

기후변화의 경제학

인 소 영* · 박 기 영**

요약

본 논문은 경제학 전공자를 대상으로 기후변화에 대한 관심을 환기하고, 현재 논의되고 있는 주요 의제에 대한 정보를 제공하고자 기후변화에 대해 확립된 과학적 사실과 경제 및 경제학과 연관된 분야에 대해서 개괄적으로 소개한다. 먼저 문답의 형식으로 기후변화에 대한 과학적 합의, 기후변화 관련 리스크와 대책들, 국제간 공조의 필요성, 우리나라의 상황에 대해 논의한다. 후반부는 기후변화와 관련된 경제학의 역할에 대해서 논의한 뒤 기후변화 분야에서 널리 쓰이는 통합평가모형(IAM), 탄소 가격제와 관련하여 탄소세와 배출권 제도, 기후금융, 최근 논의가 늘고 있는 기후 스트레스 테스트와 그린뉴딜에 대해 살펴 본다. 우리나라의 경우 기후위험 관련하여서 물리적 리스크는 작으나 좌초자산의 문제, 국경간 탄소 조정의 가능성 등으로 인해 이행 리스크가 크므로 기후 리스크에 대한 신속한 대처와 관련 분야의 경제학 연구가 필요한 실정이다.

주제분류 : B030902, B030100

핵심 주제어 : 기후변화, 탄소가격, 그린뉴딜, 통합평가모형, 기후금융

I. 서론

2020년 풀리처상 분석 보도(explanatory reporting) 부문 수상자는 “2도: 한계를 넘은(2°C: Beyond)”이란 제목의 보도를 한 워싱턴 포스트에 돌아갔다.¹⁾ 이들은 170년 동안의 과거 기온 데이터를 이용해서 기온이 이

* 제1저자, 스탠퍼드 대학 Precourt Energy Institute, e-mail: si2131@stanford.edu

** 교신저자, 연세대학교 경제학부 교수, e-mail: kypark@yonsei.ac.kr

1) 풀리처상은 보도, 문학, 음악 분야 가장 저명한 상이며 수상 관련 기사는 다음 링크를 참조하시오.: <https://www.washingtonpost.com/pr/2020/05/04/washin>

미 섭씨 2도 이상 상승한 지역들의 삶을 분석하고 이미 극단적인 기후 변화가 전 지구상 10% 이상의 지역에서 일어나고 있으며 여러 측면에서 인간의 삶에 큰 영향을 미치고 있음을 보였다. 기후변화에 대해 큰 관심을 가지지 않았던 사람이라면 위의 기사를 보고 몇 가지 의문을 가질 것이다: 예를 들어, 기후변화는 실재하는가? 먼 미래의 일이 아니라 이미 일어나고 있는가? 왜 하필 2도 이상 상승한 지역을 분석했을까? 우리나라는 기후 위험으로부터 안전한가 등.

본 논문은 서베이 논문으로 다음의 목적을 가지고 있다. 먼저, 인류에게 닥쳐 오고 있는 심각한 위기인 기후변화에 대해 에너지/환경 이외의 분야를 전공한 경제학 연구자들의 관심을 환기하고자 한다. 기후변화에 관심을 가지고 있었지만 관련 문헌을 섭렵할 시간을 내지 못 했던 경제학 연구자들에게 짧은 시간 내에 관련 논의를 이해하고 경제학이 기여할 여지가 많음을 인식시킴으로써 기후변화에 대한 학문적 관심을 제고하고 관련 연구들을 추구하는 계기가 되고자 한다. 본 논문을 통해 앞에서 제기했던 질문들인 기후변화는 실재하는가, 왜 2도가 중요한가에 대한 이해는 물론, 기후변화와 경제, 경제학의 관계에 대한 이해를 제고하고자 한다.

기후변화는 매우 중요한 문제이나 그 중요성에 비례해서 해결하기가 쉽지 않다. 스텐 보고서(Stern, 2007)의 지적처럼 기후변화는 여타 인류가 직면한 다른 문제들과 네 가지 측면에서 구분된다. 유독 전지구적(global) 현상이며, 장기적 문제이자 그 여파가 지속적이며(long-term and persistent), 비가역적(irreversible)이며, 불확실성이 큰(uncertain) 문제인데 이 네 가지 요소 모두가 결합되어 있다는 측면에서도 다른 문제들과 구별된다.²⁾ 또한 Carney(2015)가 “시계의 비극(Tragedy of the Horizon)”이라 부른 것처럼 기후변화의 재앙적 효과가 정책입안자, 투자자 등을 포함한 현 세대의 시계(horizon)보다 훨씬 장기에 걸쳐 나타나기 때문에 현 세대와

gton-post-wins-2020-pulitzer-prize-explanatory-reporting-groundbreaking-climate-change-coverage/

2) “Almost uniquely *global*, uniquely *long-term and persistent*, uniquely *irreversible*, and uniquely *uncertain* - certainly unique in the combination of all four.” 이 네 가지 요소를 ‘Big Four’라고도 부르는데 Wagner and Weitzman(2015)는 ‘고통(suffering)’을 추가하자고 주장하며, 기후변화에 대해 상대적으로 적응을 하지 못 하는 저소득층이 더 큰 고통을 겪을 것이라 경고한다.

미래 세대 사이 동기의 비일관성과 미비한 대처를 초래하게 된다. 이에 더해 기후변화는 한 국가 내에서뿐만 아니라 국제간 공조에서도 무임승차 문제를 야기해 해결을 더 어렵게 한다. 이 짧은 논의에서도 쉽게 알 수 있듯이 기후변화의 특징에는 외부효과, 불확실성, 지역적/세대간 분배, 동태적 비일관성 등 경제학자들이 천착해 온 중요한 주제들이 망라되어 있으며 경제학자들이 기여할 분야가 산적해 있다.

기후변화의 중요성, 해결의 지 난 함, 그리고 경제학의 관련성에 비해 경제학자를 대상으로 한 정리된 형태의 관련 논의가 아직 부족하다는 점도 본 논문을 집필한 이유이기도 하다. 이런 맥락에서 경제학자의 시각에서 바라본 기후변화 문제를 문헌 연구의 형태로 관심 있는 경제학자들이 짧은 시간 안에 소화할 수 있게 유용한 정보를 제공하는 것도 의의가 있다고 하겠다. 해외의 경우에도 기후변화에 대한 경제학자의 연구는 많지만 관련 논의를 통합적으로 소개하는 논문은 거의 없다고 할 수 있다. Hsiang and Kopp (2018)은 경제학자를 위한 문헌연구 논문이나 기후변화의 자연과학적 측면 위주로 기술했으며, Nordhaus(2008)은 기후변화 관련 경제학적 모형이라 할 수 있는 통합평가모형(IAM: Integrated Assessment Model)에 대한 개념과 주요 식들, 기후변화 모형에서 중요한 역할을 하는 할인율(discount rate)을 설명하고 있으나 모형에 대한 개론적 차원의 소개에 집중하고 있으며, Pindyck(2013)은 IAM에 대한 비판적 고찰에 한정되어 있다. Nordhaus(2013), Wagner and Weitzman(2015)는 경제학자의 관점에서 기후변화 관련 주요 주제들을 살펴 보는 훌륭한 개괄서이나 일반 독자도 대상으로 하고 있기 때문에 경제학과 관련된 심도 있는 논의는 시도하지 않고 있다. Dell, Jones, and Olken(2014)은 기온, 강수량 등이 미치는 경제적 효과에 대해 인과적으로 파악한 연구들을 집중적으로 소개하고 있다. 이런 맥락에서 본 논문은 기후변화에 대한 과학적 사실을 소개하고, 경제, 경제학과 관련된 주요 의제를 소개하고자 한다.³⁾

3) 전술한 바와 같이 본 논문은 경제학 전공자들에게 기후변화에 대한 인식을 제고하고 경제학이 할 수 있는 역할에 대한 관심을 환기하는 것을 목표로 하기 때문에 주된 논의는 기후변화에 대한 과학적 사실, 경제학의 역할, 경제학과 관련된 기후변화 이슈에 국한되어 있으며 자연과학 분야의 최신 연구, 최적 기후대책의 수립과 실행은 논외로 한다. 최적 기후대책과 관련된 탄소 배출 저감에 대한 비용과 편익 계산, 여러 정책의 장단점에 대한 논의의 요약은 Goulder and Pizer(2006)를 참고하시오.

논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제Ⅱ장에서는 문답의 형식으로 기후변화가 일어나는 이유와 과학적으로 확립된 사실들, 기후변화에 대한 대응책, 국제간 공조의 필요성, 우리나라의 상황에 대해 살펴 본다. 제Ⅲ장에서는 기후변화와 밀접한 관련이 있는 경제와 경제학 관련 주제를 살펴 본다. 먼저 자연과학의 영역이라 생각할 수 있는 기후변화 연구에서 경제학이 기여할 수 있는 부분을 논의한 뒤 기후변화 연구에서 널리 쓰이는 경제학적 모형인 통합평가모형(IAM)의 기본 구조와 관련 연구에 대해 살펴 본다. 이어서 사회적 비용에 비례해 탄소에 가격표를 붙이는 탄소 가격제(carbon pricing mechanism)의 대표적 수단인 탄소세(carbon tax)와 배출권 제도(cap and trade)의 원리와 탄소의 사회적 비용(SSC: Social Cost of Carbon), 기후금융(climate finance)의 개념과 필요성, 중앙은행과 금융감독 당국에 의해 점차 주목을 받고 있는 기후 스트레스 테스트(climate stress test), 유로 지역 뿐만 아니라 우리나라에서도 최근 논의가 늘고 있는 그린 뉴딜(green new deal)에 대해 논의한다. 제Ⅳ장에서는 요약과 함께 향후 연구 과제를 논의한다.

