

통합기후모형을 통한 제주도의 기후변화 피해 비용 추정*

정 국 모** · 황 다 슬***

논문초록 대부분의 국내 기후변화 영향 연구는 기후변화가 일부 산업 등에 미치는 개별 효과 추정을 중심으로 한정되어 있고, 통합기후모형을 통한 기후변화의 종합적인 경제 피해 비용, 또는 탄소의 사회적 비용 추정은 아직 미미한 상태이다. 본 연구는 최신 통합기후모형인 Golosov, Hassler, Krusell, and Tsyvinski(2014)를 통하여 제주도에서의 탄소의 사회적 비용을 국내 최초로 추정하였다. 본 연구의 분석에 따르면 2019년 기준으로 제주도에서 탄소 배출로 인한 연평균 총 사회적 비용은 약 205~365억 원 정도로 추정되었다. 탄소의 사회적 비용을 1톤당 비용으로 전환했을 때 제주도에서의 비용은 약 16,000원~29,000원 사이로 추정 되었다.

핵심 주제어: 기후변화, 탄소의 사회적 비용, 통합기후모형, 최적 탄소세

경제학문헌목록 주제분류: Q10, Q54, Q58

투고 일자: 2022. 5. 25. 심사 및 수정 일자: 2022. 6. 13. 게재 확정 일자: 2022. 6. 20.

* 본 논문은 저자들이 수행한 한국은행 제주본부의 연구용역 ‘통합기후모형을 통한 제주도의 기후변화 피해 비용 추정’ 중 일부를 수정, 보완한 연구임을 밝힌다. 본 연구 수행에 연구조교로 도움을 준 정지용, 조태웅, 박민정 학생에 감사의 말씀을 드린다.

** 교신저자, 서강대학교 경제학부 부교수, e-mail: kmjung@sogang.ac.kr

*** 공동저자, 한국은행 제주본부 경제조사팀 과장, e-mail: dshwang@bok.or.kr

I. 서 론

최근 기후변화에 관한 논의 및 대응이 전 세계적으로 가속화되고 있다. 이미 EU 및 미국 등의 주요선진국들은 2050년 탄소중립 달성을 위한 구체적인 방안을 수립하여 추진 중에 있으며 우리나라도 이에 발맞춰 2050년 탄소중립 시나리오를 마련하여 추진할 계획을 세우고 있다. 온실가스 배출로 인한 전 세계적 기후변화가 유발하는 피해가 이제는 더 이상 간과할 수 없는 실체적 위협으로 인식되고 있기 때문이다. 지난 20년간 전 세계적 환경 재난의 규모와 빈도수도 급격히 증가 하였으며, 이는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 평가보고서에서도 지속적으로 언급이 되고 있다. 기후변화로 인한 극한기상현상(폭염 및 홍수 등) 역시 발생 횟수와 강도가 증가하고 있다.

우리나라의 경우도 예외는 아니다. 한반도의 기온 상승률은 지난 100년간 섭씨 약 1.7도로 지구평균온도 상승률인 섭씨 0.74도보다 크다(환경부, 2009). 또한 대형 산불과 집중 호우로 인한 피해도 매년 급증하고 있는 실태이다. 제주도의 경우 만 따로 놓고 보았을 때 사태는 더 심각하다. 전국의 평균온도 상승률이 섭씨 약 1도 정도인 반면 제주도의 경우 그 두 배인 섭씨 2도 정도로 나타난다. 강수량의 변화율 또한 전국보다 높게 나타난다. 이렇게 빠르게 진행되고 있는 제주지역에서의 기후변화는 막대한 탄소저감노력 및 비용을 요구하고 있다. 2022년 제주특별자치도의 온실가스 감축 사업에만 총 2,170억의 예산이 편성¹⁾되어 있으며, 이는 전체 예산(일반+특별회계 기준)의 3.4% 비중으로 추후 면밀한 모니터링이 예정되어 있다.²⁾ 또한 해당 예산규모는 제주 지역내총생산(GRDP)의 1% (2020년 기준)를 상회하는 수준인데, 향후 기후변화로 인한 피해가 증가함에 따라 요구되는 탄소저감 비용은 더욱 빠르게 증가할 것으로 예상된다.

이렇게 막대한 비용지출이 요구되는 상황에서 최적 탄소배출 저감 목표 설정을 위해 정확한 편익/비용 분석이 선행되어야 한다. 따라서 탄소배출이 유발하는 기후

1) CFI2030에 따라 전기차 선도도시로서 전기자동차 보급 확대 등 수송부문(1,034억원), 도민 편의 생활레기물 분리배출 시스템 및 인프라 구축 등 폐기물 관련(641억원), 연안벨트 바다숲 조성 사업(420억원) 등.

2) 예산과 기금이 기후변화에 미치는 영향을 분석하고 이를 예산에 반영하는 '온실가스감축인지' 예산제도를 조기 도입하여 2023년부터 시범 운영할 예정.

변화가 제주 경제에 미치는 피해비용에 대한 추정이 정책 입안자들에게는 가장 기초적이고 핵심적으로 필요한 정보라 할 수 있다. 경제학적으로 탄소배출이 유발하는 거시피해비용은 탄소배출의 외부효과 비용과 동일한 개념이며 이는 일반적으로 탄소의 사회적 비용(Social Cost of Carbon, SCC)이라고 지칭되기도 한다.

문제는 국내에서 SCC에 대한 학문적 추정 연구가 매우 미흡하다는 사실이다. 특히, 제주도에서의 SCC 추정은 필자들의 지식에 의하면 존재하지 않는다. 선행연구에 관한 구체적인 설명과 왜 SCC 추정연구가 국내에서 미흡한지는 II. 장에서 언급하기로 한다. 간단한 이유는 다음과 같다. SCC를 추정하기 위해 해외연구에서 일반적으로 사용되는 통합기후모형(Integrated Assessment Model, IAM)은 모형의 구조가 복잡하고 국내에서 획득 가능한 정보의 제약으로 모형에서 요구하는 데이터를 충족하지 못한다는 한계가 있다. 이러한 이유로 대부분의 국내연구는 SCC를 직접 추정하기보다는 외생적으로 결정된다고 가정하고, 탄소세 부과 등 정책적 요인으로 발생하는 여러 가지 거시경제변수의 변화를 경제적 피해비용으로 간주하는 연구가 다수를 이루었다. 하지만 이는 기후변화로 인한 경제적 피해와 그에 따른 각 경제주체의 최적화 선택을 모형 안에서 내생화하여 도출한 결과가 아니기 때문에 기후변화 피해로 인한 궁극적 비용이라 보기는 어렵다.

하지만 최근 해외의 연구 중 Golosov, Hassler, Krusell, and Tsyvinski (2014)가 기존 IAM 모형의 단점을 보완하여 SCC 추정 연구에 큰 반향을 일으켰다. Golosov et al. (2014) 모형의 혁신은 Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) 모형임에도 불구하고 거시경제학계에서 널리 사용되고 있는 몇 가지 핵심가정을 통해 최적 SCC를 간단한 몇 개의 모수들(시간할인율, 탄소순환계수, 총요소생산성(Total Factor Productivity, TFP)의 기후변화에 대한 민감도)로만 구성된 닫힌해(closed form solution)의 형태로 구현할 수 있다는 점이다. 이를 통해 기존 IAM 모형에서 최적 SCC 도출을 위해 필요했던 정보들(미래 화석에너지 및 재생에너지 분야의 기술 및 경제적 중요성 예측, 그리고 미래의 기후변화 및 탄소 축적량에 대한 예측)이 더 이상 요구되지 않는다. 이러한 장점으로 인해 Golosov et al. (2014) 모형은 최근 해외에서 많은 SCC 추정연구의 벤치마크 케이스로 광범위하게 적용되고 있다.

최근 해외 연구 동향에 발맞추어 본 연구는 Golosov et al. (2014) 모형을 국내 최초로 제주도에 적용하여 제주도에서의 SCC를 추정하였다. 물론 Golosov et al.

(2014) 모형은 지역별 특성을 고려하지 못한 글로벌 모형이라는 단점이 있다. 지역적 특성을 고려한 통합기후-지역평가모형은 William Nordhaus의 Regional Integrated Model of the Climate and the Economy(RICE) 모형의 개발로 시작해서 현재까지 발전되어오고 있다. 하지만 이러한 지역적 특색을 고려한 모형들은 한계도 동시에 지니고 있다. 예를 들어 기후, 경제, 정책 모듈을 모두 개발하여야 함과 동시에 지역별로 개별 방정식의 모수들을 각각 추정해야 하기 때문이다. 또한 이러한 모수 추정을 위해 필요한 자료의 양은 많지만, 미래 지역별 기후변화의 영향을 모형화하기 위한 기본 관측값이 크게 부족하여 대부분의 경우 많은 가정에 의존한 정량분석을 시행하고 있다. 최적 SCC에 대한 닫힌 해는 당연히 불가능하고 이를 추정하기 위한 계산 과정이 매우 복잡해지고 새로운 수치 알고리즘을 개발해야 한다는 또 다른 단점도 존재한다. 결국 RICE 모형과 같은 통합기후-지역평가모형에 제주도를 특정 지역으로 추가해서 제주도의 기후변화 관련 거시비용을 추정하는 연구또한 방법론이나 도출된 SCC의 신뢰성의 측면에서 문제가 있다고 볼 수 있는 것이다. 따라서 글로벌 모형이라는 단점은 존재하나 아직까지 국내에서 Golosov et al. (2014) 모형이 적용된 연구는 없다는 측면에서 본 연구의 결과는 추후 제주도, 더 나아가 국내 기후변화대응 정책 수립에 필요한 주요 벤치마크 정보로 역할을 할 것으로 기대된다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제Ⅱ장에서는 본 연구와 관련된 선행연구들을 정리하였다. 제Ⅲ장에서는 본 연구에서 사용된 모형을 요약하고 설명하였다. 다음으로 제Ⅳ장에는 제주도 SCC 추정을 위해 필요한 모수를 추정하였고 관련된 데이터와 방법론을 설명하였다. 제Ⅴ장에서는 추정된 모수들을 바탕으로 제주도의 SCC를 추산하였으며 강건성 검증까지 수행하였다. 마지막으로 제Ⅵ장에서는 앞서 분석한 결과를 요약, 정리하였다.

