함수는 $D(T_t)$ 에, 할인율은 이를 나타내는 소비의 한계효용 탄력성(α)과 시간선호율(ρ) 모수에 입력하여 진행하였다. 본문에서 시뮬레이션 결과는 변수별로 평균값과 표준편차로 나타냈으며, 변수별 최적경로의 경우 평균 외에 5-95% 수준을 나타내 불확실성에 따른 결과를 표현하였다. 정량적인 경제적 비용은 2020년부터 2300년까지의 비용을 현재가치화하여 나타냈다.

III. 추정 결과

<Figure 4>는 네 가지 정책 시나리오별 주요 변수의 경로를 나타내고 있다. 세 종류의 불확실성을 고려함에 따라 정책 시나리오별 경로는 확률적으로 나타나며, <Figure 4>에서 평균값(mean)은 점선으로, 5-95% 범위는 음영으로 표현하였다.

가장 흥미로운 결과는 최적 시나리오(OPT) 하에서의 탄소배출 경로²⁴⁾가 탄소 감축이 부재한 BAU 시나리오의 경로와 유사한 반면, NDC 혹은 NZ 시나리오의 경로와는 매우 큰 차이를 보이는 점이다. 이러한 결과는 우리나라에서 제한적인 탄

23) 최적성장이론에서 할인율(이자율)은 다음과 같은 오일러 방정식을 통해 계산할 수 있다:

$$r_t = \frac{\dot{C}_t}{C_t} \alpha + \rho, \text{ 여기서 } r_t \text{가 할인율(이자율).}$$

24) 모형에서의 정책변수인 $\{\mu_t^*\}$ 에 따른 결과다.

소 감축이 경제적인 관점에서 효율적임을 의미한다. 특히, 향후 30년간 OPT의 배출경로는 BAU의 배출경로와 거의 유사한데, 이는 단기적으로 탄소를 거의 감축하지 않는 전략이 효율적일 수 있음을 시사한다. 이와 같은 결과의 주요 원인은 탄소 감축비용 투입에 따른 단기 편익(피해비용 저감)이 상대적으로 작은데 있다. <Figure 4>의 감축비용 경로에서 NDC와 NZ 시나리오의 단기간(2020-2050년) 감축비용은 급증하는 반면, OPT와 BAU 시나리오의 감축비용은 매우 낮다. 그러나 이러한 감축비용의 차이에도 불구하고 네 시나리오의 동기간(2020-2050년) 피해비용은 모두 비슷하다. 즉, 탄소 감축을 적극적으로 하더라도 단기적인 편익은 상대적으로 적으며, 이에 따라 탄소 감축에 대한 유인이 크지 않다.²⁵⁾

이와 같은 단기 감축비용과 편익(피해비용의 저감) 간의 차이는 감축비용함수($\Omega(\mu_t)$) 및 피해함수($D(T_t)$)의 함수형태로 설명할 수 있다. 모형에서 상기 두 함수는 실증분석 결과를 토대로 볼록함수($\Omega''(\mu_t) \geq 0$, $\Omega'(\mu_t) \geq 0$; $D''(T_t) \geq 0$, $D'(T_t) \geq 0$)로 가정하였다. 이는 탄소 감축규모가 커질수록 한계 감축비용이 상승하고, 기온상승이 높을수록 한계 피해비용이 증가함을 의미한다. 적극적인 탄소 감축목표(NDC 또는 NZ 시나리오) 하에서 단기간 내 탄소 감축규모(μ_t)는 최대치로 상승하는데, 이에 따라 한계 감축비용은 급증한다.²⁶⁾ 반면, 탄소 저감에 따른 기온상승 억제 효과는 단기간 내에 제한적이므로 한계 편익은 높지 않다. 결과적으로 NDC 혹은 NZ 시나리오에서 한계 감축비용은 높은 반면 한계 편익이 낮기 때문에 최적 경로와 상이하며, 이는 단기간의 적극적인 탄소 감축이 비효율적임을 의미한다.²⁷⁾

다만, 불확실성을 고려할 때 적극적인 탄소 감축 목표가 효율성을 만족하는 경우를 배제할 수 없다.²⁸⁾ <Figure 4>에서 OPT 시나리오의 하위 5% 배출 경로가

25) 장기적(2050년 이후)으로 NDC 및 NZ 시나리오의 피해비용은 OPT 및 BAU 시나리오의 피해비용에 비해 유의미하게 낮다. 다만, 시점간 효율 극대화에 있어 미래 편익(피해비용 저감)은 할인되며, 특히 수십년 이후에 발생하는 편익의 현재가치는 매우 낮다.