Ⅱ. 기후변화에 대한 과학적 사실들

이 장에서는 기후변화에 대한 과학적 사실 및 관련 논의를 이해하기 위해 필요한 배경지식을 문답 형식으로 살펴 본다. 아래 논의를 통해 기후변화는 인간의 경제활동이 초래한 것이라는 주장에 대해 지배적인 과학적 합의(scientific consensus)가 이루어져 있으며, 재앙적 효과에 대해 100% 확신할 수 없으나 피해가 매우 클 수 있고 비가역적이므로 현재 논의되는 기후변화 대비책은 '보험'의 성격을 가진다는 것을 알 수 있다. 먼저 지구 온난화의 원인, 기후변화의 가능성에 대한 과학적 합의를 살펴 보고, 산업혁명 전 기준 2도 이상 기온이 상승하는 것을 막기 위해 관련 전지구적 차원의 노력을 기울이고 있는 이유와 수단, 우리나라 상황에 대해 차례로 살펴 본다.⁴⁾

4) 기후변화 관련 논의에서는 다양한 영문 약어들이 나오는데 이들 약어에 대해서는 유엔기후변화협약 홈페이지에서 알파벳 순서로 정리해 놓았다. 우리말의 경우 기상청

1. 기후변화로 인한 지구 온난화는 왜 일어나는가?

기후변화로 인해 대기 온도가 상승하는 지구 온난화의 원인은 온실효과(greenhouse effect) 때문이다. 온실효과의 개념은 프랑스의 수학자 장 밥티스트 조세프 푸리에(Jean Baptiste Joseph Fourier)가 일찍이 1824년에 생각해 내었다.⁵⁾ 푸리에에 “지구는 태양으로부터 끊임없이 에너지를 받고 있는데도 왜 온도가 더 오르지 않을까?”라는 질문에 천착해 있었는데 온도가 지속적으로 상승하지 않는 이유는 지구가 받은 빛 에너지를 다시 우주로 돌려 보내는 복사(radiation) 때문이었다.⁶⁾ 지구에 대기가 존재하지 않는다면 태양의 빛 에너지 모두가 방출되어 지구 표면의 온도는 영하가 되지만, 대기에 있는 수증기와 온실가스 등이 열을 가두기 때문에 자연적인 온실효과가 작동함으로써 인간에게 너무 춥지도, 덥지도 않은 온도가 유지된다. 현재 논의되고 있는 온실효과는 “강화된 온실효과(enhanced greenhouse effect)”로 인간의 경제활동으로 인해 온실가스가 더 많이 배출되기 때문에 발생한다.⁷⁾ 온실가스(GHGs: Green House Gases)는 적외선 복사열 에너지를 흡수·저장·방출하는 기체이며, 유엔기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)이 규정한 6대 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 과불화탄소(PFCs), 수소불화탄소(HFCs), 육불화황(SF₆)인데 이들 온실가스가 대기에 갇혀 온도를 높이게 된다.⁸⁾

기후정보포털의 기후용어사전을 참고할 수 있다. 각각 다음의 링크를 참고하시오.

<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/glossary-of-climate-change-acronyms-and-terms>

http://www.climate.go.kr/home/06_community/06.html?type=eng&key=&cpage=1

- 5) Fourier, J. (1824) “Remargues Generales sur les Temperatures Du Globe Terreste et des Espaces Planetaires,” *Annales de Chimie et de Physique* (in French). 27: 136-167.
- 6) 태양빛을 반사하는 정도를 알베도(albedo)라 하며 이에 따른 기온변화를 알베도 효과(albedo effect)라 한다.
- 7) Wagner and Weitzman(2015)는 온실효과를 쉽게 이해할 수 있는 비유를 사용했는데 이들에 따르면 대기에 온실가스가 늘어나는 것을 ‘자동차를 점점 더 짙은 검은 색으로 칠하는 것과 같다.
- 8) 대기 오염과 관련된 피해는 이미 13세기에 보고 되었다. Nordhaus(2013)에 따르면 런던은 1280년대에 이미 대기오염의 피해를 경험했고 에드워드 1세가 1285년 첫번째 대기오염 칙령을 내리고 1306년에는 석탄을 태우는 것을 불법화하기도 했다.

푸리에의 개념적 사고였던 온실효과는 1859년 실험실에서 재현되었으며 1896년에 스웨덴 과학자 스반테 아레니우스(Svante Arrhenius)가 “대기 중 CO₂의 농도가 2배로 증가한다면 기온은 얼마나 상승할까?”에 대한 답을 계산함으로써 정량화가 되었다.⁹⁾ 이 수치를 기후 민감도(climate sensitivity)라 부르며 기후변화 관련 연구에서 가장 중요한 수치 중 하나인데 아레니우스의 당시 계산은 5-6도 범위였다. 오늘날 논의되는 기후 민감도가 정립된 것은 1979년이며 다행히 아레니우스의 수치보다는 낙관적이며 NRC(1979)에 따르면 1.5-4.5도 범위이며 중위값은 3도이다. 이후 후속 연구로도 신뢰성 있는 범위는 1.5-4.5도로 인정되고 있다. 대기 평균 온도는 지난 100년동안 약 0.8도 상승했으며 1900-2100년 사이 온도 변화는 1.8-4.0도로 예측되며 온난화를 늦추는 정책의 시행이 없다면 2100년에는 1900년 온도보다 3.5도 더 상승할 것이라 예상되고 있다. 또 하나의 중요한 개념은 복사 강제력(radiative forcing)이다.¹⁰⁾ 복사강제력은 온실가스 증가, 태양 흑점 활동의 변화 등으로 인해 발생한 지구 시스템의 에너지 변화를 의미하며 화산활동 같은 자연적 복사 강제력, 그리고 온실가스 등으로 인한 인위적 복사 강제력으로 분류할 수 있다. 요약하면 지구 온난화는 ‘온실가스 배출 → 이 중에 일부가 대기 중에 남게 됨 → 복사 강제력 → 기온 변화’의 순서로 작동한다.

RCP(대표농도경로, Representative Concentration Pathways)는 기후변화에 대한 정부간 패널(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간한 2014년 보고서에서 채택한 온실가스 농도의 미래 추정치이다.¹¹⁾ IPCC(2014)는 향후 온실가스 배출량 정도에 따라 일어날 수 있는 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5의 네 가지 시나리오를 설정하였는데 RCP 뒤의 숫자들은 2100년 시점 복사 강제력

9) 아레니우스는 1903년 노벨 화학상을 수상하였다. 아레니우스가 이 계산을 수행한 것은 Broecker(1975)가 1975년 논문에서 “지구 온난화”란 용어를 처음 만들기 80년 전이다.

10) 정확한 정의는 대류권과 성층권의 경계면인 대류권 계면(tropopause)을 통과하는 단위 면적당/시간당 복사 에너지 변화를 의미하며 W/m² 단위로 측정한다.

11) 기후변화에 대한 정부간 패널(IPCC)은 기후변화와 그로 인한 전지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 요구하는 기구이다. 세계기상기구(World Meteorological Organization)과 유엔 환경계획(UNEP: UN Environmental Programme)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제 협의체이며 기후변화 문제 해결을 위한 노력을 인정받아 앨 고어(Al Gore)와 공동으로 2007년 노벨평화상을 수상하였다.

(radiative forcing)의 수치이다. RCP 2.6은 온실가스 배출량이 2020년에 최고조에 이르고 이후 배출량이 2100년까지 감소하는 경우이다. RCP 4.5는 2040-2050년 사이 최고조에 이른 뒤 감소 추세를 보이며, RCP 6.0은 배출량이 2080년에 최고조에 이른 뒤 이후 감소하는 경우, RCP 8.5는 2100년까지 배출량이 계속 증가하는 경우를 의미한다. RCP 2.6을 준수할 경우 산업화 이전 대비 대기 온도 상승을 2도 내로 유지할 수 있게 된다. 참고로 2015년 체결되고 2016년 11월 발효된 파리 기후변화 협약(Paris Climate Change Accord)에 따른 정책들이 준수되었다 하더라도 2100년에 2.6-3.2도 기온 상승이 초래된다.¹²⁾

그렇다면 서론에서 언급한 ‘2도’는 어떻게 결정된 것인가? ‘2도’에 대한 논의는 기후변화 논의에 빈번하게 등장한다. 예를 들어, 2009년 12월 덴마크 코펜하겐에서 열린 기후변화 회의에서는 지구 기온 상승을 2도 이내로 제한하기로 하였고, 2020년 만료 예정인 교토의정서를 대체하는 파리 협약은 장기 목표로 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 섭씨 2도보다 낮은 수준으로 유지하고, 1.5도 이하로 제한하는 노력을 하기로 결의하였다. 놀랍게도 2도는 100% 과학적인 방법으로 결정된 것이 아니다(Nordhaus, 2013). 2도의 근거로 삼은 이유로는 첫째로 빙하를 이용한 연구 결과 지난 50만년 동안 (2000년 기온을 0으로 기준 삼았을 때) 가장 높은 기온 상승은 2도라는 것이다. 둘째, 여러 연구를 종합한 결과 온도가 올라가면서 생태계가 위협을 받는데 2도 상승의 경우 위협이 급격히 증가하며 2도 이상 올라갈 경우 여러 측면에서 티핑 포인트(tipping point)가 지날 가능성이 높기 때문이다(IPCC, 2018). 현재까지 연구에 따르면 온도가 3도 이상 상승할 경우 매우 위험한 상황이 발생할 가능성이 높기 때문에 안전판을 두어 목표는 2도로 두는 것이 적정하다고 판단하고 있다.¹³⁾

12) 기후변화 관련 통계는 여러 사이트를 참고할 수 있다. IPCC 데이터 배포 센터(DDC: Data Distribution Center)를 우선적으로 고려할 수 있고 기후변화 데이터 허브가 제공하는 데이터와 링크들에서도 유용한 데이터를 확보할 수 있다. Our World in Data에서는 기후변화 관련 중요 데이터들의 수치 뿐만 아니라 시각화 도구도 제공한다. 해당 사이트들의 링크는 다음과 같다:

<http://www.ipcc-data.org/>

<https://datahub.io/collections/climate-change>

<https://ourworldindata.org/>

13) 6도 이상 상승할 경우 과학적으로 그 여파를 완전하게 파악하지 못 하기 때문에 나심 탈레브(Nassim Taleb)의 “블랙 스완(black swan)”, 도널드 럼스펠드(Donald

2. 기후변화는 실재하는가?