Ⅱ. 선행연구 및 본 연구의 차이점

기후과학이 자연과학자들 사이에서 주요 연구 분야로 떠오른 시기는 1970년대이다. 이에 따라 사회과학자들도 지구온난화의 가능성에 주목하게 되었고 자연스럽게 기후변화가 경제에 어떠한 영향을 미치는지 관심을 가지기 시작했다. 특히 초기 연구는 지구온난화가 농업에 미치는 영향에 대한 분석을 중심으로 발전하였다.³⁾

기후가 농업에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 기후와 농산물의 상호작용에 관한 체계적인 이해 및 모형화가 필수적이다. 가장 대표적인 모형으로는 Mendelsohn, Nordhaus, and Shaw(1994)가 있다. Mendelsohn et al. (1994)는 기후변화가 장기적으로 자산가치에 영향을 미치며, 현재 자산가격은 기후변수의 변화에 따른 토지 가치의 가격민감성에 영향을 준다는 가정하에 개발된 모형이다. 농업에만 한정되었던 초기 연구는 각 산업/지역별로 추후에 확장되기 시작했고 온난화뿐만 아니라 강수량의 변화, 해수면 상승 등 다른 기후변수들의 변화의 영향을 분석하는 방향으로 발전되었다.

그러나 문제는 이러한 연구들은 기후변화의 영향을 분석할 때 각 지역/산업별로 여전히 축소된 형태 접근법(reduced form approach)을 사용했다는 점이다. 다시 말해서 기후변화가 지역에 미치는 거시적 비용 추정을 위해 각 지역/산업별로 도출된 피해액의 가중평균을 주로 사용해 왔던 것이다. 이러한 방법론의 문제는 각 지역/산업별 기후변화의 경제효과유발 메커니즘이 무수히 많이 존재할 수 있다는 사실에도 불구하고 단순히 몇 개의 채널만 가정한다는 점이다. 따라서 이러한 추정방법은 어떠한 미시 메커니즘을 모형에 추가하고 어떻게 그것들이 상호작용하는지에 관한 이전 가정(prior assumption)의 오류에 매우 취약하다는 단점을 가지고 있다.⁴⁾

이러한 비판으로 인해 자연스레 학계나 정책입안자들 사이에서 기후, 경제, 정책변수가 상호작용을 통해서 내생적으로 결정되는 통합기후모형(IAM)이 주목을 받기 시작했다. IAM 모형은 2018년 노벨경제학상 수상자인 William Nordhaus에 의해 최초로 개발 및 발전되어온 모형이다. IAM 모형의 결과들은 최근 국제 기후변화협상에서 중요한 근거로 활용되고 있으며 IPCC의 최근 6차 평가보고서에서 제시하고 있는 지역별 온실가스 감축 권고량이나 최적 탄소세 가격 범위도 이러한 IAM 모형에 기반한 연구결과에 근거한 것이다. 이미 해외 학계에서도 IAM 모형을 통한 최적 기후변화정책 수립의 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 그 예로 Nordhaus(2013)의 DICE(Dynamic Integrated Assessment Model of Climate and the Economy) 모형, Anthoff and Tol(2014)의 FUND(Climate Framework For Uncertainty, Negotiation and Distribution), 그리고 Hope(2012)의 PAGE(Policy Analysis of the Greenhouse

3) Kokoski and Smith(1987), Adams et al. (1988), 그리고 Adams(1989).

4) Dell, Jones, and Olken(2012).

Effect) 등이 국제적으로 널리 활용되고 있으며 이를 바탕으로 탄소의 사회적 비용 (Social Cost of Carbon, SCC)을 산출하는데 광범위하게 적용되고 있다.

그러나 이러한 현실에도 불구하고 국내에서는 아직까지 IAM 모형을 통한 탄소의 사회적 비용 또는 SCC 추정 연구가 매우 미흡한 상태이다. 특히, 제주도에서 기후 변화가 유발하는 거시비용추정을 IAM 모형으로 추정한 연구는 부재한 상태이다. 이는 향후 제주도나 더 나아가 국가차원의 기후변화대응 정책을 수립하는데 큰 걸림돌로 작용할 수 있다. 물론 우리나라에서의 SCC를 추정한 연구가 전혀 없는 것은 아니다. 지금까지 대부분의 기후변화정책과 관련한 국내연구는 주로 연산가능 일반균형 (Computable General Equilibrium, CGE) 모형을 활용해 왔다.⁵⁾ 하지만 이러한 CGE 모형은 SCC를 모형 내에서 내생적으로 도출하지 않고 외생적으로 주어진 외생정책변수로 가정한 부분균형모형이라는 치명적 단점이 있다. 즉, 이러한 외생성으로 인해 기후변화와 관련대응정책의 상호작용에 대한 고려가 CGE 모형에서는 불가능한 것이다. 또한 CGE 모형의 특성상 기후변화와 관련대응정책이 가지는 불확실성을 모형에 추가할 수 없다는 근본적인 문제도 존재한다.

다행스럽게도 최근에 IAM 모형을 활용한 국내연구가 시작되고 있다는 점은 긍정적이다. 대표적으로 환경부에서 발간한 “우리나라 기후변화의 경제학적 분석”이 있다(전성우 외, 2010; 채여라 외, 2011, 2012). 이런 연구들은 Hope et al. (1993)의 PAGE 모형을 채택했다. 주목할 만한 장점은 통합기후모형에 지역별 특성을 추가했다는 것이다. 즉, 동 연구들은 기존의 DICE 모형과 같은 IAM 모형들이 일반적으로 지역적 특성을 고려하지 않은 글로벌 모형이란 점을 인식하고 지역특성을 고려한 통합기후모형으로 한 단계 업그레이드했다는 측면에서 의의를 지닌다. 다만 지역을 구분할 때 한국을 독립적인 지역으로 분석하기보다는 PAGE 모형에서 적용된 지역구분을 사용해서 산출한 결과에 가중치를 적용하는 방식으로 한국에서의 기후변화 영향을 분석했다는 단점이 있다. 더 큰 단점은 여전히 PAGE 모형도 기후, 경제, 정책이 완전히 내생화가 안된 부분균형 모형이란 점이다. 즉, 최적 탄소세나 SCC를 최적화 과정을 통해서 도출할 수 없다는 근본적 단점이 있는 것이다.

이렇듯 Nordhaus의 DICE 모형과 같은 일반균형모형을 기반으로 한 기후변화정책 연구가 국내에서는 여전히 부족하다. 가장 큰 이유로는 DSGE 모형을 기반으로

5) 김용건 외 (2015), 권오상 외 (2017), 오형나 외 (2022).

한 통합기후모형의 활용은 모형의 근본적 복잡성으로 인해 최적 SCC 추정이 오로지 수치계산법(numerical method)으로만 가능하다는 점이 있겠다. 따라서 도출된 최적 SCC에 대한 직관적 이해와 설명이 어렵다는 문제가 발생한다. 더 중요하게는 모수가 변화하면서 최적 SCC가 변했을 때 어떠한 채널을 통해서 그러한 변화가 일어나는지에 관한 직관적 설명이 불가능하다는 단점도 현재까지 활발한 국내연구를 촉진시키지 못한 또 다른 이유라 할 수 있겠다.

하지만 최근 *Econometrica*에 게재된 해외 논문이 이러한 단점을 보완한 새로운 IAM 모형을 제시하였다. Golosov, et al. (2014)가 바로 그 혁신적인 모형을 제시한 논문이다. 본 논문은 출판 이후 기후변화의 경제학 분야에 큰 반향을 일으켰다. 또한 최근 최적 SCC를 도출하는 많은 해외연구에서 주요 벤치마크모형으로서 광범위하게 영향력도 넓혀가고 있다. Golosov et al. (2014) 모형의 핵심적인 혁신은 DSGE 모형임에도 불구하고 거시경제학계에서 널리 사용되고 있는 몇 가지 핵심가정을 통해 최적 SCC를 모수들의 조합으로 구성된 닫힌 해(closed form solution)의 형태로 도출할 수 있다는 점이다. 이는 그동안의 연구결과들이 제공하지 못했던 새로운 장점들을 제공할 수 있다.

우선 최적 탄소세의 닫힌 해가 상대적으로 간단한 형태로 나타난다. 기본적으로 시간할인율, 탄소순환계수, TFP의 기후변화에 대한 민감도 정도만이 GDP 대비 최적 탄소세를 결정하게 된다. 이러한 결과의 도출과 직관적 설명은 추후 본문에서 자세히 설명하도록 한다. 핵심은 이렇게 간단한 몇 개의 모수들이 최적 SCC를 결정한다는 사실은 미래의 경제와 기후변화에 대한 예측이 필요 없다는 의미이기도 하다. 즉, 기존의 논의에서 최적 SCC를 도출하기 위해 핵심적인 정보로 인식되어 오던 미래의 경제구조 예측, 미래 화석에너지 및 재생에너지 분야의 기술 및 경제적 중요성 예측 및 미래의 기후변화 및 탄소 축적량에 대한 예측 또한 필요 없다는 장점이 있는 것이다.

정책입안자들에게 이러한 장점은 매우 중요한 함의를 지닌다. 우선 최적 기후변화대응 정책의 수단에 관한 논의(탄소세 vs 배출권 거래제)에서 중요한 이론적 근거를 제시할 수 있다. Golosov et al. (2014) 모형은 최적 탄소세 도출에 필요한 정보의 양이 최적 탄소배출량 도출에 필요한 정보보다 훨씬 적다는 결과를 보여줌으로써 탄소세 부과에 상대적 우월성에 중요한 이론적 근거를 제시한다. 또한 정치적으로 고려에 민감한 미래에너지 섹터 및 탄소배출량의 변화 예측이 최적 탄소세 결정에

영향을 끼치지 않는다는 점은 정책입안자들에게 또 다른 장점이 될 것이다.

Ⅲ. 통합기후모형

1. 모형 및 주요가정

본 연구의 기본 모형은 Golosov, et al. (2014)의 통합기후모형(GHKT 모형)에 바탕을 둔다. 따라서 이번 장에서는 모형의 기본 셋업을 최대한 간결하게 설명하는 대신 탄소 사이클, 다양한 종류의 에너지 형태, 그리고 채굴기술에 관련한 모형경제의 특성을 중점적으로 설명하기로 한다.