26) <Figure 4>에서 NZ 시나리오의 탄소 감축비용은 2020년-2050년 사이 급격하게 상승하는 점을 확인할 수 있는데, 이는 한계 감축비용이 체증하는 탄소 감축비용 함수를 가정한 결과다.

27) 물론 이는 결과 해석을 위한 설명이며, 본 연구에서 사용하는 동태모형의 최적조건은 '한계 편익=한계 감축비용'이 아니다. 분석적인(analytic) 1계조건을 명시적으로 구할 수는 없으나, 최적조건에서는 한계 편익과 한계 감축비용 외에도 한계 효율, 할인을, 탄소의 감쇠율 등을 고려해야 한다.

NDC의 배출 경로와 매우 유사한데, 이는 낮은 확률로 NDC 목표가 경제학적으로 효율적일수 있음을 의미한다. 앞서 탄소 감축목표의 비효율성이 높은 한계 감축비용과 낮은 한계편익(피해비용의 저감)에서 비롯된 점을 감안하면, 이와는 반대로 한계 감축비용이 상대적으로 낮거나, 혹은 한계 편익(피해비용의 저감)이 상대적으로 높은 경우 NDC 목표와 같은 급진적인 탄소 감축목표가 효율성을 만족시킬 수 있는 상황이 발생된다. 본 연구에서는 세 종류의 불확실성을 고려하였기 때문에, 상기 상황은 다음과 같은 경우(혹은 그 조합)일 것으로 해석된다:

- 1) 장기 인구 및 경제 전망의 불확실성과 관련하여, 향후 인구 또는 경제 수축으로 인해 탄소 배출량이 급감하고, 이에 따라 한계 탄소 감축비용이 작은 경우.
- 2) 피해함수 불확실성과 관련하여, 극단적인 기후 위기의 가능성으로 인해 단기적 한계편익(한계피해비용의 저감)이 큰 경우.
- 3) 사회적 할인율 불확실성과 관련하여, 낮은 할인율에 따라 탄소 감축으로 인한 한계편익의 현재가치가 큰 경우.

결과적으로, 불확실성을 고려할 때 확률이 높진 않으나 NDC 및 탄소중립과 같은 적극적인 탄소 감축 정책이 효율적인 경우를 배제할 수 없다.²⁹⁾