기후변화는 100% 실재하는가? 기후변화에 대해서 과학적 합의는 이루어져 있는가? 첫째 질문에 대한 대답은 ‘아니다’인데 그 이유는 ‘100%’란 표현 때문이며, 두번째 질문에 대해서는 ‘맞다’이다. 기후변화에 대해서 과학적 합의가 이루어져 있는 상태이다’라 할 수 있다. 과학적 합의란 전문성과 객관성을 지닌 해당 분야의 전문가 그룹이 이해상충의 문제와 외부의 압력에서 자유로운 상태에서 증거 기반으로 연구하고, 그 결과를 동료 학자들과 학술 단체가 검증하고 인정한 지식 체계를 의미하는데 현 상태 과학계의 기후변화에 대한 합의 상태는 이 정의에 부합한다고 볼 수 있다.¹⁴⁾

IPCC는 기후변화에 대한 연구를 종합하는 일련의 연구를 발표해 왔는데 기후변화의 가능성에 대한 표현은 시간에 따라 가능성에서 사실상 확신의 단계로 변모해왔다. IPCC(1995)에서는 인간 행동의 의한 지구 온난화의 가능성을 ‘아마도(more likely than not)’로 표현했으나 해당 표현은 IPCC(2001)에서 ‘그럴 가능성이 있는(likely)’으로, IPCC(2007)에서는 ‘그럴 가능성이 높은(very likely)’으로, 그리고 IPCC(2013)에서는 ‘가능성이 매우 높은(extremely likely)’로 변화해 왔다. 경험과학의 반증 가능성(falsification)을 고려하면 ‘100% 확실한’이란 표현은 사용할 수 없지만 남은 것은 “사실상 확실한(virtually extreme)”이란 표현이다.¹⁵⁾ 아래 <자료>의 패널 (a)는 지구 대기 속 CO₂ 농도 추이를 보여 주는데 지난 80만년 동안 일정한 주기를 보이며 변화하는 농도가 19세기 후반부터 급격하게 증가하는 것을 보여준다. 패널 (a)에서 CO₂ 농도가 300ppm을 처음 넘어 선 해는 1909년이며 산업화 이전에 평균 농도는 280ppm이었으나 현재는 400ppm을 넘어 선 상태이며 매년 2ppm씩 증가하고 있다.¹⁶⁾ 1850

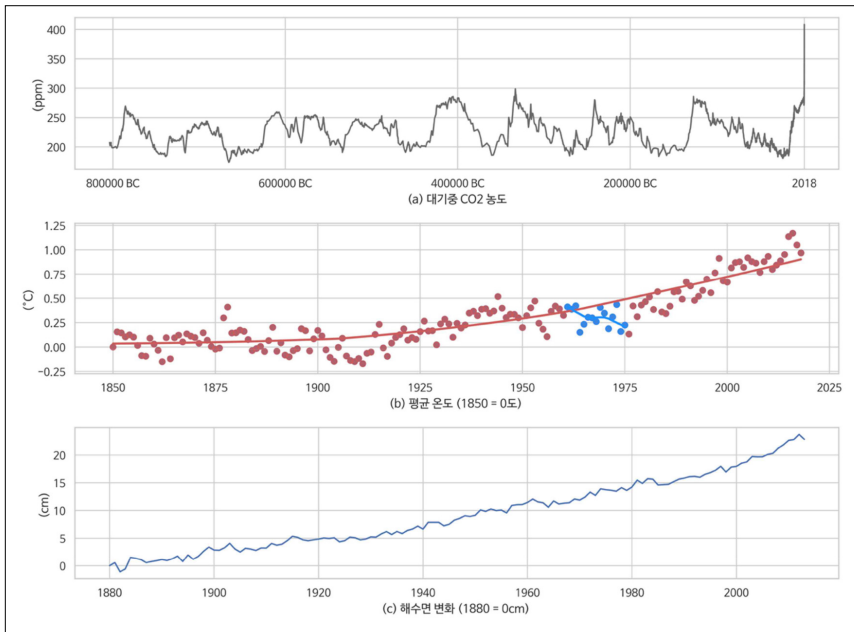
Rumsfeld)의 “알려지지 않은 무지(unknown unknowns)”의 영역에 있다고 할 수 있다.

14) Nordhaus(2013).

15) 다음 웹사이트에서 IPCC의 보고서를 볼 수 있다: <https://www.ipcc.ch/reports/> IPCC(2010)에 따르면 ‘아마도(more likely than not)’는 어떤 사건이 일어날 확률을 50-100%로 봤을 때에 해당되며, ‘그럴 가능성이 있는(likely)’는 66-100%, ‘그럴 가능성이 높은(very likely)’는 90-100%, ‘가능성이 매우 높은(extremely likely)’는 95-100%에 해당한다. 문제는 100% 확신할 수 있는 상황이 아니기 때문에 얼마만큼 확신을 해야 문제의 심각성에 대응하는 전지구적 행동을 이끌어 낼 수 있느냐에 있다. 국제간 공조의 필요성과 문제점에 대해서는 아래에서 논의한다.

년부터 지구 대기의 평균 온도 추이를 보여 주는 패널 (b)는 지난 170년 동안 약 1도의 기온이 상승한 것을 보여주는데 Wagner and Weitzman (2015)는 패널 (b)는 기후변화의 위험을 과소평가해서 보여 준다고 주장한다. 먼저 기온 상승이 점점 더 빨라지고 있으며, 표면의 2/3를 차지하는 해양 위 공기의 온도가 더 낮기 때문에 사람들이 사는 육지의 평균 기온은

〈그림 1〉 대기중 CO2 농도, 평균 온도, 해수면 변화 추이(Changes in CO2 Concentration in the Atmosphere, Average Temperature, and Sea Level Rise)



자료: (a)는 NOAA/ESRL (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>), (b)는 Met Office Hadley Center (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/index.html>), (c)는 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)의 데이터를 이용해서 저자 작성.

Sources: Using data from NOAA/ESRL (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>), Met Office Hadley Center (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/index.html>), CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), the authors created Figure 1 (a), (b) and (c), respectively.

16) 1958년부터 하와이 마우나 로아(Mauna Loa) 관측소에서 대기 중 CO2 농도를 측정하기 시작했으며 이전 수치는 빙하 내부를 통해 간접 측정된 결과이다. 대기의 CO2 농도 상승은 바다 산성화(ocean acidification)를 초래하고 탄산칼슘(CaCO3)의 형성을 방해해서 갑각류에 먼저 영향을 미치고 먹이사슬을 통해 해양 생태계에 부정적 영향을 끼치게 된다.

더 높게 상승한 것이라 지적한다. 또한 얼음이 가장 많은 지역인 극 지역의 온도 상승이 더 빠르기 때문에 해수면 상승과 이로 인한 이상 기후의 위험성이 커지고 있다. 패널 (c)는 1880년부터 현재까지 평균 해수면의 변화를 보여 주는데 지속적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이 수치는 평균치이며 빙하가 녹는 효과를 제외하고도 전지구적으로는 18-60cm의 상승이 있었으며 21세기에는 여름 동안 북극해에는 얼음이 없을 것으로 전망된다. <자료>에 나타난 시계열의 추세에서 볼 수 있듯이 IPCC(2014)은 20세기 중반 이후 전지구적 기온 상승은 온실가스 농도 증가 때문이며, 20세기 중반 이후 전지구적 기온 상승은 인간의 경제 활동을 배제하고는 설명할 수 없다고 결론 내렸다.

기후변화에 대한 의구심이 100%에 가까운 확신으로 바뀐 경우는 미국 정부의 사례에서도 볼 수 있다. 미국의 경우 클린턴 행정부가 서명했던 교토의정서에서 2001년에 탈퇴할 정도로 기후변화에 대해 의구심을 갖던 부시 행정부에서 국립학술원(National Academy of Sciences)에 기후변화에 대한 과학적인 보고서를 요청하였다. 산하기관인 미국 국립연구회의(NRC: National Research Council)에서 낸 NRC(2001)은 인간 활동의 결과로 배출된 온실가스가 대기와 바다의 온도를 상승시키는 주장에 과학적 근거가 있으며 신뢰성이 있다고 결론 내린다. 10년 뒤 미 의회가 국립학술원에 유사한 질의를 하는데 NRC(2011)은 “인간의 화석연료 사용으로 인한 탄소 배출이 지구 기후의 큰 방향을 결정짓는 요인이며...대기 중 탄소가 지구와 향후 세대에 매우 심각한 충격을 줄 수 있다”고 하며 기후변화가 일어나고 있다는 것, 그리고 주원인이 인간이라는 것에 의문의 여지가 없음을 명시하였다.

추가적으로, 과학자들은 인간에 의한 기후변화(AGW, anthropogenic global warming)에 대한 과학자들의 의견을 1990년대부터 조사해 왔는데 Cook et al.(2013)에 따르면 AGW에 대해 입장을 밝힌 학술 연구 중 97%가 AGW를 인정하는 것으로 나타났다. 이러한 점을 고려할 때 인간의 경제활동으로 인한 탄소 배출이 온실효과를 통해 기후변화를 일으킨다는 명제는 과학계에서 널리 받아들여진다고 볼 수 있다.