본 모형은 전형적인 대표자 거시성장모형으로서 대표자는 다음과 같은 소비에 대한 동태적 효용을 가진다.

$$E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U(C_t).$$

총 $I(i = 1, \dots, I)$ 개수의 에너지 섹터가 존재하며 최종상품생산자의 인덱스는 0이라 가정한다($i = 0$). 최종상품생산자의 자원 제약식은 일반적인 경우와 마찬가지로 다음과 같이 가정한다.

$$C_t + K_{t+1} = Y_t + (1 - \delta)K_t.$$

여기서 K_t 는 자본스톡을 의미하며 최종상품 Y_t 를 생산하는 최종상품생산자의 생산함수는 다음의 형태를 가진다고 가정한다.

$$Y_t = F_{0,t}(K_{0,t}, N_{0,t}, E_{0,t}, S_t).$$

여기서 $N_{0,t}$ 은 최종상품생산자의 노동 투입량을 의미하고 $E_{0,t}$ 은 최종상품생산자의 에너지 투입요소의 벡터를 의미한다. S_t 는 대기 중 누적 탄소축적량을 의미한다. 에너지 투입요소($E_{i,t}$)의 생산함수 또한 최종상품생산자의 생산함수와 유사한

형태를 지닌다고 가정한다.

$$E_{i,t} = F_{i,t}(K_{i,t}, N_{i,t}, E_{i,t}, R_{i,t}) \geq 0.$$

각각의 에너지자원 매장량($R_{i,t+1}$)도 다음의 동태방정식을 따른다고 가정한다.

$$R_{i,t+1} = R_{i,t} - E_{i,t} \geq 0. \quad (1)$$

추후에 수행할 정량분석의 단순화를 지금부터 오로지 3개의 에너지 섹터($I=3$)만을 가정하기로 한다: 석탄(coal), 오일(oil), 그리고 재생에너지(clean) 섹터만이 모형 경제에 존재한다고 가정한다. GHKT 모형과 동일하게 오일섹터는 한계생산비용이 '0'이라고 가정하고 석탄과 재생에너지 섹터는 아래와 같은 선형노동생산함수를 통해서 에너지를 생산한다.

$$\begin{aligned} E_{coal,t} &= A_{coal,t} \cdot N_{coal,t}, \\ E_{clean,t} &= A_{clean,t} \cdot N_{clean,t}. \end{aligned}$$

위에서 N 은 에너지 섹터 I 에 투입된 노동의 양을 의미한다. 마지막으로 A 는 섹터 I 의 TFP를 의미한다. 최종상품생산자는 위 세 개의 에너지 상품을 아래와 같은 CES 함수의 형태로 집합하여 에너지 복합재(E_t)를 생산한다.

$$E_t = (\kappa_1 E^{\rho_{oil,t}} + \kappa_2 E^{\rho_{coal,t}} + \kappa_3 E^{\rho_{clean,t}})^{1/\rho}. \quad (2)$$

여기서 주목할 점은 GHKT 모형에서 탄소저감 노력은 에너지 복합체(E_t) 생산의 내생화를 통해서 이루어진다는 것이다. 이것이 GHKT 모형에서는 탄소저감노력이 따로 독립적인 선택변수로 추가가 되지 않은 이유이다.

다음으로 최적자원배분 및 탄소의 외부효과비용을 도출하기 위해 사회계획자(social planner) 문제를 풀어야 한다. 여기서 해답의 간결성과 직관성을 위해서 GHKT 모형과 동일하게 다음 세 가지 가정을 추가적으로 적용한다. 우선 효용함수

로는 자연로그 함수를 가정한다.

$$\text{가정 1: } U(C_t) = \ln(C_t).$$

두 번째로 IAM 모형의 핵심인 피해함수는 다음과 같은 간단한 형태로 가정한다.

$$\text{가정 2: } F_{0,t}(K_{0,t}, N_{0,t}, E_{0,t}, S_t) = (1 - D(S_t))\widehat{F}_{0,t}(K_{0,t}, N_{0,t}, E_{0,t}).$$

$$1 - D_t(S_t) = \exp(-\gamma_t(S_t - \bar{S})).$$

$\bar{S} \equiv$ 산업화 이전 대기중 탄소축적량.

여기서 중요한 함수는 D 함수이다. t 기 대기 중의 탄소축적량이 동기에 얼마나 많은 TFP의 감소를 유발하는지 보여주는 함수이다. 일반적으로 전형적인 IAM 모형에서는 탄소축적량이 기후의 변화를 유발하고 그것이 다시 TFP에 부정적으로 영향을 미치는 메커니즘을 채택한다. 그러나 본 모형에서는 GHKT 모형과 동일하게 대기 중 탄소축적량이 경제의 TFP에 직접적으로 영향을 주는 일종의 지름길을 선택하였다. 이미 Golosov et al. (2014)에서 지수함수의 형태로 가정된 피해함수(D)가 Nordhaus의 DICE 모형에서 채택된 피해함수보다 훨씬 간단함에도 정량적으로나 정성적으로 상당히 유사한 결과를 유출한다고 보여주었다. 이와 같은 이유로 본 연구도 GHKT 모형의 피해함수와 동일한 형태를 가정하기로 한다.

세 번째 가정은 대기 중 탄소축적량의 진화과정에 관한 것이다.

$$\text{가정 3: } S_t - \bar{S} = \sum_{s=0}^{t+T} (1 - d_s) E_{t-s}^f. \quad (3)$$

$$(1 - d_s) = \phi_L + (1 - \phi_L)\phi_0(1 - \phi)^s.$$

여기서 중요한 변수는 d_s 이다. 만약 탄소 1톤을 현재기에 배출했을 때 s 기 후의 미래에 대기 중 남아있는 탄소의 비율을 의미한다. 가정3은 대기 중 탄소축적량이 과거로부터 배출되어온 탄소의 가중평균으로 결정됨을 의미한다. 특히 GHKT 모형과 동일하게 탄소순환계수(d_s)는 가정3과 같이 일종의 등비급수형태로 진화한다고 가정하였다.⁶⁾

2. 탄소의 사회적 비용

앞에서 설명된 세 가지 가정을 모형의 셋업과 조합하면 아래와 같은 사회계획자 (social planner) 문제가 도출된다.

$$\max_{K_{t+1}, R_{t+1}, E_t, C_t, E_{1,t}, E_{2,t}, N_{1,t}, N_{2,t}, K_{1,t}, K_{2,t}, S_t} E \Sigma_{s=0}^{INF} \beta^s U(C_t),$$

$$s.t \text{ (1), (2), and (3)}.$$

사회계획자는 이를 풀어서 최적자원배분을 결정하게 된다. 최적자원배분 도출 과정 및 결과는 본 연구에서 보고하지 않는다. 여기서 중요한 점은 도출된 최적자원 배분 하에서 에너지 i 의 소비에서 나오는 탄소배출의 한계외부비용 ($A_{i,t}$), 또는 총 SCC, 또는 피구세 (Pigouvian Tax)를 아래와 같이 닫힌 해의 형태로 도출할 수 있다는 점이다.

$$A_{i,t} \equiv E_t \Sigma_{j=0}^{INF} \beta^j \frac{U'(C_{t+j})}{U'(C_t)} \frac{\partial F_{0,t+j}}{\partial S_{t+j}} \frac{\partial S_{t+j}}{\partial E_{i,t}}.$$

가정 1, 2, 3과 시불변적 (non-timevarying) 기후변화피해계수 $E_t[\gamma_{t+1}] = \bar{\gamma}$ 를 가정하면 GDP 대비 탄소배출의 한계외부비용은 다음과 같이 모형의 상수값들로 이루어진 간단한 닫힌 해의 형태로 도출된다.

$$\frac{A_t}{Y_t} \equiv \bar{\gamma} \left(\frac{\phi_L}{1-\beta} + \frac{(1-\phi_L)\phi_0}{1-(1-\phi)\beta} \right). \quad (4)$$

위의 식은 본 연구의 핵심 방정식이라 말할 수 있다. 우선 본 모형에서 도출된 GDP 대비 탄소배출의 외부효과 또는 탄소의 사회적 비용은 다음과 같은 특징을 가진다. 우선 시불변적 GDP 대비 탄소의 사회적 비용은 오로지 세 가지 모형모수에 의해서 결정된다: 1. 시간할인 (β), 2. 탄소순환계수 (ϕ_L, ϕ_0, ϕ), 3. 피해계수 (γ).

6) 좀 더 자세한 과학적 설명은 Golosov et al. (2014)에 잘 나타나 있다.

이는 타 IAM 모형에서 함축된 탄소의 사회적 비용보다 훨씬 간단하고 직관적인 결과이다. 그간의 연구에서 핵심적인 역할을 한 미래 재생에너지 기술, 탄소축적량의 동태적 진화, 노동력의 동태적 진화 등이 본 모형에 따르면 탄소의 사회적 비용에 전혀 영향을 미치지 않는다는 큰 장점이 있다. 오로지 미래기후변화 피해의 현재 할인, 탄소축적의 장기성, 탄소의 생산성 감소 효과에 의해서만 탄소의 사회적 비용이 결정되는 것이다. 이는 최적 SCC를 유추함에 있어서 본 모형은 훨씬 더 적은 양의 정보를 요구한다는 의미이다. 또 다른 탄소저감 정책수단인 배출권거래제보다 탄소세 적용이 훨씬 더 효율적이고 정확할 수 있다는 정책적 함의도 내포하고 있다.

식 (4)에서 도출된 GDP 대비 SCC가 시불변적인 직관적인 이유는 다음과 같다. 모형의 가정과 일치하게 기후변화 또는 탄소배출의 외부효과 비용은 GDP에 정비례하는 관계를 가진다. 모형에서 기후변화 또는 탄소배출은 TFP를 직접적으로 감소시키는 역할을 하기 때문이다. 그러나 소비의 한계효용은 GDP에 반비례하는 관계를 가진다. 일반적인 한계효용체감의 법칙과 일맥상통하는 결과이다. 즉 GDP가 증가할수록 기후변화 피해비용은 증가하나 그 피해로 인한 한계효용의 체감 또한 반대로 감소하기 때문에 GDP 대비 피해액이 일정하게 유지된다고 보면 되는 것이다.