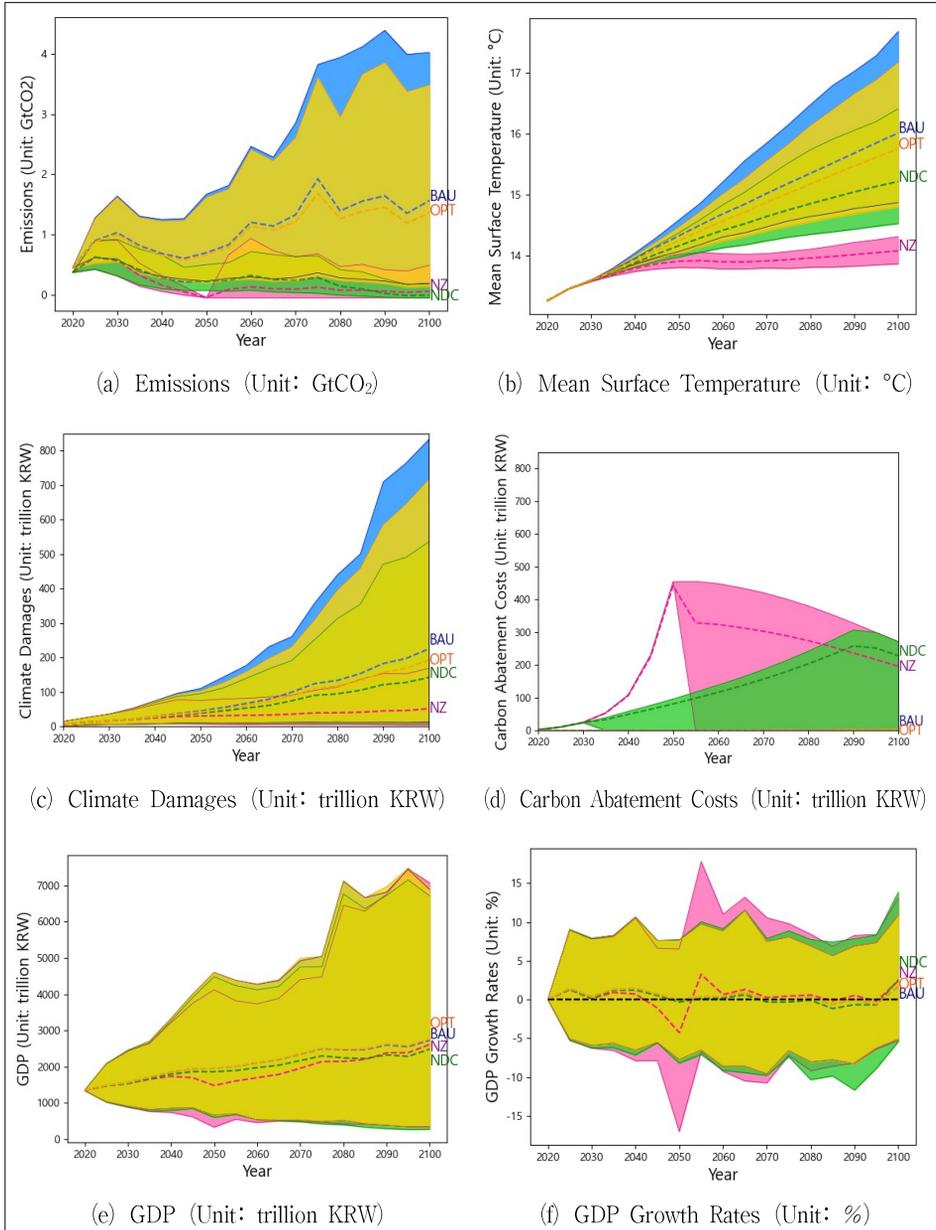
각 정책에 따른 경제적 비용은 거시경제 영향으로 나타난다. 대표적인 거시경제 지표인 GDP 및 GDP 성장률을 살펴보면, 대체적으로(혹은 평균적으로) 최적 경제 성장을 추구하는 OPT 시나리오의 GDP 및 GDP 성장률이 높으며, 적극적인 탄소 감축을 실행하는 NDC 및 NZ 시나리오의 지표가 낮다. 특히 NZ 시나리오 하에서 한계 감축비용이 급격히 상승하는 2050년경에는 마이너스의 경제성장률이 나타날 수 있다(평균값 = -4%, 5-95% 수준 = [-17%, 7%]). 다만, 2050년 이후 평균적으로 네 개 시나리오 중 NZ 시나리오가 가장 높은 경제성장률을 보이는데, 이는 탄소중립 달성으로 기후변화 피해관련 경제적 비용이 상당부분 해소되었기 때문이다.³⁰⁾ 이에 따라 2100년경에는 네 개 시나리오 중 NZ 시나리오의 GDP가 가장 높

28) 물론 제약조건이 있는 NDC 및 NZ 시나리오의 해(solution)와 비교하여 OPT 시나리오의 해는 언제나 더 효율적이다. 본문에서 NDC 해의 '효율성' 만족은 엄밀히 말하면 가장 효율적인 OPT 시나리오의 해와 어느정도의 수준 하에서 근접함을 의미한다.

29) 본 연구에서 고려한 모든 상황에 있어 NDC와 NZ 시나리오의 후생수준이 OPT 하에서의 후생수준의 1% 내로 근접한 경우는 각각 약 9%, 6%이다.

30) 다만, NZ 시나리오에서 2050년 탄소중립 목표를 달성하더라도 2050년 이전에 배출된 온실가스과 이에 따른 기후변화가 지속되기 때문에 2050년 이후에도 기후변화로 인한 피해가 여전히 발생한다.

〈Figure 4〉 Optimal Paths for Major Variables for Korea



Note: Yellow represents the OPT scenario, blue the BAU, green the NDC, and purple the NZ. The shaded area represents the 5-95% range, while the dotted line indicates the mean value. All values depicted are on an annual basis. The values are based on 2005 prices and have been converted to Korean Won using the 2005 exchange rate (1,012 KRW/USD).

은 경우도 발생한다.

만약 탄소 감축비용을 제외하고 기후변화 피해비용만을 대상으로 할 경우, 선행 연구의 우리나라 피해비용 추정치와 비교할 수 있다. 채여라 외(2017)는 기후변화 통합평가모형인 PAGE(Policy Analysis of Greenhouse Effect) 모형을 활용하여 BAU 시나리오 하에서 2100년 기준 우리나라의 기후변화 피해비용을 GDP 대비 5.2%로 추정하였다. 본 연구에서 같은 기준을 적용하면 피해비용은 평균 5.7% (5-95% 수준 = [-2.7%, 10.7%])로 비슷한 수준을 보인다. 권용재 외(2019)는 우리나라 날씨 변수의 총요소생산성에 대한 영향(탄력성)을 추정하고 이를 CGE 모형에 적용하여 2033년까지의 GDP 영향이 약 -1.39%~5.16%인 것으로 전망하였는데, 본 연구의 2035년 피해비용은 GDP 대비 평균 1.0% (5-95% 수준 = [0.6%, 1.7%])으로 이 역시 선행연구의 추정치와 크게 벗어나지 않는다. 지역 별로 기후변화 피해비용을 추정한 이지원(2023)의 경우 지역마다 편차가 있으나 2022~2027년 기준 서울시의 피해비용은 0.75%로, 본 연구의 2025년 추정치인 0.6% (5-95% 수준 = [0.4%, 1.1%])와 비슷한 수준이다.