이러한 과학적 합의에도 불구하고 기후변화에 대한 부정 또는 회의론이 널리 퍼져 있는 이유 중 하나로 언론 노출이 많은 정치인들의 수사를 들 수

있는데, 대표적으로 2019년 11월 4일 파리 협약 탈퇴를 공식화한 미국 대통령 트럼프를 들 수 있다.¹⁷⁾ 2009년 뉴욕타임스의 전면 광고를 통해 기후변화는 과학적으로 논박할 수 없는 사실이며 기후변화에 대한 행동을 적극적으로 취해야 한다는 서명을 하기도 했던 트럼프 대통령은 2012년에 기후변화는 중국 정부가 미국 제조업 경쟁력을 떨어뜨리기 위한 목적으로 만들어 낸 개념이라 주장했으며 기후변화 관련 추가적인 연구가 필요하다고 주장했다.¹⁸⁾ 기후변화에 대한 회의론은 정치인들 뿐만 아니라 심지어 과학자들도 제기하였다. 2012년 1월 27일 WSJ에 16명의 과학자가 “지구 온난화에 대해 호들갑을 떨 필요는 없다(No Need to Panic about Global Warming)”이란 제목의 성명을 내며, (i) 지구 온난화는 존재하지 않으며, (ii) 기후 변화를 예측하는 모형들이 틀렸으며, (iii) CO₂는 공해물질이 아니며, (iv) 대책을 50년 미루더라도 심각한 경제적, 환경적 피해는 없을 것이라 주장하였다. 먼저 기후변화 회의론자들은 100% 확실성이 없다고 비판하는데 경험적 현상에 대해서는 100% 확실성이 보장될 수 없다. 기후변화에 대한 과학적 탐구가 과학적 합의에 의해 진행되는 것과 마찬가지로 비판론자, 또는 회의론자의 의견에 대해서도 같은 수준의 엄밀함으로 검증하고 반영해야 할 필요가 있는데 이런 맥락에서 이들 주장에 대해서 과학적 합의에 근거한 학계의 반박이 잇달았으며 성명서를 발표한 과학자들이 일부 데이터만 보고 해석하거나 과학적 합의에 근거한 사실들을 무시한 것으로 판명이 되었다. 예를 들어, 기후변화는 장기적 현상이며 대기 온도의 최소 30년 이상의 추세를 판단해야 하는데 이들은 일부 데이터만 보고 회의론을 제기하였다.¹⁹⁾ <그림 1>의 패널 (b)를 보면 1960-1975년 사이 평균 대기 온도는 오히려 감소하는 것으로 나타난다. 즉 상승 추세에도 불구하고 변동성이 매년, 십년 단위로 클 수 있는데 이 사실을 무시한 것이다. 또한 비용편익분석에서 차이를 고려하지 않고 비율만을 보고 판단하는 오류를 범한 것으로 나타났다.²⁰⁾

17) <https://www.nytimes.com/2019/11/04/climate/trump-paris-agreement-climate.html>

18) <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-51213003>

19) 기후변화 판단을 위한 시계(horizon)에 대한 논의는 다음을 참고하시오.

<https://nca2014.globalchange.gov/report/appendices/faqs>

20) 예를 들어, 프로젝트 A, B가 있고 (비용, 편익)이 각각 (1, 6), (10, 50)이라 하면 프로젝트 B를 선택해야 하는데 비율로 계산하면 A를 선택하게 된다.

3. 왜 기후변화에 대응하는 대책이 필요하며 어떤 대책들이 있는가?

기후변화에 대응하는 대책을 논의하기 전에 그 필요성을 이해하기 위해 기후변화가 가져올 리스크들에 대해 먼저 논의한다. Bank of England (2015), Batten et al.(2016), Batten(2018)에 따르면 기후변화는 크게 물리적 리스크(physical risk)와 이행 리스크(transition risk) 경로를 통해 사회경제 시스템에 영향을 미칠 수 있다. 이외에도 기후변화로 인한 피해 관련 소송을 통한 배상책임 리스크(liability risk)도 있는데 이 리스크는 주로 보험사를 통해 금융권으로 충격이 전파될 수 있다. <표 1>은 기후 리스크가 경제에 미칠 수 있는 다양한 경로를 보여 주는데 기후 리스크(climate risk)를 물리적 리스크와 이행 리스크, 그리고 경제의 수요와 공급 측면에서 분류하였다. 물리적 리스크는 기후변화 자체에 대한 인간의 취약성 때문에 발생하는 리스크를 의미하며 점진적인 온난화와 태풍 등 극단적인 기후(extreme weather) 모두 원인이 될 수 있다.²¹⁾ 즉 태풍, 해수면 상승, 혹서 등 기후변화가 인간과 자연에 초래할 가능성이 있는 직간접적 취약성을 의미한다. 2005년 미국 남동부를 강타한 허리케인 카트리나는 GDP의 1%에 달하는 손실을 가져 왔으며 당시 미국 농산물 물류의 45%를 차지하는 남동부 지역의 항구가 폐쇄되는 바람에 농산물 가격이 3% 증가하였다. 이는 미국의 사례이긴 하지만 유사한 효과가 전지구적 차원의 가치사슬에서 발생할 수도 있음을 의미한다.²²⁾

이행 리스크는 저탄소 경제로의 빠른 이행과 관련 정책의 변화, 관련 기술의 혁신 또는 정책, 사회적 규범과 시장 수요의 변화 등이 야기하는 불확실성이 초래하는 충격을 의미한다(Bolton et al., 2020). 대표적으로 좌초

21) 극단적인 기후의 경제적 효과에 대해서는 Stephenson(2008), Hallegatte and Przulski(2010)을 참고하십시오.

22) 참고로 글로벌 금융위기 당시 미국의 2009년 GDP 손실은 -2.8%였다. 2000년대 미국을 강타한 허리케인들의 경제적 피해에 대해서는 St. Louis Fed에서 운영하는 On the Economy Blog 2017년 9월 5일 포스팅을 참고하십시오: <https://www.stlouisfed.org/on-the-economy>. 항구 관련 기후 리스크에 대한 것은 *The Economist* 2020년 9월 12자 기사를 참고하십시오: <https://www.economist.com/finance-and-economics/2020/09/12/ports-are-highly-exposed-to-climate-change-and-often-ill-prepared>

자산(stranded assets)의 문제를 들 수 있다. 좌초자산의 사전적 의미는 예상하지 못 했거나, 예상보다 이른 시점에 가치가 크게 떨어지거나 감가상각되는 자산을 의미하는데 기후변화와 관련해서는 저탄소 경제로 이행하면서 채굴되었지만 미사용되는, 또는 채굴되지 않는 화석연료의 생산, 발전 등 화석연료 문화와 결합된 모든 산업의 자산을 의미한다. 우리나라의 경우 처럼 발전 비중에서 석탄 연료의 비중이 높은 경우에는 좌초자산의 문제가 심각하다고 볼 수 있다. 저탄소 경제로 이행하는 과정에서 탄소 배출을 적게 하는 기업으로의 투자를 유도하는 탈탄소화(decarbonization) 움직임이 활발하게 논의되고 실행되고 있는데 화석연료 의존도가 높은 기업이나, 온실가스 배출이 많은 기업들은 자금 조달의 측면에서 이행 리스크를 경험할 수도 있다.²³⁾ 또한 현재 전지구적 차원에서 온실가스 배출 저감을 효과적으로 강제하기 위해서 논의되는 탄소국경조정제도(BCA: Border Carbon Adjustment) 도입의 경우도 이행 리스크에 속한다.²⁴⁾

기후 리스크는 근로시간과 생산성에도 영향을 미칠 수 있다. Dell, Jones, and Olken(2014)에 따르면 섭씨 25도에서 기온이 1도씩 올라갈 때마다 인지 과제(cognitive task)의 생산성이 2%씩 감소한다. Zivin and Neidell(2014)는 기온이 개인의 시간 배분(time allocation)에도 영향을 미칠 수 있음을 보였는데 미국의 경우 최고 기온이 섭씨 29도 이상인 지역에서는 외부 환경에 노출된 근로자들이 1시간 이상 노동 공급을 감소시키는 것을 보였다. 자본의 경우에도 보수와 교체를 위해 자본이 쓰이면서 학습효과(learning by doing)을 낳는 자본 투자가 적게 이루어지고 그 결과 장기 성장 잠재력에도 영향을 미칠 수 있다(Pindyck, 2013; Stern, 2013). 미국 브루킹스 연구소의 2019년 보고서 Nunn et al.(2019)에

23) 유엔 환경 프로그램 금융계획(UNEPFI: UN Environmental Programme Finance Initiative) 산하 PDC(Portfolio Decarbonization Coalition, <https://unepfi.org/pdc>)를 예로 들 수 있다.

24) 현재 EU에서 늦어도 2023년 1월부터 부과하기로 논의되고 있는 국경간 탄소세(border carbon tax)도 BCA로 볼 수 있는데, EU의 환경 기준에 미달하는 수입 품에 대해 탄소량에 비례해서 관세를 매기는 제도이다. BCA가 실행될 경우 EU와 무역 파트너 국가의 손실에 대한 추정치는 Fouré, Guimbard, and Monjon (2016)를 참고하시오. 일부에서는 후진국의 화석연료에 투자하면서 BCA를 부과하는 선진국의 행태를 위선적이며 불공정하다고 비판하기도 한다. 관련 의견은 다음 링크를 참고하시오: <https://www.technologyreview.com/2020/07/27/1005641/carbon-border-taxes-eu-climate-change-opinion/>

따르면 미국의 경우 기온이 올라갈수록 경제에 대한 피해는 더 커지며 경제 활동이 상대적으로 덜 활발한 미 남부, 남서부 지역의 피해가 크다고 추정했으며 전지구적으로 저소득 국가, 고령층의 피해가 더 클 것으로 예상된다. RCP 2.6하에서 1인당 GDP 손실은 1.0-2.8%, RCP 8.5 하에서는 6.7-14.3%로 예상되고 있다.²⁵⁾

〈표 1〉 기후변화로 초래되는 리스크의 예시 및 분류²⁶⁾(Examples and Taxonomy of Climate-Related Risks)

		물리적 리스크	이행 리스크
수요	무역	- 자연재해로 인한 가치사슬 충격	- 탄소국경조정제도(BCA: Border Carbon Adjustment)
	투자	- 불확실성	- 저탄소 경제 이행 과정에서 포트폴리오 변화 - 좌초자산
공급	생산성	- 기온 변화로 인한 노동 생산성 하락 - 노동시간 감소 - 자본스톡 감소로 인한 노동 생산성 하락	- 탄소국경조정제도(BCA) 도입으로 인한 공장 해외 이전
	자본스톡	- 자연재해로 인한 자본량 감소 - 적응을 위한 자본의 전용	- 좌초자산
	식량, 에너지	- 식량과 에너지 공급량 및 가격의 급격한 변화	- 식량 안보

위에서 살펴 본 기후 리스크에 대응하는 접근법은 크게 적응(adaptation), 지구공학(geoengineering), 저감(mitigation) 세 가지로 분류한다. 첫번째로, 적응은 말 그대로 기후변화를 받아 들이고 더불어 살아가는 것을 의미하며, 예방의 성격을 가지기 때문에 지구공학, 저감과 대조적이나 이들 접근법과 국제적 차원의 보완 관계로 볼 수 있다. 적응은 상대적으로 수동적 대응이라 경제적 비용이 크지 않다고 볼 수 있으나 실증연구들은 그렇지 않음을 보이고 있다. Dell, Jones, and Olken(2014)에 따르면 후진국의

25) 손실 추정치의 불확실성이 큰 이유는 기후 변화의 정도에 대한 불확실성 때문인데 기후변화 정도는 결국 향후 정책과 경제활동에 영향을 받기 때문에 향후 경제활동의 변화를 예측하는 것이 가장 중요해진다. 이와 더불어 '배출 → 농도 → 기온 → 화폐 가치로 환산된 피해액'의 각 단계마다 불확실성이 개입되어 있기 때문에 전체 그림을 파악하기 힘들다는 문제도 있다.