다음 장에서는 이와 같은 모형의 결과 및 예측을 제주도에 적용한 정량분석을 시행한다. 모형에서 도출된 SCC 추정을 위해서 필요한 위의 세 가지 모수를 우선 추정(IV장) 하고 그 모수를 바탕으로 제주도에서의 여러 가지 기후변화 시나리오를 바탕으로 제주도에서의 기후변화 피해비용을 최종적으로 추계(V장)하기로 한다.

IV. 모수 추정

1. 시간할인율 및 탄소순환계수

본 장에서는 제주도에서의 최적 SCC 추정을 위해 필요한 모수만을 추정함을 목표로 한다.

첫 번째 주요 모수인 시간할인율은 일반적으로 기존 연구에서 사용되었던 값은 사용한다. 두 가지 할인율을 채택하였다. 우선 Nordhaus(1992)에서 사용된 상대

적으로 높은 할인율 $\beta = 0.985$ 을 사용하고 비교대상으로 Stern (2007) 리포트에서 사용된 상대적으로 낮은 할인율 $\beta = 0.999$ 도 사용하였다. 이미 기존 연구에서 잘 나타난 것처럼 할인율은 기후변화의 피해액을 결정하는 가장 중요한 핵심 계수이기도 하다. 할인율이 높을수록 미래세대가 겪을 기후변화 피해액의 현재가치가 줄어들고 할인율이 낮을수록 그 반대의 현상이 나타나기 때문이다. 학계에서는 전통적으로 시간할인율은 시장에서 관찰되는 이자율을 통하여 위험회피계수와 시간할인율을 동시에 추정하는 방법을 따른다. 그러한 방법을 따른 것이 Nordhaus (1992)의 상대적으로 높은 할인율이다. 다만 Stern (2007)은 Nordhaus (1992)의 방법론이 기존 거시연구와 일관성은 있지만 기후변화로 인한 외부효과의 미래피해를 현재시장에서 관측된 할인율을 적용해서 현재가치로 할인하는 것은 윤리적으로 옳지 않다는 주장을 하였다. 이에 본 연구는 비교분석의 차원에서 두 가지 모두의 할인율을 적용하였다.

두 번째 핵심 모수는 탄소순환계수(ϕ_L, ϕ_0, ϕ)이다. 이는 현재의 에너지사용이 대기 중 탄소축적량의 동태적 변화에 어떻게 영향을 미치는가에 관한 문제로 기후과학의 영역에 포함된다. 특히 탄소순환계수들은 기후과학 분야에서 연구되고 도출된 계수들로서 글로벌한 특성이 잘 나타난다고 이미 많은 연구에서 보고되었다.⁷⁾ 따라서 본 연구는 제주도만의 지역적 탄소순환계수를 따로 추정하지 않고 GHKT 모형에서 이미 사용된 아래의 값들을 채택하였다.

$$\phi = 0.0228, \phi_L = 0.2, \phi_0 = 0.393.$$

직관적으로 30기 이후에 현재기에 배출된 탄소가 절반으로 줄어드는 것을 함축하며 이는 최근 IPCC 리포트에서 사용된 탄소순환계수들과 일치한다.

2. 제주도의 피해함수 추정

(1) 피해함수

제주도에서의 SCC 추정을 위해 필요한 마지막이자 가장 중요한 모수는 시불변적

7) Archer (2005), Archer et al. (2009).

피해계수(γ) 이다. 피해계수는 가정2에서 정의된 아래와 같은 지수함수의 계수로 정의된다.

$$1 - D_t(S_t) = \exp(-\gamma(S_t - \bar{S})).$$

즉, γ 는 현재기의 탄소배출(S_t)이 산업화 이전의 탄소배출량(\bar{S})을 초과할 때 얼마만큼 최종생산자의 TFP를 감소시키는지 결정짓는 중요한 계수인 것이다. 이는 전형적인 경제학의 분야이고 지역적 특성이 분명히 존재한다고 볼 수 있다. 전통적으로 피해함수(D_t)의 추정은 크게 두 가지 방법론을 따른다.

우선 본 연구와는 다르게 기존 연구에서 피해함수는 탄소량보다 기후변수(예를 들어 온도 및 강수량)의 함수로 정의가 된다. 이를 바탕으로 첫 번째 방법론은 아래와 같이 리카디안 횡단면분석을 사용한다.

$$y_i = Z_i\beta + X_i\tau + \varepsilon_i.$$

여기서 Z_i 는 지역 i 에서의 기후변수벡터를 의미하고 X_i 는 기후변수 외에 지역 i 의 TFP에 영향을 미치는 다른 조정변수벡터를 의미한다. 즉 여기서 추정된 β 벡터가 피해계수인 것이다. 이와 같은 방법론은 Mendelsohn, Nordhaus, and Shaw (1994) 및 후속 연구들에 의해서 사용되어 왔다. 최근에는 이러한 횡단면분석 방법론이 단점들을 보완하기 위해서 아래와 같은 패널방정식을 통하여 연구들이 진행되고 있다.

$$y_{i,t} = \alpha_i + Z_{i,t}\beta + X_{i,t}\tau + \varepsilon_{i,t}.$$

위 식에서 α_i 는 시불변적 지역고정효과를 의미하며 이것이 횡단면분석에서 나타나는 생략된 변수의 편향(omitted variable bias)를 조정하는 역할을 하는 것이다. 이러한 패널분석 방법은 최근 기후변수가 국내총생산이나 생산성에 미치는 영향을 추정하기 위해 많이 사용되고 있는 추세이다.⁸⁾

8) Dell et al. (2012), Kalkhul and Wenz(2020).

하지만 위의 두 가지 방법론 모두 제주도만의 피해함수 추정에는 자료 및 지역의 협소성으로 인해 사용이 불가능하다. 예를 들어 제주도를 각각 소규모 지역으로 분리해 횡단면분석을 시행하기에는 제주시의 경제집중도가 너무 커서 불가능하며 패널분석 또한 제주도 외의 시계열 데이터가 사실상 존재하고 있지 않아서 불가능하다. 이런 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 시계열 분석을 통한 피해함수 추정을 수행하였다. 이를 위해 다음의 최종생산자 생산함수를 가정하였다.

$$Y_t = \exp(\beta_1 T_t + \beta_2 T_t^2 + \beta_3 P_t + \beta_4 P_t^2) K^{\alpha_t} L^{1-\alpha_t}.$$

Y_t 는 t 기의 총생산량을 의미하고 T_t 는 온도 P_t 는 강수량을 나타내는 변수로 정의한다. 즉, 제주도에서의 피해함수를 온도와 강수량의 다항함수로 가정한 것이다. 시계열이 변함에 따라 온도와 강수량 또한 변하지만 피해계수 $(\{\beta_j\}^{j=4_{j=1}})$ 는 시불변적이라고 가정도 하였다. 마지막으로 $\{\beta_j\}^{j=4_{j=1}}$ 을 추정하기 위한 회귀방정식은 위의 생산함수를 차분한 아래의 차분 방정식을 채택하였다.

$$\Delta \ln Y_t = \beta_1 \Delta T_t + \beta_2 \Delta T_t^2 + \beta_3 \Delta P_t + \beta_4 \Delta P_t^2 + \eta \Delta \ln K_t + \theta \Delta \ln L_t.$$

(2) 데이터 및 자료

피해함수 추정을 위해 변수 $Y_{i,t}$, $L_{i,t}$, $K_{i,t}$, $T_{i,t}$, $P_{i,t}$ 에 대하여 패널자료를 구축하였다. 지역은 서울시, 부산시, 경기도, 강원도, 충청북도, 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도, 경상남도, 제주도로 총 11개의 시도이고, 시계열은 1960년부터 2019년까지 연간 자료이다.

지역별 실질 총생산($Y_{i,t}$)은 통계청, 『지역소득』에서 1985년부터 2019년까지 지역내 총생산(Gross Regional Domestic Product)을 사용하였고, 1985년 이전 자료는 표학길·이근희(2018)의 방법론을 차용하여 1960년⁹⁾까지 간접추계를 통해 구하였다. 간접추계 방식은 다음과 같다. 우선 통계청, 『인구주택총조사』를 이용해 각 지

9) 자료의 한계 때문에 부산시와 경상남도는 1966년부터 시작한다.

역 및 산업별¹⁰⁾ 취업자 수를 구한 후 해당 지역의 각 산업의 비중을 취업자의 비율로 구한다. 그리고 전국 산업별 실질 부가가치에 각 지역별 비중을 곱해 각 지역 및 산업별 부가가치를 구한다. 각 지역별로 전 산업의 부가가치를 합함으로써 지역별 국내총생산(Regional GDP)을 추계한다. 이 때, 통계청, 『인구주택총조사』는 5년 단위로 조사되기 때문에 표학길·이근희(2018)와 마찬가지로 내삽법(Interpolation method)을 이용하여 연도별 값을 추정해 사용하였다.

지역별 총노동투입($L_{i,t}$)은 가장 긴 시계열 자료를 사용하기 위해 통계청, 『인구주택총조사』에서 1960년부터 2020년까지 5년 단위의 지역별 취업자 수를 내삽법을 통해 추정하여 사용하였다.

지역별 총자본스톡($K_{i,t}$)은 박희석(2010)을 따라서 전통적인 영구재고법(Perpetual inventory method)을 이용해 추정하였다. 이를 위해 필요한 지역별 투자변수($I_{i,t}$)는 통계청, 『국민계정』에서 전국 총고정자본형성(Gross fixed capital formation)¹¹⁾을 지역별 총생산으로 가중치를 두어 대리변수로 사용하였다. 영구재고법을 이용한 지역별 총자본스톡 추정은 다음과 같다. 먼저 초기 자본스톡($K_{i,0}$)은 감가상각률(δ)로 조정된 초기 총자본형성($X_{i,0}$)에 초기 투자액($I_{i,0}$)을 합해 구한다. 여기서 초기 총자본형성은 지역별 표본기간 동안 투자의 연평균 성장률¹²⁾인 g_i 을 이용해 $X_{i,0} = I_{i,0}/(\delta + g_i)$ 로 구한다. 감가상각률은 선행 연구들¹³⁾을 따라서 0.04로 고정하였다. 총자본스톡은 초기 자본스톡을 이용해서 다음과 같은 자본형성식을 따라 구한다.

$$K_{i,t} = (1 - \delta)K_{i,t-1} + I_{i,t}.$$

지역별 기온($T_{i,t}$)과 강수량($P_{i,t}$)은 기상청, 『기상자료개방포털』에서 시도별 대표 관측지점의 연평균기온(단위: °C) 및 합계강수량(단위: m) 자료를 구해 사용하

10) 산업분류는 표학길·이근희(2018)에 따라 농림어업 및 광업은 1차, 제조업은 2차, 나머지 산업은 3차로 분류함.