〈Table 2〉는 장기적(2020~2300년)인 기후변화 경제적 비용(피해비용 + 감축비용)을 현재가치화하여 나타낸 것이다. 네 가지 정책 시나리오 중에서는 가장 효율적으로 기후변화에 대처하는 OPT 시나리오 하에서의 경제적 비용이 평균적으로 가장 낮으며(평균: 503조원), BAU 시나리오의 경제적 비용(평균: 672조원)이 그 다음으로 나타났다. 두 시나리오 모두 경제적 비용의 대부분이 기후변화로 인한 피해(피해비용)에서 비롯된다. 단기적으로 적극적인 탄소감축을 실행하는 NDC와 NZ 시나리오의 경제적 비용은 앞서 두 시나리오의 경제적 비용을 크게 상회하는 것으로 추정되었는데(NDC 평균: 1,539조원, NZ 평균: 2,517조원), 최적 정책(OPT 시나리오) 하에서의 경제적 비용과 비교해보면 약 3배~5배 높은 수준이다. 이에 따라 NDC와 NZ 목표의 경제적 비효율성 규모 역시 상당한 수준으로 추정되었다(NDC 평균 1,035조원, NZ 평균 2,014조원). 이와 같은 NDC 및 NZ 목표의 비효율성은 앞서 언급한 바와 같이 최적 정책(OPT)과 비교해 감축비용이 현저하게 높음에도 불구하고(평균적으로 약 1,100~2,200조원) 피해비용이 소폭 감소하는 것(평균적으로 약 100~200조원)에 기인한다. NDC와 NZ 간에도 비효율성의 규모는 크게 차이난데, 2050년까지 급진적인 탄소감축을 실행하는 NZ 목표의 비효율성 규모가 2030년까지 제한한 NDC의 비효율성에 비해 약 두 배 높은 것으로 추정되었다.

다만, 모든 시나리오에서 경제적 비용의 표준편차는 현저히 높다. OPT와 BAU의 경제적 비용 표준편차는 평균값의 4배 이상이며, NDC와 NZ의 표준편차도 평균값의 2-3배로 나타났다. 이는 선행연구에서 강조한 바와 같이 기후변화에 따른 경제적 영향이 매우 불확실함을 보여주며, 관련 연구에서 불확실성을 고려하는 것이 중요함을 시사한다. 따라서, 적극적인 탄소 감축의 비효율성 역시 불확실하며 (NDC 표준편차 4,147조원, NZ 표준편차 5,582조원), 결과적으로 이러한 탄소 감축 목표가 효율적인 경우를 배제할 수 없음을 의미한다.

(Table 2) Estimates of Economic Impact of Climate Change in Korea Under Different Policy Scenarios (Unit: trillion KRW, present value)

Policy Scenario	Climate Damages	Carbon Abatement Costs	Total Economic Damages	Inefficiency Level
OPT	502 (2,051)	1 (8)	503 (2,059)	n. a.
BAU	672 (2,992)	0 (0)	672 (2,992)	169 (1,023)
NDC	426 (1,275)	1,113 (3,259)	1,539 (4,534)	1,035 (4,147)
NZ	305 (781)	2,212 (4,120)	2,517 (4,901)	2,014 (5,582)

Note: Standard deviations are presented in parentheses. The values are based on 2005 prices and have been converted to Korean Won using the 2005 exchange rate (1,012 KRW/USD). The present value calculations use the social discount rate determined within the model.

IV. 결론 및 시사점

본 연구에서는 우리나라의 기후변화에 따른 두 가지 측면의 경제적 비용(기후변화 피해비용 및 탄소 감축비용)을 정량적으로 추정하고 기후 정책적 시사점을 도출하였다. 특히, 경제적 비용 추정치의 엄밀성을 향상시키기 위하여 동 추정치에 영향을 미치는 세 가지 주요 불확실성 요인(장기 인구·GDP 전망, 피해함수, 사회적 할인율)을 명시적으로 고려하였다. 이를 위해 거시경제학 기반의 기후-경제 통합평가모형인 RICE 모형을 활용하였으며, 네 가지 정책 시나리오(OPT, BAU, NDC, NZ) 하에서의 기후변화로 인한 경제적 비용을 비교·평가하고, NDC, 탄소중립과 같은 탄소 감축 정책의 비효율성 규모를 추정하였다.