26) 리스크의 분류는 Batten(2018)의 표 1과 2를 참고하였다. Batten(2018)은 물리적/이행 리스크, 수요/공급 측면, 장기와 단기에 걸쳐 기후변화 관련 리스크를 분류하였다.

경우 1950-2003년 기간 1도의 온도 상승이 경제성장율을 1.1%p 저하시켰으며, 미국의 카운티 단위로 연구한 Deryugina and Hsiang(2014)에 따르면 생산요소의 재배치, 적응 관련 투자를 모두 고려한 다음에도 기온이 섭씨 15도에서 1도씩 증가할 때마다 생산성이 1.7%씩 감소한다는 것을 보였다. 이들 연구는 적응에 따른 경제적 비용이 매우 클 수 있음을 시사한다. Burke, Hsiang, and Miguel(2015)는 1인당 GDP 증가율과 기온의 관계를 연구했는데 1인당 GDP 증가율은 섭씨 13도에서 극대화되며 기온이 상승할수록 빠르게 감소함을 보였다.²⁷⁾

적응과 관련된 개념으로 최근에는 기후 복원력(resilience)이 논의되기 시작하였다. 기후 복원력은 사회생태 시스템(socio-ecological system)이 기후변화로 인한 충격을 흡수하고 신속하게 적응하여 시스템의 본 기능을 유지할 수 있는 능력을 의미한다. 예를 들면, 자동차 배기 가스를 포함해서 도시 내 화석연료 사용을 줄임으로써 도시의 열섬 현상을 완화한다거나, 중국의 “스펀지 도시” 프로젝트를 들 수 있다. 이 프로젝트는 2015년부터 중국의 30개 도시에서 시범적으로 추진되고 있는데 도심 지역에서 폭우 등으로 넘쳐난 빗물을 공원, 옥상 녹화 사업, 지하 저수지 등을 통해 흡수 및 재 활용하는 구상이다.²⁸⁾ 태풍과 산불 등으로 직접적인 피해를 경험하고 있는 미국의 경우 2013년 170여 명의 시장과 지자체 단체장들로 구성된 기후 대비 및 복원력 대책위원회(Task Force on Climate Preparedness and Resilience)를 발족했으며 누구나 편리하게 기후변화 관련 정보를 수집하고 분석할 수 있는 기후 복원력 툴킷(Climate Resilience Toolkit) 웹사이트를 개설하였다.²⁹⁾

둘째, 지구공학은 지구 온난화를 늦추기 위해 기후 시스템에 영향을 미치려는 대규모의 환경 측면 개입을 의미한다. 예를 들어, 대기 중에 미세입자를 뿌리거나 반사판을 설치해서 태양광을 반사하는 기술을 들 수 있다. 이 개념은 1991년 필리핀 피나투보(Pinatubo) 화산 폭발의 효과로 쉽게 설명할 수 있다. 당시 화산 폭발로 인해 2천만 톤의 이산화황이 성층권에 뿌

27) 추가적으로 이들은 이 관계가 선진국과 후진국 여부에 관계없이, 그리고 1960년대 이후 변하지 않았음을 보였다.

28) 중국의 “스펀지 도시” 사업에 대한 자세한 정보는 Chan et al.(2018)를 참고하십시오.

29) <https://toolkit.climate.gov/>

러지면서 태양광을 막았고, 그 결과 향후 15개월 동안 지구 대기의 평균 온도가 약 0.6도 낮아졌는데 산술적 계산에 따르면 이 정도 규모의 폭발이 매년 5-10개 정도 있다면 탄소 배출로 인한 온난화를 제거할 수 있다는 것이다.³⁰⁾ 1815년 인도네시아 탐보라(Tambora) 화산 분출의 경우 “여름 없는 한 해(year without a summer)”를 초래했으며 그 여파로 1816년 유럽에서 20만명의 사상자를 초래했다.³¹⁾ Wagner and Weitzman(2015)에 따르면 지구공학은 실제 효과와 부작용 측면에서 우리가 있으나 비용 측면에서 무시할 수 없는 대안일 수 있다.³²⁾ Smith and Wagner(2018)에 따르면 비슷한 효과의 다른 접근법에 비해 비용이 1/100-1/10 수준이다. 이런 맥락에서 Parson and Keith(2013)은 지구공학 연구에 대한 지침으로 먼저 (i) 부작용의 가능성을 인정하고 정부의 지침에 따를 것, (ii) 특정 규모 이상의 모든 연구는 일시 중단, 그리고 (iii) 분명하고 아주 작은 한계치(threshold)를 먼저 정하고 그 범위 내에서 연구를 진행할 것을 제안한다.

세번째 대응책으로 저감은 온실가스 배출을 줄이는 것을 의미한다. 1달러당 석탄의 CO₂ 배출량이 천연가스의 2배, 석유의 12배에 달하므로 온실가스 배출을 줄이는 가장 효과적인 방법은 석탄 의존도를 줄여서 탄소 배출을 줄이는 것이다. 이는 결국 재생 에너지 사용 비중을 높이고, 저탄소 에너지 기술 혁신이 필요함을 의미한다. IWG(2016)에서 계산한 2017년 기준 탄소의 사회적 비용은 tCO₂e당 \$46인데 Gillingham and Stock(2018)에 따르면 건설부터 사회적 비용까지 모두 고려한 발전원가인 균등화 발전비용(LCOE, Levelized Cost of Energy)은 육상 풍력발전(onshore wind) (\$24), 천연가스 복합발전(natural gas combined cycle) (\$24), 발전

30) <https://earthobservatory.nasa.gov/images/1510/global-effects-of-mount-pinatubo>.

31) 당시 대기 오염을 피해 메리 셸리(Mary Shelley), 존 윌리엄 폴리돌리(John William Polidori)가 스위스에서 집에만 지내면서 명작 프랑켄슈타인(Frankenstein)과 흡혈귀(The Vampyre)를 집필했다고 알려져 있다. <https://edition.cnn.com/2019/09/17/world/tambora-eruption-year-without-summer-scen/index.html>

32) 같은 경제학자임에도 불구하고 Nordhaus(2013)는 지구공학을 부정적으로 묘사하는 측면이 있으나, Wagner and Weitzman(2015)은 비용 측면에서 매력적인 대안이며 다른 대안이 없을 때 사용해 볼 수 있는 일종의 구제요법(salvage therapy)으로 간주하고 있다.

소급 대규모 태양광발전(utility-scale solar photovoltaic) (\$28), 탄소 포집 및 저장과 결합된 천연가스(natural gas with CCS(Carbon Capture and Storage)) (\$42), 스마트 원자로(advanced nuclear) (\$58), 해상 풍력발전(offshore wind) (\$105), 태양열(solar thermal) (\$132)의 순서로 나왔다.³³⁾³⁴⁾ 그러나 이 수치는 육상 풍력발전, 천연가스 복합발전처럼 이미 사용 중이라서 비용 계산이 정확한 것도 있으나 스마트 원자로, 탄소 포집기술처럼 단순히 기술적 가능성만 보였을 뿐 향후 수치가 크게 바뀔 수 있는 것도 있어서 정확한 비교가 아닐 수 있다. Gillingham and Stock(2018)는 이렇게 균등화 발전비용에 의거한 수치를 정적 감소비용(static abatement cost)라 부르는데 이 비용은 대기에 오래 머물러 있는 탄소의 장기적 효과를 고려하지 않았기 때문에 현 세대 뿐만 아니라 후세대를 함께 고려하는 동적 감소비용의 추정을 통한 저감 방식 채택을 강조하고 있다. 현재 지속적인 기술 개발로 인해 재생 에너지의 가격이 감소 추세를 보이고 있으나 태양열, 풍력 등 재생 에너지의 가장 큰 약점은 간헐적(intermittent)이라는 특성이므로 관련 배터리 기술 발전과 전력시장 변동성 축소가 전제되어야 한다.³⁵⁾

저감을 포함한 기후대책은 배출량 감소라는 직접적 효과 뿐만 아니라 여러 종류의 부수 혜택(co-benefits)을 가져올 수 있다. 저탄소 기술 개발이 다른 산업으로 전파되어 기술 혁신을 낳을 수도 있으며 공해물질 감소, 대기 정화 등 보건 측면의 혜택도 기대할 수 있다. Bollen et al.(2009)에 따르면 부수 혜택의 장점은 기후대책 비용의 많은 부분을 충당할 수 있을 정도로 규모가 크며 배출량 감소 목표의 달성은 장기 과제이나 부수 혜택은

33) tCO₂e는 tonnes of CO₂e의 약자이며 CO₂e는 CO₂ equivalent의 약자로 온실 가스 효과를 일으키는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 과불화탄소(PFCs) 등 다양한 온실가스를 이산화탄소(CO₂) 기준으로 환산한 측정치이다. 환산식은 다음 링크를 참고하시오: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>

34) 탄소 포집 및 저장(CCS)은 발전소나 산업체에서 배출하는 이산화탄소를 포집한 뒤 폐광이나 고갈된 유전 등에 저장하는 방식을 의미한다. 포집된 탄소를 저장하지 않고 유용한 화합물로 재활용하는 탄소 포집 및 재활용(CSU: Carbon Capture and Utilization)도 이용되고 있으며 2018년 코카콜라 사는 포집된 이산화탄소를 탄산수 제조에 사용하기 시작했다.

35) 재생 에너지 기술에 대한 R&D 투자의 경제적 효과 등 저감 관련 환경정책들의 경제적 효과에 대해서는 Popp(2019)을 참고하시오.