11) 통계청의 정의에 따르면 ‘생산주체가 고정자산을 취득하는 것’이기 때문에 투자 변수로 사용하기에 적합한 것으로 보인다.

12) $g_i = (I_{i,n}/I_{i,0})^{1/(n-1)} - 1$, n 은 표본기간.

13) 서승환(2004), 박희석(2010).

였다. 대표 관측지점은 각각 서울, 부산, 인천, 강릉, 추풍령, 서산, 전주, 목포, 대구, 울산, 제주이다. 〈Table 1〉은 제주 지역을 대표로 하여 변수별 통계량을 보여준다.

〈Table 1〉 Summary Statistics in Jeju

Variable	Mean	STDV	Min	Max	Obs
$\ln Y_t$	28.887	1.255	26.686	30.585	60
$\ln L_t$	12.185	0.326	11.626	12.774	61
$\ln K_t$	29.615	1.850	26.123	31.912	60
T_t	15.716	0.640	14.6	17	61
P_t	1.463	0.374	0.773	2.526	61

(3) 회귀분석 결과

지역별 피해함수 추정 회귀식은 다음과 같다.

$$\Delta \ln Y_t = \beta_1 \Delta T_t + \beta_2 \Delta T_t^2 + \beta_3 \Delta P_t + \beta_4 \Delta P_t^2 + \eta \Delta \ln K_t + \theta \Delta \ln L_t + \varepsilon_t,$$

ε_t 는 오차항이다. 〈Table 2〉는 추정 결과를 보여준다.

추정결과는 대부분의 지역에서 정성적으로 같은 양상을 보인다. 온도(T_t)는 전복을 제외하고는 전부 총생산(Y_t)과 오목한 관계를 보인다. 특히 제주지역에서는 본항과 제곱항 모두 통계적으로 유의미한 값을 보이고 있다. 예를 들어 이전기와 온도의 차이 자체가 2.5℃ 증가하면 총생산의 경우 이전기와의 성장률 차이 자체가 -1.625%p 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 총자본형성은 모든 지역에서 유의한 결과를 보여주고 있고, 총노동투입은 자본만큼은 아니지만 서울, 부산, 경기, 제주 지역 같은 경우에 통계적으로 유의한 결과를 보여준다. 반면 강수량(P_t)의 경우 유의미하지 않은 결과를 보여주고 있다.

(Table 2) Estimation of Damage Function by Region

Region	Seoul	Busan	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Kyungpook	Kyungnam	Jeju
ΔT_t	0.011 (0.015)	0.009 (0.021)	0.015 (0.014)	0.033 (0.030)	0.012 (0.008)	0.017 (0.013)	-0.012 (0.017)	0.048* (0.028)	0.015 (0.013)	0.025 (0.018)	0.051** (0.020)
$\Delta T_t^{2_i}$	-0.007 (0.005)	-0.011 (0.010)	-0.014* (0.007)	-0.012 (0.012)	-0.023 (0.015)	-0.022* (0.012)	0.009 (0.011)	-0.032* (0.018)	-0.005 (0.005)	-0.007 (0.007)	-0.023** (0.011)
ΔP_t	-0.019** (0.008)	-0.016 (0.012)	-0.012 (0.016)	-0.003 (0.020)	0.046 (0.046)	0.001 (0.021)	-0.021* (0.012)	0.004 (0.018)	-0.015 (0.016)	-0.004 (0.010)	-0.003 (0.011)
$\Delta P_t^{2_i}$	-0.004 (0.012)	-0.002 (0.030)	-0.000 (0.023)	0.017 (0.039)	-0.052 (0.088)	-0.019 (0.044)	0.044 (0.038)	0.124 (0.130)	-0.003 (0.040)	0.047 (0.030)	0.006 (0.017)
$\Delta \ln K_t$	0.510*** (0.046)	0.475*** (0.085)	0.551*** (0.071)	0.610*** (0.129)	0.595*** (0.075)	0.672*** (0.070)	0.566*** (0.051)	0.694*** (0.121)	0.588*** (0.059)	0.714*** (0.069)	0.536*** (0.057)
$\Delta \ln I_t$	0.468*** (0.090)	0.728*** (0.182)	0.494*** (0.179)	0.111 (0.381)	0.319 (0.235)	0.126 (0.262)	0.435* (0.231)	-1.423 (0.926)	0.225 (0.258)	0.107 (0.194)	0.749*** (0.236)
Obs	59	53	59	59	59	51	59	59	59	53	59
R^2	0.936	0.833	0.851	0.537	0.698	0.802	0.723	0.569	0.784	0.838	0.818

Note: Standard deviations in parentheses. *, **, *** significant levels of 0.1, 0.05, and 0.01, respectively.

(4) 탄소 민감도 추정

(3)를 통하여 온도(T_t) 함수로 유도한 피해함수 추정식을 가정2에서 정의한대로 탄소배출량(S_t)의 함수로 전환이 필요하다. 이를 위해 GHKT 모형에서 사용되었던 아래의 온도함수 형태를 가정하여 제주의 온도(T_t)와 제주 탄소배출량(S_t)의 관계를 설정하였다.

$$T_t \equiv T(S_t) = \lambda \ln(S_t/\bar{S})/\ln 2.$$

\bar{S} 는 산업화 이전 제주도 대기 중의 이산화탄소 축적량을 나타내고 T_t 는 산업화 이전대비 t 기의 온도 변화량을 의미한다. 하지만 문제는 제주도의 이산화탄소 시계열 데이터(S_t)가 1990년 이후로만 존재한다. 짧은 시계열 문제를 극복하기 위해서 제주도 대신 전국 단위의 온도와 이산화탄소 데이터를 사용하여 탄소민감도(λ)를 추정하였다. 전국 단위의 S_t 시계열 데이터는 World Resources Institute, PIK에서 제공하는 1980년부터 2019년까지의 이산화탄소 축적량을 사용하였다. 산업화 이전 대기 중 이산화탄소 축적량(\bar{S})은 1980년부터 1989년까지의 평균값인 2.346Gtc (이산화탄소 환산 기가톤) 값을 사용하였다. 결과는 <Table 3>에 나타나 있다.

<Table 3> λ Estimation

	T_t
$\ln(S_t/\bar{S})/\ln 2$	0.335***
R^2	0.686

Note: *** significant at the 1% level.

Resource: World Resources Institute, PIK.

(5) 피해계수 추정

제주도 피해계수(γ)는 마지막으로 온도의 함수로 표현된 피해함수($D(T)$)와 탄소의 함수로 표현된 온도함수($T(S)$)의 조합으로 추정할 수 있다. 따라서 γ 의 추정

은 $D(T)$ 와 $T(S)$ 함수를 결합하고 산업화 이전 대비 섭씨 3도 증가 가정을 통해 다음의 방정식과 같은 방법으로 도출하였다.

$$\exp(-\gamma[T^{-1}(3) - \bar{S}]) = D(3) = \exp(\hat{\beta}_1 \cdot 3 + \hat{\beta}_2 \cdot 3^2).$$

(3) 장에서 보고된 것처럼 강수량은 피해함수에 통계적으로 유의한 영향을 끼치지 않아서 피해함수 정의역의 원소로 포함하지 않았다. 이를 통해 도출된 제주의 피해계수는 다음과 같다. $\gamma = 4.647 \cdot 10^{-5}$. 이는 GHKT 모형의 벤치마크 글로벌 피해계수인 $\gamma = 2.38 \cdot 10^{-5}$ 보다 약 두 배가량 높은 수치임을 확인할 수 있다.

강건성 검증을 위해 제주도에서의 피해함수를 제주도만의 특성을 고려하여 다시 회귀분석하고 그 결과를 바탕으로 다시 피해계수(γ)를 도출하였다. 제주도의 지역적 특징은 크게 두 가지가 존재한다. 일단 회귀분석에 핵심적 역할을 하는 총노동투입($L_{i,t}$)의 경우 제주도는 주민등록상 인구 외에도 관광 관련 산업이 체류인구에 미치는 영향이 다른 지역에 비해 월등히 높다. 또한 경기순환의 측면에서도 특이성을 지닌다. 2011~2017년 무렵 고성장¹⁴⁾에 힘입어 내국인 인구유입이 증가하였고, 제주자치도의 정책적 일환으로 외국인, 특히 중국인의 직접 투자 관련 개발이 추진되었다. 이로 인해 건설업을 비롯한 관광 관련 개발사업의 급격한 증가는 제주지역 내 단기/중기적 경기과열을 발생시켰다. 이러한 특징들을 고려한 제주도의 피해함수 추정을 다음과 같이 수행하였다. 제주도만의 특성들을 최소화하기 위해서 우선 2010년 이전의 데이터만 사용한 회귀분석을 하였다. (Version(1)) Version(2)에서는 회귀방정식에 2010년 이후 데이터는 '1'인 Dummy 변수를 추가하였다. Version(3)에서는 Dummy와 온도 관련 변수의 cross-term을 대신 추가하였다. 수정(4)에서는 제주도 건설업의 부가가치 성장률을 또 다른 변수로 회귀방정식에 추가하였다.¹⁵⁾ 관광객 유입의 영향을 고려하기 위해 Version(5)의 방정식에는 제주도 총 관광객 입도수 증가율을 추가하였다.¹⁶⁾ 마지막으로 Version(6)에서는 제주

14) 제주지역 연평균 GRDP 성장률은 6.4% (2015년 기준년, 실질 기준)이며, 동 기간 전국 GDP 성장률(3.1%)를 3.3%p 상회

15) 제주도 건설업 변수($g_{construct}$)의 출처는 통계청 자료 중 지역소득이며 기간은 1985-2020이다.