추정 결과, 최적의 기후 및 경제성장 정책하에서(OPT 시나리오) 우리나라에는

503조원(현재가치, 평균)의 기후변화 경제적 비용이 발생 가능한 것으로 추정되었다. 만약 탄소배출로 인한 외부효과에 대처하지 않을 경우(BAU 시나리오) 기후변화로 인한 경제적 피해는 더욱 상승하며, 결과적으로 672조원(현재가치, 평균)의 경제적 비용이 발생된다. 반면 기후변화에 적극 대처하는 탄소감축 정책(NDC 및 NZ 시나리오) 하에서의 경제적 비용은 더욱 상승하는데(NDC: 1,539조원, NZ: 2,517조원, 현재가치, 평균), 이는 탄소 감축비용이 단기적으로 현저하게 상승한데 따른 결과이다. 다만, 경제적 비용 추정과 관련된 세 가지 주요 불확실성 요소를 명시적으로 고려할 경우 기후변화로 인한 우리나라의 경제적 비용 추정치의 불확실성은 매우 높으며, 비록 낮은 확률이나 NDC나 탄소중립과 같은 적극적인 탄소 감축정책이 경제학적인 효율성을 만족하는 가능성 역시 존재하는 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 현재의 과학적 지식하에서 기후변화의 경제적 영향이 매우 불확실하며, 이와 같이 불확실한 지식 하에서의 최적 기후 정책에 대한 심도있는 고민이 필요함을 시사한다. 이에 따라 NDC 또는 탄소중립과 같이 장기적이고 단정적인 목표뿐 아니라 단기적이고 유연한 탄소감축 정책 수립이 필요할 것으로 판단된다. 동시에, 기후변화 연구에 대한 많은 투자를 통해 관련 불확실성을 빠른 시일 내에 감소시켜 향후에는 효율적인 정책 실행이 가능한 토대가 마련되어야 할 것이다.

본 연구는 엄밀한 경제적 비용 추정을 위하여 선행연구에서 언급되는 세 가지 불확실성 요인을 명시적으로 고려하였다. 다만, 경제적 비용 추정치에 영향을 미치는 불확실성 요인은 이 외에도 매우 다양하며 이를 고려할 경우 추정치가 달라질 수 있음을 밝힌다. 특히, 감축비용을 결정하는 감축비용함수에 대한 불확실성은 본 연구에 명시적으로 포함되지 않았는데, 이에 대한 고려는 탄소감축 정책시나리오(NDC 및 NZ 시나리오)의 탄소 감축비용 추정치에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 또 다른 불확실성 요소로써 모형 선택에 따른 불확실성이 있는데, 본 연구는 RICE 모형에만 의존하여 모형 구조의 차이로 발생하는 불확실성은 고려하지 못하였다. 경제적 비용 범위에 있어서도 본 연구는 우리나라의 거시경제적 비용만을 대상으로 하였으나, 향후 산업별 혹은 지역별 영향과 같은 보다 상세한 분석이 수행될 경우 기후정책에 더 많은 시사점을 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