단기 또는 중기에서 발생한다는 점이다. Groosman, Muller, and O'Neill-Toy(2011)의 연구에 따르면, 모형에 따라 부수 혜택은 tCO₂e당 1-77달러로 추정된다.³⁶⁾

기후 리스크의 파급경로와 대처 방안을 파악하고 있다고 하더라도 기후변화의 전지구적 외부성 때문에 국제간 공조가 필수적이다. 학계에서는 (i) 모든 국가의 참여, (ii) 탄소 사용의 한계 비용을 모든 사용처에서 일치시키고, (iii) 규제 강도를 점차 높이는 방식(increasing stringency over time) 세 가지를 통해 효과적인 대처가 가능하다고 합의가 되어 있지만 전지구적 외부성(global externalities)으로 인한 무임승차의 문제 때문에 실행이 쉽지 않다. Nordhaus(2013)에 따르면 모든 국가가 참여할 경우 전세계 GDP 1.5%의 비용으로 2도 이하의 기온 상승을 성취할 수 있지만, 50%의 국가만 참여할 경우 2도 목표를 성취할 방법이 없다.³⁷⁾ 그렇다고 너무 비판적인 필요가 없는 이유는 전지구적 문제이긴 하지만 미국, 유럽, 중국, 인도, 일본, 러시아, 브라질, 인도네시아가 전 세계 배출의 60% 이상을 차지하기 때문에 Wagner and Weitzman(2015)의 표현처럼 '195개국의 퍼즐을 모두 맞춰야' 하는 것은 아니라 할 수 있다. 또한 1987년 프레온 가스로 불리는 염화불화탄소(CFC: Chloro Fluoro Carbon) 사용을 금지한 몬트리올 의정서처럼 전지구적 협력의 성공 사례가 존재한다. 미국의 경우 1990년 이산화황(sulfur dioxide) 규제가 매우 성공적이어서 교토 협정과 유럽 배출권 시장의 기초가 되었다.

이와 관련해서 국제간 공조는 일찍이 1979년 제1차 세계 기후회의부터 시작되었는데 이 회의에서 세계기후계획(World Climate Programme), 유엔환경계획(UNEP: UN Environment Programme), IPCC의 설립을 승인하였다. 1992년 브라질 리우에서 열린 유엔 환경개발회의(United

36) 이들 연구에 따르면 미국의 경우 2010-2030년 기간의 기후대책으로 인해 보건 관련 부수혜택이 0.1-1.2조 달러로 추정되며 미세먼지와 이산화황으로 인한 인명 손실을 3.2-18.9만명 정도 줄일 수 있다고 추정한다.

37) 전세계 모든 국가에 배출 키타를 정하는 것보다 단일한 최소 탄소가격을 결정하는 것이 훨씬 용이하며 이 방식은 관세나 세금 협정과 같이 진행될 수 있는 장점도 있다. 국제간 공조에서는 국가별로 배출의 한계비용이 일치되어야 하며 국제적 탄소배출권 시장을 설립하거나 국제간 합의된 최소 탄소가격을 결정하는 방식을 고려할 수 있다. Nordhaus(2013)는 무임승차를 막는 유일한 해결책은 참여와 준수 여부를 단일 관세를 적용하거나, 탄소량에 비례해서 비율세를 적용하는 BCA를 이용해서 국제 무역과 연계시키는 것이라 주장한다.

Nations Conference on Environment and Development)에서는 온실가스 배출 제한과 지구 온난화 방지를 위한 구체적인 이행 방안을 논의하기 위해 기후변화 당사국 총회(COP: Conference of the Parties)를 열었고, 이를 시작으로 매년 열리게 된 당사국 총회에서는 기후변화 대응을 위한 국제간 공조가 주로 논의된다. 예를 들어, 최근 가장 많이 논의가 되는 파리협약은 제21차 당사국 총회(COP-21)에서 도출된 결과이며 이전 당사국 총회에서 협상의 기반을 다져왔다고 볼 수 있다. 1995년 베를린에서 열린 1차 당사국총회(COP-1)에서 선진국의 공약 강화를 위한 구속력있는 감축 의무를 정하도록 한 베를린 위임사항(Berlin Mandate)을 채택하고, 선진국들의 온실가스 감축 논의를 위한 실무회의 설치와 1997년까지 의정서의 채택에 대한 합의를 도출하였다. 1997년 교토에서 열린 3차 당사국 총회(COP-3)에서 선진국들의 온실가스 감축 목표를 설정한 교토의정서(Kyoto Protocol)가 채택되었다. 상이한 온실 가스들의 가중치를 공표하고 1990년 대비 온실가스를 2008-2012년까지 7% 감축하는 것을 목표로 하였으나 의무적 배출량 제한은 부속서 I(Annex I) 당사국에게만 해당하고, 협약 부속서 I 비당사국의 감축 의무는 개도국의 강한 반발로 추후 논의하기로 하였다. 교토의정서에는 1990년 기준 세계 배출량의 66%가 포함되었으나 2001년 미국이 교토의정서에서 탈퇴를 하면서 2002년 기준 배출량의 32%만 포함하게 되었다.

교토의정서의 사례에서 볼 수 있듯이 지구환경보전 및 기후변화방지에 대한 구체적인 논의는 선진국과 개도국간의 입장차이와 개별 국가의 견해 차이 등으로 오랜 난항을 겪는다. 2007년 제 13차 당사국 총회(COP-13)에서는 2012년 효력이 만료되는 교토의정서 이후 신기후협약에 대한 로드맵('발리 로드맵')을 채택하고, 당사국간 배출량 감축, 기후변화 대응, 기술 및 재정적 지원 등에 관한 공동 비전에 대한 협상과정('발리 행동계획')에 들어갔다. 이 결과 2009년 코펜하겐에서 열린 제 15차 당사국 총회에서 코펜하겐 합의문(Copenhagen Accord)을 도출하였다. 코펜하겐 합의문은 전지구적 차원에서 처음으로 기후변화 관련 목표("the scientific view that the increase in global temperature should be below 2 degrees Celsius")를 설정했다는 의의가 있으나, 선진국과 개도국간의 주요 쟁점들은 해결하지 못 하고 국제법적 구속력이 없는 정치적 합의 수준으로 종료되

었다. 2011년 남아공 더반에서 열린 제 17차 당사국 총회에서는 결국 교토 의정서의 만료 기한 연장을 논의하면서, 단일 온실가스 감축 체제 설립을 위한 협상(‘더반 플랫폼’)을 하였다. 2012년 카타르 도하에서 열린 제 18차 당사국 총회에서 교토의정서 2차 공약기간을 2013-2020년으로 확정하고, 발리 행동계획 협상 종료 2020년 이후 신기후 체제 수립을 위한 협상체제인 더반 플랫폼 이행을 구체적인 작업계획에 합의하였다. 특히, 기후변화 대응 지원을 위한 장단기 재원 마련을 위해 GCF를 설립하는 등 재원조달에 관한 논의가 있었으나 이 또한 공동의 목표설립이나 로드맵 도입은 되지 않고 각국이 노력을 기울이는 것에 합의하는 수준에 머물렀다.

2015년 지구온난화를 대비해 전세계 195개국이 온실가스 배출에 대한 지속적인 관리와 책임 이행을 약속하는 내용의 파리 협정(Paris Agreement)을 채택하였다. 협정서의 주요 내용은 산업화 이전과 비교하여 지구 평균온도 상승폭을 2도 미만 수준으로 유지하고 궁극적으로는 1.5도까지 제한하는 것이며, 적용시기는 2020년 이후 “신기후체제”로 한다. 이를 달성하기 위해 모든 당사국은 탄소배출량 감축에 적극 동참하고 향후 감축목표량과 그 이행방안에 관한 내용을 담은 국가별 기여방법(NDC: Nationally Determined Contribution)을 2023년부터 5년마다 제출할 의무를 갖는다. 파리협정과 교토의정서 주요 차별점은 (1) 전세계 배출량의 95.7%를 차지하는 195개국이 참여하는 점, (2) 지구 평균온도 상승을 2도보다 훨씬 아래로 유지하고 1.5도까지 제한하도록 노력한다는 구체적인 합의를 이루어 냈다는 점, (3) 온실가스 감축 목표를 할당하는 대신 NDC를 통해 자발적으로 설정, 제출한다는 점, (4) 부속서 I, II같이 의무 당사국을 명시적으로 목록화하여 구분하지 않는다는 점; (5) 당사국이 목표를 자체적으로 설정하고 지속적, 점진적으로 그 목표와 달성도를 강화해 나가도록 유도하는 체제를 가졌다는 점이다. 파리협약 이후 매년 열리는 당사국 총회에서는 파리협정은 실제적인 이행을 위한 협상과 논의가 지속되고 있다. 2018년 폴란드 카토비체에서 개최된 COP-25에서는 파리협정 이행을 위한 세부사항을 규정한 카토비체 기후 패키지(Katowice Climate Package)가 논의되었다. 주목할 점은 총회 의장국인 폴란드 정부가 제안해 통과된 연대와 정의로운 전환 실레시아 선언(Solidarity and Just Transition Silesia Declaration)에서 ‘공정한 이행(just transition)’을 강조했다는 점이다.

즉 이행 과정의 사회적 측면도 강조하며 저탄소 사회 이행 과정에서 발생할 수 있는 취약계층을 포용해야 한다고 주장하였다. 이 개념은 기후변화 방지와 대응이 어떻게 지속가능한 발전목표(SDGs: Sustainable Development Goals)과의 연결되는지 시사하며 기후변화에 대한 논의가 단순히 온실가스 감축과 에너지원의 전환 수준을 넘어야 됨을 의미한다.

4. 우리나라는 기후변화에 잘 대처하고 있는가?

우리나라의 상황은 기후변화 자체에 대한 위험, 즉 물리적 리스크는 작으나 이행 리스크가 크다고 볼 수 있다. 여러 보고서에 따르면 우리나라의 경우 물리적 리스크는 매우 작은 편으로 나타나며 기후 리스크 지표를 산출 및 공표한 Eckstein, Künzel, and Schäfer(2018)에 따르면 2017년 기준 물리적 리스크로 인한 GDP 손실은 0.08%로 세계 108위이다. 반면 이행 리스크가 큰 이유는 기후변화에 대한 대처가 늦게 시작했다는 점, 탄소 배출이 많은 석탄을 주요 에너지원으로 사용하고 있다는 점에서 좌초자산의 문제가 심각할 수 있다는 점, BCA의 가능성이 크다는 점 등 때문이다.