16) 관광객 입도수는 전체관광객, 국내관광객, 외국인관광객을 목적 및 국적별로 따로 보고되며

도에서의 건설업 성장률 및 관광객수 증가율을 대신 추가하였다. 결과는 다음 〈Table 4〉에 나타나 있다.

〈Table 4〉 Damage Function Estimation in Jeju (Robustness Check)

Jeju	〈Table 2〉	Version (1)	Version (2)	Version (3)	Version (4)	Version (5)	Version (6)
ΔT_t	0.051** (0.020)	0.062*** (0.022)	0.051** (0.020)	0.060*** (0.021)	0.076** (0.033)	0.146 (0.114)	0.085 (0.048)
$\Delta T_t D_{2010}$				-0.106 (0.088)			
ΔT^{2t}	-0.023** (0.011)	-0.031*** (0.012)	-0.024** (0.011)	-0.030** (0.012)	-0.036*** (0.013)	-0.034 (0.040)	-0.024 (0.016)
$\Delta T^{2t} D_{2010}$				0.054* (0.031)			
ΔP_t	-0.003 (0.011)	0.003 (0.013)	-0.004 (0.011)	0.000 (0.011)	0.001 (0.009)	0.002 (0.011)	0.007 (0.007)
ΔP^{2t}	0.006 (0.017)	-0.006 (0.019)	0.005 (0.017)	0.000 (0.016)	-0.025* (0.014)	0.018 (0.018)	-0.009 (0.012)
$\Delta \ln K_t$	0.536*** (0.057)	0.557*** (0.085)	0.546*** (0.059)	0.545*** (0.060)	0.370*** (0.132)	0.493** (0.238)	0.540** (0.227)
$\Delta \ln L_t$	0.749*** (0.236)	0.596* (0.300)	0.665** (0.281)	0.682*** (0.245)	0.870** (0.324)	0.080 (0.710)	0.325 (0.520)
D_{2010}			0.006 (0.012)				
$g_{construct}$					0.249*** (0.045)		0.170*** (0.035)
$tour_{total}$						0.263 (0.151)	0.086 (0.073)
Obs	59	49	59	59	34	19	19
R^2	0.818	0.832	0.819	0.830	0.859	0.862	0.937

Note: Standard deviations in parentheses. *, **, *** significant levels of 0.1, 0.05, and 0.01, respectively.

Version (5) 와 Version (6) 의 결과 모든 기후변수의 통계적 유의성이 떨어지게 나온 점은 제주도로 유입되는 관광객의 규모나 증가율이 피해함수 추정에 큰 영향을

미치는 않는다는 것을 보여준다. 따라서 γ 의 강건성 검증에는 포함하지 않았다. Version (1) 부터 (4) 까지의 결과를 바탕으로 재추정한 γ 의 값은 <Table 5>에 보고되어 있다.

<Table 5> Jeju's γ (Robustness Check)

Variable	Version (1)	Version (2)	Version (3)	Version (4)	(Table 2)
$\hat{\beta}_1$	0.062	0.051	0.06	0.076	0.051
$\hat{\beta}_2$	-0.031	-0.024	-0.03	-0.036	-0.023
γ	8.003e-5	5.421e-5	7.745e-5	8.261e-5	4.647e-5

위에 잘 나타나 있듯이 제주도의 특성을 고려한 피해함수 모형에서 제주의 피해계수는 주로 두 배 정도 증가하는 것으로 나타난다. 이러한 결과들은 제주도만의 특징(체류인구의 상대적 중요성, 2010년 이후의 경기순환)들이 기후변화의 피해계수를 과소평가하는 요인이 될 수 있음을 의미한다.

마지막으로 추정된 피해함수를 통해서 기후변화가 제주도 지역의 TFP에 얼마나 많은 피해를 유발하는지 추론해 볼 수 있다. <Figure 1>은 <Table 5>에 추정된 각각의 γ 을 바탕으로 제주도의 산업화 이전 대비 평균온도변화가 섭씨 0도에서 2도까지 증가할 경우 제주도지역의 연평균 TFP를 얼마나 감소시키는지 보여주고 있다.

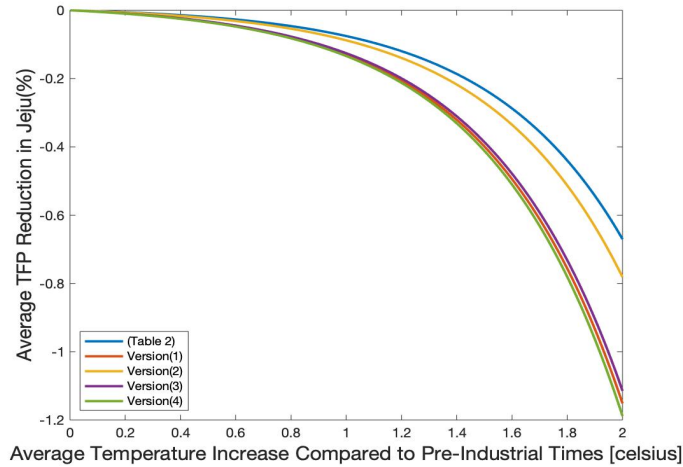
<Figure 1>에서 볼 수 있듯이 제주의 연평균 총요소생산성 감소량은 산업화 대비 평균온도의 증가량에 반비례함을 알 수 있다. 주목할 점은 이러한 생산성의 감소는 평균온도의 증가가 높아질수록 더 빠르게 나타난다는 것이다. 이는 GHKT 모형과 정성적으로 일치하는 결과이며 모형에서의 피해함수가 모두 지수함수의 형태로 가정된 것에 기인한다.

<Table 6>는 IPCC 및 UN의 기후변화 관련 목표인 산업화 대비 섭씨 1.5도 이내 증가를 제주도에서도 적용했을 때 제주도의 TFP 피해를 <Table 5>에서 추정된 γ 별로 보여주고 있다.

결과적으로 제주도가 전 세계적 기후변화 관련 목표치인 섭씨 1.5도 증가를 달성했을 때 본 모형은 연평균 지역 TFP가 약 0.2~0.4% 정도 감소할 것으로 추정하고 있다. 이는 표면적으로 큰 위험으로 보이지는 않을 수 있다. 하지만 누적 피해가 수십 년간 지속될 경우 상당한 피해로 이어질 수 있음을 간과해서는 안 된다. 예를

들어 제주도의 연평균 온도가 2050년까지 1.5도 증가하고 그 이후 2100년까지 전혀 기온상승을 겪지 않는다고 가정해보자. 기술발전을 가정하지 않는다는 전제하에 제주도의 2100년 TFP는 2050년 대비 80~90% 정도까지 감소한다는 의미이다.

〈Figure 1〉 The effects of climate change on Jeju's TFP



〈Table 6〉 Expected reduction in TFP(%) as when the average annual temperature of Jeju increases by 1.5 degrees Celsius compared to pre-industrialization level

Variable	Version (1)	Version (2)	Version (3)	Version (4)	(Table 2)
γ	8.003e-5	5.421e-5	7.745e-5	8.261e-5	4.647e-5
TFP Reduction (%)	0.39%	0.27%	0.38%	0.41%	0.23%

V. 제주도에서의 탄소의 사회적 비용

1. 제주도의 기후변화 피해비용 추정

제IV장에서 추정된 모수값들을 식 (4)에 적용해서 제주도의 기후변화 관련 거시 피해비용, 더 정확하게는 GRDP 대비 총 SCC를 도출할 수 있다. 피해계수 γ 의 추정값은 〈Table 2〉를 기반으로 추정된 값을 벤치마크로 사용하고 〈Table 5〉에서 추정된 다른 값들도 적용해보았다. 시간할인율은 Nordhaus 할인율인 $\beta = 0.985$ 를

사용하였으며, 탄소순환계수들은 IV장에서 추정된 값을 사용하였다. 최적 SCC를 따로 추출하기 위해 2019년 제주도의 명목 GRDP(약 20.3조)를 식 (4)에 적용하였으며 탄소 1톤당 SCC 추정을 위해서 역시 2019년 기준 제주도에서의 총 탄소배출량(약 125.4만톤)을 사용하였다. 아래의 〈Table 7〉에 결과가 정리되어 있다.

〈Table 7〉 Average annual SCC in Jeju by γ

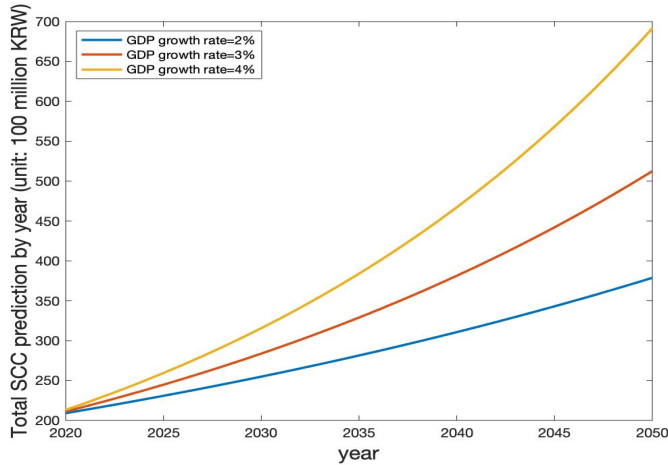
Variable	Version (1)	Version (2)	Version (3)	Version (4)	(Table 2)
γ	8.003e-5	5.421e-5	7.745e-5	8.261e-5	4.647e-5
Total SCC (unit: 100 million KRW)	353.1	239.2	341.7	364.5	205
SCC per ton of carbon (unit: one thousand KRW)	28.16	19.07	27.25	29.07	16.35

우선 벤치마크 피해계수(γ)를 사용하여 추정한 제주지역 SCC는 약 205억 원 수준으로 나타난다. 제주지역만의 특성인 2010년 이후의 급격한 인구유입, 건설 및 관광산업 호황을 통제하여 추정된 γ 값(〈Table 5〉에서 Version(1)~(4)의 값)을 사용하였을 때는 그 값이 대체적으로 100억 정도 증가하는 것으로 나타난다. 이를 탄소 1톤당 SCC로 변환하면 일반적으로 제주도에서 1톤당 탄소배출의 거시피해비용은 약 16,000~29,000원 사이로 추정이 되었다. 이는 최근 한국에서 1톤당 탄소배출권의 가격이 약 2만 원대에서 거래되고 있음을 고려할 때 크게 시장가격과 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 다만 기존의 해외 연구결과에서 도출된 1톤당 최적탄소세와 비교해보았을 때는 상대적으로 적은 수치임을 알 수 있다. Nordhaus and Boyer (2000)에서는 1톤당 최적탄소세가 미화로 30불, Golosov et al. (2014)에서는 미화로 약 57불 정도로 나왔다. 이러한 결과에는 여러 가지 이유가 있겠지만 역시 제주도에서의 피해계수(γ), 온도함수의 탄소민감도(λ), 탄소순환계수(ϕ_L, ϕ_0, ϕ)가 기존 연구들에서 추정된 값과 다른 점이 주요 이유라 하겠다.