■ 참고 문헌

1. 김재윤 · 전은경, “기후변화 이행리스크와 금융안정,” 『조사통계월보』, 제75권, 제12호, 2021, pp. 16-52.
(Translated in English) Kim, Jae-Yoon, and Eun Gyeong Joen, “Climate Change Transition Risk and Financial Stability,” *Monthly Bulletin*, Vol. 75, No. 12, 2021, pp. 16-52.
2. 국회예산정책처, 『2022-2070년 NABO 장기재정전망』, 2022.
(Translated in English) National Assembly Budget Office, *2022-2070 NABO Long-Term Fiscal Outlook*, 2022.
3. 권용재 · 성한경 · 전봉걸, “기상변화가 총요소생산성과 국내 경제에 미치는 영향에 관한 연구,” 『응용경제』, 제21권, 제1호, 2019, pp. 91-115.
(Translated in English) Kwon, Yongjae, Hankyoung, Seong, and Bong Geul Chun, “Investigating the Effects of Meteorological Change on Total Factor Productivity and the Korean Economy,” *Applied Economy*, Vol. 21, No. 1, 2019, pp. 91-115
4. 기획재정부, 『2020-2060 장기재정전망』, 2020.
(Translated in English) Ministry of Economy and Finance, *2022-2060 Long-Term Fiscal Outlook*, 2020.
5. 온실가스종합정보센터, 『국가 온실가스 인벤토리(1990-2020)』, 2023.
(Translated in English) Greenhouse Gas Inventory and Research Center, *National Inventory Report(1990-2020)*, 2023.
6. 이재훈 · 조수진, “탄소감축 정책의 경제적 영향: 거시계량모형에 기반한 배출권가격 변동 효과 분석,” 『자원 · 환경경제연구』, 제33권, 제1호, 2024, pp. 1-32.
(Translated in English) Lee, Jehoon, and Soojin Jo, “Economic Impacts of Carbon Reduction Policy: Analyzing Emission Permit Price Transmissions Using Macroeconometric Models,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 33, No. 1, 2024, pp. 1-32.
7. 이지원, “국내 기후변화 물리적 리스크의 실물경제 영향 분석,” BOK 경제연구, 제26호, 2023.
(Translated in English) Lee, Jiwon, “Climate Change Impacts on the Domestic Economy in Korea: A Chronic Risk Perspective,” Bank of Korea Economic Research Paper, No. 26, 2023.
8. 정국모 · 황다슬, “통합기후모형을 통한 제주도의 기후변화 피해 비용 추정,” 『경제학연구』, 제70권, 제2호, 2022, pp. 5-36.
(Translated in English) Jung, Kuk-Mo, and Daseul Hwang, “Estimation of Social Cost of Carbon in Jeju Island: An Integrated Assessment Model Approach,” *The Korean Journal of Economic Studies*, Vol. 70, No. 2, 2022, pp. 5-36.
9. 조경화, “온실가스 저감정책과 파급효과: Global CGE 모형에 의한 분석,” 『경제학연구』, 제48권, 제4호, 2000, pp. 323-368.
(Translated in English) Jo, Gyeonghwa, “Greenhouse Gas Mitigation Policy and Spillover Effects: Analysis by Global CGE Model,” *The Korean Journal of Economic Studies*, Vol.

- 48, No. 4, 2000, pp.323-368.
10. 채여라 · 이주형, Chris Hope, “IPCC 신시나리오 체계를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용 분석,” 기본연구보고서, 한국환경연구원, 2017.
(Translated in English) Chae, Yeora, Joohyung Lee, and Chris Hope, “Economic Analysis of Climate Change Damage in Korea Using SSP-RCP Scenario Matrix,” Research Reports, Korea Environment Institute, 2017.
 11. 통계청, 『장래인구추계: 2020-2070년』, 2021.
(Translated in English) Statistics Korea, *Population Projections for Korea (2020-2070)*, 2021.
 12. ———, 『인구동향조사』, 2023.
(Translated in English) Statistics Korea, *Population Census, 2023*.
 13. 한국개발연구원, “KDI 경제전망, 2022 하반기,” 한국개발연구원, 제39권, 제2호, 2022, pp.61-68.
(Translated in English) Korea Development Institute, “KDI Long-Term Economic Outlook, 2022-2nd Half,” KDI, Vol. 39, No. 2, 2022, pp.61-68.
 14. 한국환경연구원, 『기후변화에 따른 부문별 사회경제적 피해비용 분석 연구』, 2022.
(Translated in English) Korea Environment Institute, *Research on the Analysis of Sectoral Socioeconomic Damage Costs Due to Climate Change, 2022*.
 15. Arrow, K. J., M. L. Cropper, C. Gollier, B. Groom, G. M. Heal, R. G. Newell, W. D. Nordhaus, R. S. Pindyck, W. A. Pizer, P. R. Portney, T. Sterner, R. S. J. Tol, and M. L. Weitzman, “Should Governments Use a Declining Discount Rate in Project Analysis?” *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 8, No. 2, 2014, pp.145-163.
 16. Baxter, L. G., J. E. Stiglitz, S. Kelton, and J. C. Shambaugh, Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates Under Executive Order 13990, IWG, 2021.
 17. Bernstein, A., M. T. Gustafson, and R. Lewis, “Disaster on the Horizon: The Price Effect of Sea Level Rise,” *Journal of Financial Economics*, Vol. 134, No. 2, 2019, pp.253-272.
 18. Burke, M., S. M. Hsiang, and E. Miguel, “Global Non-linear Effect of Temperature on Economic Production,” *Nature*, 527, 2015, pp.235-239.
 19. Cass, D., *Studies in the Theory of Optimum Economic Growth*, Stanford University, 1965.
 20. Chang, W., and J. Yoo, How Learning Helps Mitigate the Worst When the Downside of Climate Change is Extreme, Working Paper, <https://ssrn.com/abstract=4162256>, 2023.
 21. Congressional Research Service (CRS), The Economic Consequences of Climate Change.
 22. Dell, M., B. F. Jones, and B. A. Olken, “Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century,” *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol. 4, No. 3, 2012, pp.66-95.
 23. Deschenes, O., and M. Greenstone, “The Economic Impacts of Climate Change:

- Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather,” *American Economic Review*, Vol. 97, No. 1, 2007, pp.354-385.
24. Dietz, S., F. van der Ploeg, A. Rezai, and F. Venmans, “Are Economists Getting Climate Dynamics Right and does it Matter?” *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, Vol. 8, No. 5, 2021, pp.895-921.
 25. Drupp, M. A., M. C. Freeman, B. Groom, and F. Nesje, “Discounting Disentangled,” *American Economic Journal: Economic Policy*, Vol. 10, No. 4, 2018, pp.109-134.
 26. Emmerling, J., and M. Tavoni, “Climate Engineering and Abatement: A ‘flat’ Relationship under Uncertainty,” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 69, 2018, pp.395-415.
 27. European Central Bank (ECB) 2023, The Climate and the Economy, 2022.
 28. Gazzotti, P., J. Emmerling, G. Marangoni, A. Castelletti, K. I. V. D. Wijst, A. Hof, and M. Tavoni, “Persistent Inequality in Economically Optimal Climate Policies,” *Nature Communications*, Vol. 12, No. 1, 2021, pp.1-10.
 29. Gillingham, K., W. Nordhaus, D. Anthoff, G. Blanford, V. Bosetti, P. Christensen, H. McJeon, and J. Reilly, “Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change: A Multimodel Comparison,” *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, Vol. 5, No. 4, 2018, pp.791-826.
 30. Golosov, M., J. Hassler, P. Krusell, and A. Tsyvinski, “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium,” *Econometrica*, Vol. 82, No. 1, 2014, pp.41-88.
 31. Graff Zivin, J., and M. Neidell, “Temperature and the Allocation of Time: Implications for Climate Change,” *Journal of Labor Economics*, Vol. 32, No. 1, 2014, pp.1-26.
 32. Havranek, T., Irsova, Z., Janda, K., and D. Zilberman, “Selective Reporting and the Social Cost of Carbon,” *Energy Economics*, Vol. 51, 2015, pp.394-406.
 33. Howard, P., and S. Thomas, “Few and Not So Far Between: A Meta-analysis of Climate Damage Estimate,” *Environmental and Resource Economics*, Vol. 68, No. 1, 2017, pp.197-225.
 34. Hsiang, S. M., K. C. Meng, and M. A. Cane, “Civil Conflicts are Associated with the Global Climate,” *Nature*, 476, 2011, pp.438-441.
 35. International Monetary Fund (IMF), “The Economics of Climate,” *Finance & Development*, Vol. 56, No. 4, 2019.
 36. Kahn, M. E., K. Mohaddes, R. N. Ng, M. H. Pesaran, M. Raissi, and J. C. Yang, “Long-term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-country Analysis,” *Energy Economics*, Vol. 104, 2021.
 37. Kalkuhl, M., and L. Wenz, “The Impact of Climate Conditions on Economic Production. Evidence from a Global Panel of Regions,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 103, 2020.
 38. 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,” 『한국기후변화학회지』, Vol. 14, No. 3, 2-23, pp.253-275.
 39. Koopmans, T. C., “On the Concept of Optimal Economic Growth,” *Academiae*