우리나라는 2020년 기후변화 대응지수 조사에서 59개국 중에서 56위를 차지했다.³⁸⁾ 또한 탄소 배출의 절대량 뿐만 아니라 1인당 배출량도 매우 많은데, 2016년 기준 절대적 배출량의 비중은 중국(28%), 미국(14%), 인도(7%), 러시아(5%), 일본(3%), 독일(2%)에 이어 우리나라(2%)는 세계 7위이며 2016년 기준 1인당 배출량으로 따지면 사우디아라비아, 호주, 미국, 캐나다에 이어 세계 5위이다.³⁹⁾ GDP와 온실가스 사이 상관관계로 해석할 수 있는 국가별 탈동조화 지수를 계산한 허가형, 김윤희 (2020)에 따르면 2010년 이후 우리나라를 제외한 주요 OECD 국가는 모두 강한 탈동조화 추세를 보였지만 우리나라의 경우 탈동조화 정도가 가장 약하게 나왔다.

좌초자산 관련 리스크는 셰일가스 개발 등 자원환경의 변화, 정부 규제, 청정 에너지 가격 하락, 사회적 규범의 변화, 소송 등을 통해 발생할 수 있다(Caldecott et al., 2016). 기후변화가 금융시장에 미치는 영향을 연구

38) <https://www.climate-change-performance-index.org/>

39) <https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions>

하는 Carbon Tracker Initiative의 2019년 보고서는 가동 중이거나 건설 중인 석탄화력 발전소로 인한 국가별, 지역별 좌초자산 위험 규모를 추정하였는데 분석 대상 34개 국가 중 우리나라가 가장 규모가 컸다.⁴⁰⁾ 보고서는 2도 시나리오 하에서 석탄 발전 시설들이 벌어들일 현금 흐름의 현재 가치와 시나리오가 없을 경우 현재가치를 비교했는데 우리나라의 경우 120조원을 상회하며 일본의 5배 이상인 것으로 계산되었다. 2014년 기준 화석 에너지에서 석탄이 차지하는 비중이 전 세계의 경우 42%인 반면 우리나라의 경우 53%에 달한다.⁴¹⁾⁴²⁾

우리나라와 관련된 또 하나의 리스크는 BCA를 들 수 있다. 유럽연합 집행위원회(European Commission)은 2019년 11월 EU판 그린뉴딜이라 부를 수 있는 ‘그린딜’ 계획을 발표하며 2050년까지 유럽을 최초의 탄소 중립 대륙으로 만들겠다는 야심찬 선언을 하였는데 그린딜에는 늦어도 2023년 1월까지 역내 27개국에 수입되는 제품의 탄소 함유량에 비례해서 관세를 부과하겠다는 계획이 포함되어 있다. EU는 국경간 탄소 관세를 부과함으로써 저탄소 경제로의 빠른 이행을 도모하면서 EU 소재 기업의 유출을 막고, 관련 소요 예산을 충당하는 목적으로 고려하고 있다.⁴³⁾ BCA로 인한 수입가격의 변화는 수출국, 수입국 후방 산업에 더 큰 영향을 미칠 수 있고, 국가간, 산업간 비교우위에 큰 변화를 초래할 수 있는데 한 조사에 따르면 원유 가격이 \$30-40 대를 유지한다는 가정 하에 CO2 톤당 \$30의 관세를 부과하면 해외 생산자의 이윤을 20% 감소시킨다.⁴⁴⁾ <그림 2>는 우리나라 32개 대분류 산업의 수출 비중과 TVF의 관계를 보여 준다. 수출 비중은 해당 산업의 수출을 총수요로 나눈 수치이며 TVF(Transition Vulnerability Factor)는 산업별 탄소 배출을 직접 배출 뿐만 아니라 전후방 산업연관을 고려한 간접 배출까지 포함한 산업별 배출량으로 해석할 수 있다.⁴⁵⁾ <그림

40) <https://carbontransfer.wpengine.com/reports/south-korea-coal-power/>

41) https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html

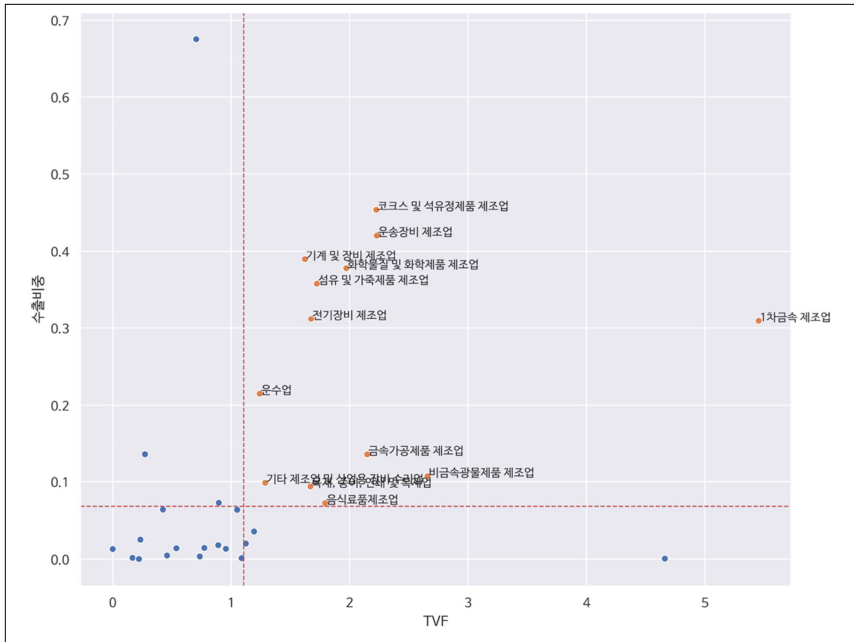
42) 우리나라의 경우 좌초자산의 문제가 심각한 만큼 정치권에서도 관심을 보이기 시작하고 있다. 2019년 3월 21일 국회에서 기후변화센터 주최로 “노후석탄화력 조기감축을 위한 정책토론회”가 개최되었는데 바로 좌초자산의 문제를 다룬 것이다.

43) Krenek, Sommer, and Schratzenstaller(2019)은 BCA의 구체적 수단들을 설명하면서 DSGE 모형을 통해 BCA의 세수를 추정하고 있는데 EU의 저탄소 경제 이행에 필요한 소요 예산을 1/3 이상 충당할 수 있다고 본다.

44) <https://www.bcg.com/publications/2020/how-an-eu-carbon-border-tax-could-jolt-world-trade>

2)에서 붉은 점선은 수출 비중과 TVF의 중위값을 보여 주는데 우리나라의 경우 TVF가 높은 산업들이 수출 비중도 높음을 알 수 있다. EU가 BCA를 실행할 경우 전지구적 차원의 '탄소 관세'가 경쟁적으로 부과될 가능성이 있는데 우리나라의 경우 BCA에 의한 충격이 클 수도 있음을 시사한다.

〈그림 2〉 우리나라 산업별 TVF와 수출 비중(TVFs and Export Shares of South Korea)



주: 빨간 점선은 각 변수의 중위값을 표시함.
 출처: 수출 비중은 한국은행 경제통계시스템(ecos.bok.or.kr)의 대분류 공급사용표를 이용해서 계산했으며, TVF는 박기영·인소영·김재윤(2020)의 방법론을 이용해서 계산.
 Note: Red dotted lines mark median values.

Source: The authors calculated each industry's weight of export and TVF using the Bank of Korea Economic Statistics System data and the methodology from Park, In, and Kim (2020), respectively.

위의 논의를 고려하면 기후변화가 가속화되거나 재생에너지 관련 기술 혁신이 늦어질수록 우리나라가 좌초자산, BCA 등으로 인해 기후 위험에 상대적으로 더 노출될 수 있음을 의미한다.

45) DNB(2018)에서 기후위험을 고려한 스트레스 테스트를 수행하며 산업별 기후위험 익스포저를 계산하기 위해 고안했으며 박기영·인소영·김재윤(2020)에서 우리나라 실정에 맞게 유사한 지표를 계산하였다.

Ⅲ. 기후변화 관련 경제학적 논의

3장에서는 기후변화와 직접적으로 연관된 경제학적 주제에 대해 논의한다. 기후변화에 대한 경제학자의 저술 중 가장 널리 알려진 Nordhaus (2013)와 Wagner and Weitzman(2015)는 기후변화에 대한 대응에 이공계 과학자들만의 역할이 있는 것이 아니라 학제간 협력이 절실하다고 강조하며 특히 경제학(자)의 역할이 매우 중요하다고 주장한다. 기실 노드하우스의 2018년 노벨경제학상 수상 업적도 넓은 범위에서 본다면 ‘의도하지 않은 인간 행위가 장기 성장과 후생에 어떤 영향을 미치는가’에 대한 성장론 연구로 볼 수 있으며, 이 주제는 자연스럽게 경제발전, 경제활동과 에너지 소비, 불확실성, 외부효과, 환경을 고려한 경제 회계(environmental-economic accounting) 등 경제학의 여러 분야와 자연스럽게 연결된다는 것을 알 수 있다.⁴⁶⁾

경제학은 여러 측면에서 기후변화 연구에 기여할 수 있다. 첫째, 다양한 기후변화 대응책들이 제안되고 실행되고 있는데 이들 정책에 대한 모델링, 비용편익 분석과 정책효과 분석(policy evaluation)은 경제학자들이 기여할 수 있는 분야이다. 일례로 탄소의 사회적 비용, 저탄소 경제 이행에 필요한 최적 정책 등을 계산 및 평가하기 위해서 통합평가모형(IAM)을 사용하고 있는데 이 모형은 사실상 신고전파 성장모형에 경제가 온실가스 배출에 미치는 영향, 온실가스가 대기 온도에 미치는 영향 등을 고려하는 부문을 추가시킨 것으로 볼 수 있다.⁴⁷⁾ 또한 탄소 배출량 예측과 관련된 가장 큰 불확실성 중 하나는 향후 세계 경제성장률 예측에 있는데 경제학자들은 경제예측 분야에서 기여할 수 있다.