〈Table 7〉의 결과를 기준으로 2050년까지 예측되는 제주도에서의 SCC도 도출하였다. 〈Figure 2〉는 제주도에서 GRDP의 연평균 성장률을 2, 3, 4%로 가정하여 각 시나리오 별로 기후변화의 총 SCC가 어떻게 변화하는지 보여준다. 연평균 GRDP 성장률을 2%로 가정했을 때 2019년 기준 약 200억 가량의 총 SSC는 2050년까지 약 370억까지 증가하는 것으로 나타난다. GRDP 성장률이 크면 클수록 미

래의 비용이 더 빠르게 증가하는 것도 쉽게 볼 수 있다. 이는 역시 식 (4)에서 나타나듯이 GRDP 대비 SCC가 일정한 상수로 모형에서 결정됨에 기인한다.

〈Figure 2〉 SCC predictions in Jeju



2. 강건성 검증

제IV장에서 설명된 바와 같이 통합기후모형에서 시간할인율은 SCC를 추정하는데 핵심적인 요소라 할 수 있겠다. 직관적으로 미래에 기후변화로 인해 발생할 피해비용을 현재가치로 환산할 때 중요한 역할을 하기 때문이다. 윤리적으로 미래세대가 겪을 피해를 현재보다 낮게 추정하는 것은 올바르지 않다는 이유로 많은 기후경제학자들은 상대적으로 굉장히 낮은 할인율을 적용해야 한다고 주장한다.

그러나 또 한편으로는 통합기후모형 자체가 시간할인율이 적용되는 상황에서 동태적 최적화를 하는 대표자를 분석하는 거시모형에 기반을 두기 때문에 거시경제모형에서 사용하는 시간할인율 추정방법을 사용하는 것이 내재적 일관성(internal consistency)이 있는 방법이라 주장하기도 한다.

전자의 예가 Stern (2007) 이고 후자의 예가 Nordhaus (1992) 라 하겠다. 본 연구에서는 이 두 가지 방법론의 정당성 분석은 열외로 두고 모두 적용하였다. 현재까지 결과들은 모두 학계에서 좀 더 많이 사용되는 Nordhaus 할인율($\beta = 0.985$)을 적용하였다. 이번 장에서는 Stern 할인율($\beta = 0.999$)을 적용하여 추정한 제주의

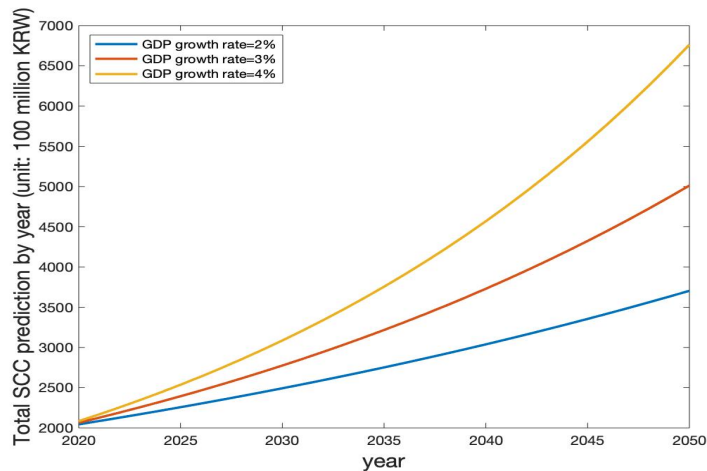
탄소배출 관련 외부효과 비용 및 예측을 보고하도록 한다. 결과는 〈Figure 3〉 그리고 〈Table 8〉에 나타나 있다. 추정방법은 기존과 동일하고 오로지 시간할인율만 더 높게 ($\beta = 0.999$) 적용되었다.

〈Table 7〉과 〈Table 8〉을 비교해보면 Stern 할인율 적용은 총 SCC나 1톤당 SCC 측면 모두에서 약 10배가량 증가한 것을 관찰할 수 있다. 예를 들어 제주도의 경우 1톤당 SCC는 약 16~28만원 범위 내의 수치로 증가했으며 이는 Nordhaus (2000) 이나 Golosov et al. (2014) 에서 Stern 할인율을 적용했을 때 나타나는 최적 SCC의 증가비율과 유사한 패턴을 보인다. 참고로 두 논문 모두에서 Stern 할인율을 적용했을 때 최적 탄소세의 가격도 미화로 약 250불에서 500불의 범위 내에서 추정되었다. 미래의 기후변화 관련 피해비용 예측치도 〈Figure 2〉와 〈Figure 3〉를 비교해보면 알 수 있듯이 Stern 할인율을 적용하면 약 10배가량 증가하는 것으로 나타난다.

〈Table 8〉 SCC in Jeju by γ (Stern's discount rate)

Variable	Version (1)	Version (2)	Version (3)	Version (4)	(Table 2)
γ	8.003e-5	5.421e-5	7.745e-5	8.261e-5	4.647e-5
Total SCC (unit: 100 million KRW)	3,465	2,348	3,354	3,577	2,012
SCC per ton of carbon (unit: one thousand KRW)	276.4	187.2	267.4	285.3	160.5

〈Figure 3〉 SCC predictions in Jeju (Stern discount rate)



VI. 결 론

이미 제주도는 전 지구 평균기온의 상승치를 상회하는 온난화 추세를 보이고 있다. 재해 관련 위험도가 높아지고 있는 실정에서 제주도의 기후변화 영향에 관한 종합적이고 정량적 분석은 더욱 절실한 실정이다. 국내 기후변화 영향 연구는 일부 산업 등에 미치는 개별효과 중심으로 이루어져 왔으나, 통합기후모형을 통한 기후변화의 종합적인 피해비용 산정은 아직 미미한 상태이다. 기후변화에 대한 적극적인 편익 추정은 미래에 발생할 보다 큰 비용 저감에 기여할 수 있으며, 기후변화 적응과 관련한 국내의 조기 대응 체계를 구축하고 관련 국제 협상에서의 우위를 확보하는데 큰 역할을 할 수 있다.

이러한 배경하에 제주도 기후변화의 경제적 비용에 대한 종합적이고 체계적인 경제학적 분석은 제주도의 특성에 맞는 기후변화 적응 및 완화 정책 수립을 위해서 매우 중요하다. 영국, 미국, 멕시코, 호주 등도 각국의 지역별 상황에 맞는 경제학적 분석 보고서를 발간하여 기후변화에 적극 대응하는 추세이다. 이에 발맞추어 제주도의 기후변화 실정에 맞는 탄소의 사회적 비용을 최신 Golosov et al. (2014) 모형을 통하여 추정하는 것이 본 연구의 주요목적이라 하겠다.

결과는 정성적으로 기존의 연구결과들과 비슷하다. 탄소배출로 인한 평균기온의 증가는 제주의 총요소생산성(TFP)에 부정적 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 제주도에서의 평균온도가 산업화 이전 보다 1.5°C 상승한다면 연평균 TFP는 약 0.2~0.4% 정도 감소하는 것으로 추정되었다. 이는 표면적으로 미미한 영향으로 보일 수 있다. 하지만 기후변화로 인한 피해가 누적됨을 고려하면 TFP 감소는 상당할 수 있음을 함축한다. 예를 들어 UN 및 국제기구들의 목표처럼 제주도의 연평균 온도가 2050년까지 1.5도 증가하고 그 이후 2100년까지 전혀 상승하지 않는다고 가정해보자. 기술발전을 가정하지 않는다는 전제하에서 제주도의 2100년 TFP는 기후변화로 인해 2050년 대비 80~90% 정도까지 감소한다는 의미이다.

2019년 제주 지역내총생산(GRDP)을 기준으로 도출된 연평균 제주의 탄소배출 사회적 총비용은 약 205~365억 원 정도로 추정되었다. 이는 제주GRDP의 약 0.1~0.2% 수준(2019년 기준)이다. 그러나 미래 제주의 SCC를 도출해보니(연간 GRDP성장률 2% 가정시) 이는 2050년경 370~700억까지 증가하는 것으로 나타났다.

추가로 해외 연구결과와 비교를 위해 SCC를 탄소 1톤당 외부효과로 전환하여 비교해보았다. 제주도에서 탄소배출 1톤의 거시적 피해비용은 약 16,000~29,000원으로 추정이 되었다. 이는 최근 한국에서 실제로 거래되고 있는 탄소배출권 가격 수준과 유사하다. 다만 기존의 해외 연구결과에서 제시한 1톤당 최적 탄소세 보다는 상대적으로 낮은 수준이다. Nordhaus and Boyer(2000)에서는 1톤당 최적 탄소세가 미화로 30불, Golosov et al. (2014)에서는 미화로 약 57불 정도로 제시하였다. 이러한 피해비용의 차이에는 여러 가지 이유가 있겠지만 역시 제주도에서의 피해계수(γ), 온도함수의 탄소민감도(λ), 탄소순환계수(ϕ_L, ϕ_0, ϕ)가 기존 연구들에서 추정된 값과 다른 점이 주요 이유라 하겠다.

또한 추가 강건성 검증을 위해 수행한 Stern(2007)의 시간할인을 적용 결과 기존 해외 연구 결과들과 비슷하게 총 SCC나 탄소 1톤당 SCC가 약 10배가량 증가하는데 이는 미래세대가 짊어질 기후변화 관련 피해비용의 현재가치가 증가하여 나타나는 직관적인 결과라 할 수 있다.