- Scientiarum Scripta Varia*, Vol. 28, No. 1, 1965, pp.1-75.
40. Margulis, S., G. Hughes, R. Schneider, K. Pandey, U. Narain, and T. Kemeny, "Economics of Adaptation to Climate Change: Synthesis Report," World Bank, 2010.
 41. Mendelsohn, R., W. D. Nordhaus, and D. Shaw, "The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis," *American Economic Review*, Vol. 84, No. 4, 1994, pp. 753-771.
 42. Müller, U. K., J. H. Stock, and M. W. Watson, "An Econometric Model of International Growth Dynamics for Long-Horizon Forecasting," *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 104, No. 5, 2022, pp. 857-876.
 43. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, "Valuing Climate Damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide," National Academies Press, 2017.
 44. Net Zero Tracker, Net Zero Stocktake 2023: NewClimate Institute, Oxford Net Zero, Energy and Climate Intelligence Unit and Data-Driven EnviroLab, 2023.
 45. Network for Greening the Financial System (NGFS), "Monetary Policy and Climate Change: Key Takeaways from the Membership Survey and Areas for Further Analysis," NGFS Publications, 2023.
 46. Nordhaus, W. D., and A. Moffat, "A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis," NBER, 2017.
 47. Nordhaus, W. D., and Z. Yang, "A Regional Dynamic General-equilibrium Model of Alternative Climate-change Strategies," *The American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, 1996, pp. 741-765.
 48. Nordhaus, W. D., "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change," *Journal of Economic Literature*, Vol. 45, No. 3, 2007, pp. 686-702.
 49. _____, "Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE Model 1992-2017," *Climatic Change*, Vol. 148, No. 4, 2018, pp. 623-640.
 50. _____, "Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics," *American Economic Review*, Vol. 109, No. 6, 2019, pp. 1991-2014.
 51. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), "Environment Database - Greenhouse Gas Emissions," OECD.Stat, 2023. [Online]. Available: <https://stats.oecd.org/>. [Accessed: Feb. 12, 2024].
 52. Patz, J. A., D. Campbell-Lendrum, T. Holloway, and J. A. Foley, "Impact of Regional Climate Change on Human Health," *Nature*, 438, 2005. pp. 310-317.
 53. Pindyck, R. S., "The Use and Misuse of Models for Climate Policy," *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 11, No. 1, 2017, pp. 100-114.
 54. Ramsey, F. P., "A Mathematical Theory of Saving," *Economic Journal*, Vol. 38, No. 152, 1928, pp. 543-559.
 55. Rennert, K., F. Errickson, B. C. Prest, L. Rennels, R. G. Newell, W. Pizer, ... and D. Anthoff, "Comprehensive Evidence Implies a Higher Social Cost of CO₂," *Nature*, 610, 2022, pp. 687-692.
 56. Stern, N. H., "The Economics of Climate Change: The Stern Review," Cambridge

University press, 2007.

57. Stern, N. H., and J. E. Stiglitz, "The Social Cost of Carbon, Risk, Distribution, Market Failures: An Alternative Approach," NBER, 2021.
58. Tol, R. S. J., "The Economic Effects of Climate Change," *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 23, No. 2, 2009, pp.29-51.
59. Weitzman, M. L., "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change," *Journal of Economic Literature*, Vol. 45, No. 3, 2007, pp.703-724.
60. _____, "On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change," *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 91, No. 1, 2009, pp.1-19.

Economic Impacts of Climate Change in Korea: Accounting for Climate Damage and Carbon Abatement Costs*

Jonghyun Yoo** · Yohan Choi*** · Jinho Oh****

Abstract

This study evaluates the economic impacts of climate change on the Korean economy, encompassing both climate-related damages and the costs of carbon abatement. Employing a probabilistic approach, the analysis incorporates uncertainty across three significant factors identified in the literature: long-term population and GDP forecasts, climate damage functions, and the social discount rate. The findings show that the overall impact of climate change on the Korean economy amounts to 503 trillion Korean Won (KRW) when implementing optimal economic and climate policies. Furthermore, the ambitious carbon reduction targets set by the Korean government, such as the 2030 Nationally Determined Contributions (NDC) and the 2050 Net Zero goals, significantly escalate economic costs by three to five times (to 1,539 and 2,517 trillion KRW, respectively), primarily due to substantial short-term carbon abatement expenses. However, the extensive uncertainty surrounding these estimates suggests that one cannot definitively label the rapid carbon reduction targets as inefficient. This highlights the necessity of fostering discussions on optimal climate policies that are in harmony with economic growth amidst significant uncertainty. The study also underscores the crucial role of supporting research on climate change to reduce this uncertainty. The analysis employs the RICE model, a widely recognized climate-economy integrated assessment model based on optimal growth theory.

Key Words: climate change economics, climate damages, carbon abatement costs, optimal carbon policy, 2030 NDC target, 2050 net zero, climate uncertainty, climate-economy integrated assessment model

JEL Classification: Q54, D81, D61, H23

Received: Feb. 21, 2024. Revised: March 18, 2024. Accepted: May 3, 2024.

* This work was supported by the Korea Environment Industry & Technology Institute (KEITI) through the Climate Change R&D Project for New Climate Regime, funded by the Korea Ministry of Environment (MOE) (RS-2023-00218794).

** First Author, Associate Professor, Department of Urban Planning and Design, University of Seoul, 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea, Phone: +82-2-6490-2806, e-mail: jyoo@uos.ac.kr

*** Co-Author, PhD Student, Department of Urban Planning and Design, University of Seoul, 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea, Phone: +82-2-6490-5520, e-mail: yohan0711@uos.ac.kr

**** Co-Author, Associate Professor, Mathematical Sciences, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Korea, Phone: +82-42-821-1761, e-mail: jhoh75@hanbat.ac.kr