마지막으로 본 연구의 방법론은 여러 가지 방면으로 확대가 가능하다. 중요한 예로는 ‘극한기상(extreme weather)’의 피해비용 추정이 있겠다. 최근 해외연구들은 장기적 기후변화의 지속적 경제피해보다는 그 속에서 꾸준히 증가하고 있는 단발적인 ‘극한기상’ 현상의 경제적 비용에 초점을 맞추는 것이 더 시급한 과제라고 지적하고 있다.¹⁷⁾ 본 연구의 방법론은 이러한 ‘극한기상’의 경제적 피해비용 추정에도 쉽게 적용될 수 있다. 한 예로 모형의 피해함수에 ‘극한기상’ 현상의 대체변수로 기온 및 강수량의 분산을 추가하여 SCC를 추정하는 방법이 있을 수 있겠다. 또 다른 방법으로는 소비자 효용함수를 미래 불확실성에 직접적인 영향을 받는 Epstein and Zin(1989) 함수로 대체하여 ‘극한기상’ 현상의 피해 비용을 추정 하는 것이 있다. 어떠한 방식이든 본 연구의 방법론을 바탕으로 분석이 가능한 연구가 될 수 있을 것이다.

17) Pindyck (2013).

■ 참 고 문 헌

1. 강종구, “가계부채가 소비와 경제성장에 미치는 영향: 유량효과와 저장효과 분석,” BOK 경제연구 제2017-1, 2017, 한국은행.
(Translated in English) Kang, Jong Ku, “The Effects of Household Debt on Consumption and Economic Growth: Flow Effect and Stock Effect,” *BOK Economic Analysis*, Vol. 23, No. 2, 2017.
2. 권오상 · 강성원 · 이승호, “한국형 상 · 하향 통합모형을 이용한 농업 부문의 온실가스 감축 비용 추정,” 『환경정책』, 제25권 제2호, 2017, pp.61-85.
(Translated in English) Kwon, Oh-Sang, Sung Won Kang, and Seung-Ho Lee, “Estimating the Mitigation Costs for Agricultural Greenhouse Gases: A Combined Top-Down and Bottom-Up Model for Korea,” *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 25, No. 2, 2017, pp.61-85.
3. 김용건 외, “온실가스 감축정책 평가를 위한 환경경제모형 개발 · 운용(II),” 사업보고서, 2015.
(Translated in English) Kim, Young Gun et al., “Development and Operation of IAM for Greenhouse Gas Abatement (II),” Policy Report, Korea Environment Institute, 2015.
4. 박희석, “우리나라 주요 시 · 도의 총요소생산성 추정,” 『서울도시연구』, 제11권 제4호, 2010, pp. 1-13.
(Translated in English) Park, Hee-Seok, “Estimation the Total Factor Productivity of Sixteen Regions in Korea,” *Seoul Studies*, Vol. 11, No. 4, 2010, pp. 1-13.
5. 서승환, “서울시 경제의 국민경제적 위상에 관한 연구,” 『서울도시연구』, 제5권 제2호, 2004, pp. 69-89.
(Translated in English) Suh, Seoung Hwan, “Research on The Economic Status of Seoul in Korea,” *Seoul Studies*, Vol. 5, No. 2, 2004, pp. 69-89.
6. 오희나 · 홍종호, “디지털 전환의 기후효과,” 『한국경제포럼』, 제14권 제4호, 2022: pp. 1-24.
(Translated in English) Hyungna Oh and Jongho Hong, “Climate effects of digital transformation,” *The Korean Economic Forum*, Vol 14, No 4, pp. 1-24.
7. 제주특별자치도관광협회, 『제주관광통계』.
(Translated in English) Jeju Tourism Statistics, Jeju Tourism Association World Resources Institute, PIK, *GHG EMISSIONS*.
8. 전성우 외, “기후변화 통합영향평가모형 체계 개발: 정책연계모형개발을 중심으로,” 한국 환경정책 평가연구원, 2010.
(Translated in English) Jeon, Seoung-U et al., “Development of Policy Oriented Integrated Assessment Model,” Korea Environment Institute, 2010.
9. 채여라 · 조현주, “기후변화 적응대책 우선순위 평가 방법론 분석,” 한국환경정책 · 평가연구원, 2011.
(Translated in English) Chae, Yeora, and Hyun Joo Cho, “Analysis of Methodologies for Prioritizing Climate Change Adaption Measures,” Korea Environment Institute, 2011.
10. 채여라 외, “우리나라 기후변화의 경제학적 분석(III),” 한국환경정책평가연구원, 2012.
(Translated in English) Chae, Yeora et al., “Economic Analysis of Climate Change in

- Korea (III), " Korea Environment Institute, 2012.
11. 통계청, 『경제활동인구조사』.
(Translated in English) Statistics Korea, *Economically Active Population Survey*.
12. _____, 『국민계정』.
(Translated in English) Statistics Korea, *National Account*.
13. _____, 『인구주택총조사』.
(Translated in English) Statistics Korea, *Population Census*.
14. _____, 『지역소득』.
(Translated in English) Statistics Korea, *Regional GDP*.
15. 표학길 · 이근희, "한국의 지역별 국내총생산(RGDP)의 간접추계," 『경제논집』, 제57권, 2018, pp. 119-152.
(Translated in English) Pyo, Hak K., and Keun Hee Rhee, "Indirect Estimation of Regional Gross Domestic Product(RGDP) in Korea," *Korean Economic Journal*, Vol. 57, No. 2, 2018, pp. 119-152.
16. 환경부, 『한국 기후변화 평가 보고서』, 환경부, 2009.
(Translated in English) Ministry of Environment, *Korea Climate Change Assessment Report*, Ministry of Environment, 2009.
17. Adams, Richard M., "Global Climate Change and Agriculture: An Economic Perspective," *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 71, No. 5, 1989, pp. 1272-1279.
18. Adams, Richard M., Bruce A. McCarl, Daniel J. Dudek, and J. David Glyer, "Implications of Global Climate Change for Western Agriculture," *Western Journal of Agricultural Economics*, Vol. 13, No. 2, 1988, pp. 348-356.
19. Anthoff, David and Richard S. Tol, "The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation, and Distribution (FUND): Technical Description, Version 3.8." FUND Doc, 2014.
20. Archer, David, "The Fate of Fossil Fuel CO₂ in Geologic Time," *Journal of Geophysical Research*, 110(C9), 2005.
21. Archer, David et al., "Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 37, No. 1, 2009, pp. 117-134.
22. Dell, Melissa, Benjamin F. Jones, and Benjamin 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. Epstein, G. Larry and Stanley E. Zin, "Substitution, Risk Aversion, and the Temporal Behavior of Consumption and Asset Returns: A Theoretical Framework," *Econometrica*, Vol. 57, No. 4, 1989, pp. 937-969.
24. Golosov, Mikhail, John Hassler, Per Krusell, and Aleh Tsyvinski, "Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium," *Econometrica*, Vol. 82, No. 1, 2014, pp. 41-88.
25. Hope, Chris, John Anderson, and Paul Wenman, "Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model," *Energy Policy*, Vol. 21, No. 3, 1993, pp. 327-338.

26. Hope, Chris, "Critical Issues for the Calculation of the Social Cost of CO₂: Why the Estimates from PAGE09 are Higher than Those from PAGE2002," *Climate Change*, Vol. 117, 2012, pp.531-543.
27. Kalkuhl, Matthias and Leonie Wenz, "The Impact of Climate Conditions on Economic Production. Evidence from a Global Panel of Regions," *Journal of Environmental Economics and Management*, 103, 102360, 2020.
28. Kokoski, Mary F., and V. Kerry Smith, "A General Equilibrium Analysis of Partial-Equilibrium Welfare Measures: The Case of Climate Change," *The American Economic Review*, Vol. 77, No. 3, 1987, pp.331-341.
29. Mendelsohn, Robert, William D. Nordhaus, and Daigee Shaw, "The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis," *American Economic Review*, Vol. 84, No. 4, 1994, pp.753-771.
30. Nordhaus, William, "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases," *Science*, 258(5086), 1992, pp.1315-1319.
31. Nordhaus, William, "Integrated Economic and Climate Modeling," In *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, edited by Peter B. Dixon and Dale W. Jorgenson, 1069-131. Elsevier publishing, 2013.
32. Nordhaus, William and Joseph Boyer, *Warming the World: Economic Modeling of Global Warming*, MIT press, Cambridge, MA, 2000.
33. Pindyck, Robert, "Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us" *Journal of Economic Literature*, Vol. 51, No. 3, 2013, pp.860-870.
34. Stern, Nicholas, *Stern Review: The Economics of Climate Change*, UK, 2007.

Estimation of Social Cost of Carbon in Jeju Island: An Integrated Assessment Model Approach*

Kuk Mo Jung** · Daseul Hwang***

Abstract

In Korea, most research on the economic effects of climate change is limited to partial analyses of climate change on individual industries and sectors. Estimates on aggregate costs of externality caused by climate change *a. k. a. the social cost of carbon through* a lens of the Integrated Assessment Model (IAM) are rare. Based on recent IAM proposed by Golosov, Hassler, Krusell, and Tsyvinski (2014) this study estimates the social cost of carbon in Jeju Island for the first time in Korea. We find that social cost of carbon in Jeju Island based on year 2019 are estimated between ₩20.5 and ₩36.5 billion. These results amount to the social cost of carbon of a range from ₩16,000 to ₩29,000 per ton carbon in Jeju Island.

Key Words: climate change, social cost of carbon, integrated assessment model, optimal carbon tax

JEL Classification: Q10, Q54, Q58

Received: May 25, 2022. Revised: June 13, 2022. Accepted: June 20, 2022.

* The authors acknowledge that this article is a revised version of a research report of Bank of Korea's Jeju branch, written by the authors. The report is also titled as "Estimation of Social Cost of Carbon in Jeju Island: An Integrated Assessment Model Approach". The authors would like to thank JiYong Jung, Taewoong Cho, and Minjung Kwark for excellent research assistance.

** Corresponding Author, Associate Professor, School of Economics, Sogang University, 35 Baekbeom-ro, Mapo-gu, Seoul 04107, Korea, Phone: +82-2-705-8525, e-mail: kmjung@sogang.ac.kr

*** Co-Author, Manager, Jeju Economic Research Team, Bank of Korea, 20, Bokji-ro 1-gil, Jeju 63220, Korea, Phone: +82-64-720-2514, e-mail: dshwang@bok.or.kr