46) Barnett, Brock, and Hansen(2020)은 기후변화와 관련된 불확실성을 자산가격 이론을 이용해서 가격을 매기는 연구를 하었는데, 불확실성(uncertainty)의 개념을 위험(risk), 모호성(ambiguity), 모형 설정상 오류(misspecification), 세 가지로 분류해서 보길 제안하고 있다. 위험은 모형 내에서의(within a model) 불확실성이며 이미 알고 있는 확률 분포에서 어떤 결과가 나올지에 대한 불확실성을 의미하며, 모호성은 모형 간(across models) 불확실성을 의미하며 대안적인 여러 모형들에 대해서 어떻게 가중치를 부여해야 하는지에 대한 불확실성이다. 모형 설정상 오류는 모형 자체에 대한 불확실성으로 현실을 근사화 하는 모형이 가지고 있는, 그러나 알려지지 않은 오류를 의미한다.

47) 아래에서 더 자세하게 설명한다.

둘째, 할인율(discount rate)에 대한 연구를 들 수 있다. 기후변화의 장기적 효과를 고려하면 후속 세대의 후생을 고려하는 것은 필수적이나 비용은 현재를 기점으로 단기간에 발생하고 편익은 먼 미래에 천천히 나타나므로 현 세대와 후속 세대의 상대적 후생을 어떻게 정할지가 중요한 연구 주제이다. Stern(2007)은 후세의 후생을 크게 할인하는 것은 비윤리적이라 주장하며 1.0-1.5% 정도의 할인율이 적정하다고 주장한다. Stern(2007)의 수치는 상대적으로 할인율이 낮으므로 기후변화에 대한 빠른 조치를 주장한다. Wagner and Weitzman(2015)도 기후변화의 재앙적 효과는 팻테일 리스크(fat tail risk)에 해당하지만 해당 확률을 정확하게 알 수 없기 때문에 1-2%의 보수적인 값을 사용하는 것이 적절하다고 본다. 반면 Nordhaus(2013)는 할인율은 자본의 기회비용 또는 사적 수익률에 의해 결정되어야 하며 미국의 경우 4% 수준이 적정하다고 본다. 마찬가지로 Becker, Murphy, and Topel(2010)도 할인율을 세대간 형평성이라는 철학적 문제로 볼 필요가 없고, 단순하게 경제적인 기회비용의 관점에서 할인율을 정하면 된다고 본다. 미국 연방정부는 사업계획 수립시 7%의 할인율을 사용하고 있다.⁴⁸⁾ 또한 개별 국가가 처한 경제적 환경에 따라 적정 할인율에 대한 판단이 다를 수도 있다. 예를 들어, 미국과 중국의 할인율은 다를 수 있으며 현 시점에서 상대적으로 경제성장이 더 중요한 중국의 경우 현재의 소비를 더 선호할 수 있으며 더 높은 할인율이 적절한 선택일 수 있다. 실제로 할인율을 얼마로 하나에 따라 수많은 정책 대안들의 우선 순위가 바뀌기 때문에 경제학의 역할이 매우 중요하며, 할인율의 문제는 윤리적 문제와도 맞닿아 있다.

세째, 외부효과에 대한 연구 때문이다. 앞서 강조한 바와 같이 기후변화의 가장 큰 특징이자 해결의 걸림돌은 기후변화가 전지구적 외부성의 효과를 가지며 무임승차의 문제를 야기함으로써 문제 해결을 어렵게 한다는 것이다. 외부효과에 대한 이론적, 정책적 논의를 가장 앞서서, 활발하게 주도하는 학문 분야는 경제학이기 때문에 이 부분에서 경제학의 역할이 요구된다고 볼 수 있다.

48) 연간 7%의 할인율의 의미를 비유하자면 50년 뒤 후손의 100만원 손실을 막기 위해 현 시점에서 3만원 이상을 지출하길 꺼려하게 되는 것과 같다.

<https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/omb/assets/OMB/circulars/a094/a094.html>.

아래에서는 먼저 기후변화 관련 가장 널리 쓰이는 수리적 모형이라 할 수 있는 통합평가모형의 역사와 구조, 관련 최신 연구를 살펴 보고, 경제학자들에게 가장 선호되는 온실가스 저감책인 탄소세와 배출권 제도에 대해서 논의한다. 저탄소 경제로 이행하는 과정에서 막대한 자금이 소요되는데 이와 관련된 논의인 기후금융, 그리고 기후 리스크에 대한 금융시장의 안정성을 평가하는 기후 스트레스 테스트의 개념, 사례, 관련 논의를 살펴 보고 최근 우리나라에서도 활발하게 논의되는 그린뉴딜에 대해 논의한다.

1. 통합평가모형(IAM: Integrated Assessment Models)⁴⁹⁾

1950, 60년대 전후 경제 호황을 겪은 뒤 1970년대 들어서 경제성장에 대한 회의론이 등장했으며 ‘인구폭탄’, ‘성장의 한계’과 같이 Ehrlich(1971), Meadows(1972)의 저서 제목처럼 성장을 제약하는 주된 요소로 에너지와 자원 부족을 거론하였다. Nordhaus and Tobin(1972), Nordhaus(1974)는 비슷한 문제의식을 가지고 연구한 결과 자원 부족 때문에 성장이 제약될 가능성은 그리 크지 않으며 오히려 온실효과와 같은 전지구적 외부성을 갖는 에너지 관련 외부성이 훨씬 더 심각한 문제일 것이라 결론 내렸다. 기후변화에 대한 경제학적 연구에 대한 공헌으로 2018년 노벨경제학상을 수상한 노드하우스는 당시 위와 같은 기후 문제를 경제학만으로 해결하기 힘들 수 있다고 판단하고 학제간 연구를 하는 오스트리아의 국제응용시스템분석연구소(IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis) 연구진과 교류하고 Nordhaus(1975)를 통해 탄소 사이클과 온실가스 대기 농도에 대한 제약 등을 경제학의 선형 프로그래밍 모형에 포함한 기후 관련 최초의 경제학적 모형을 제시하였다. Nordhaus(1977)에서는 현재 탄소의 사회적 비용 연구의 주춧돌이 되는 탄소의 그림자 가격

49) 지난 수십년 동안의 통합평가모형 연구에 대해 모두 소개하는 것은 지면 관계상 불가능하므로 여기에서는 기후변화를 명시적으로 고려한 최초의 경제학 모형이라 할 수 있는 통합평가모형의 구조와 필수 요소들을 살펴 보고, 최근에 나온 이론적 모형 중 주목할만한 연구들을 간략하게 소개한다. Nikas et al.(2018)은 통합평가모형에 대한 개괄적 소개와 60개 관련 모형들을 비교하였다. Farmer et al.(2015)는 기존 통합평가모형에 대한 반성과 대안으로 기후변화 관련 DSGE모형과 행위자 기반 모형(ABM: Agent-Based Model)의 가능성을 고찰하였다.

(shadow price)을 계산하였다. 이후 Nordhaus(1980)에서 탄소 배출, 기후 시스템, 기후변화의 경제에 대한 손실함수(damage function)를 포괄한 최초의 최적화 모형을 제시하였다. DICE(Dynamic Integrated model of Climate and the Economy)라 불리는 모형을 처음 발표한 Nordhaus(1992)는 다수의 경제학 학술지에서 게재를 거절당하다가 1992년 Science에 발표되었다. 이후 Nordhaus and Yang(1996)은 지역 단위 분석이 가능한 RICE(Regional Integrated Climate-Economy model)를 발표하였고, DICE, RICE와 더불어 Richard Tol이 개발한 FUND(Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), Hope, Anderson, and Wenman(1993)에서 시작된 PAGE(Policy Analysis of the Greenhouse Effect) 모형이 대표적인 기후변화 IAM이라 볼 수 있다.⁵⁰⁾⁵¹⁾

IAM은 기본적으로 탄소 배출이 경제에 미치는 영향에 대한 경제학적 모형에 탄소 사이클, 복사 강제력 방정식(radiative forcing equation), 기후변화 방정식(climate-change equation), 기후변화로 인한 손실 관계(climate damage relationship) 등 기후에 영향을 미치는 지구물리학적(geophysical) 요소들을 통합한 것이다.⁵²⁾ Pindyck(2013)에 따르면 IAM은 아래와 같이 크게 여섯 가지의 구성 요소를 가지고 있다.

1) 탄소배출: 온실가스 감축을 위한 어떤 조치도 취하지 않은 BAU

50) 이들 모형들 모두 웹사이트에서 모형에 대한 소개와 관련 코드를 공개하고 있다. 웹사이트는 다음과 같다:

DICE, RICE: <https://sites.google.com/site/williamdnordhaus/dice-rice>

FUND: <http://www.fund-model.org/>

PAGE: <https://www.climatecolab.org/wiki/PAGE>

그리고 통합평가모형 컨소시엄(IAMC: Integrated Assessment Modeling Consortium)에서는 주요 통합평가모형들에 대한 특징을 소개하고 있다:

<https://www.iamconsortium.org/resources/models-documentation/>

51) IAM을 사용한 우리나라 연구로는 한국환경정책평가연구원(2009), 한국환경정책평가연구원(2012), 안영환·김동구(2017)을 들 수 있다. 한국환경정책평가연구원(2009), 한국환경정책평가연구원(2012)은 일련의 연구를 통해 우리나라 실정에 맞는 사회, 경제적 시나리오를 설정하고 수자원, 산림생태계, 해안, 건강, 식량 분야에 대한 영향을 경제적으로 산정하는 작업을 하였는데 해당 연구들은 PAGE, 모형을 이용해서 감축 및 완화정책의 효과를 시산하였다. 안영환·김동구(2017)은 한국을 독립된 지역으로 다루는 한국형 RICE 모형을 구축하여 국제간 공조의 정도에 따른 온실가스 배출량을 계산하고 우리나라 GDP에 대한 효과를 검토하였다.

52) DICE 모형에 대한 개념적 설명과 수식에 대한 입문적 수준의 소개는 Nordhaus(2008)에서 찾을 수 있다.

- (business as usual) 상황의 배출량과 다른 시나리오 상의 배출량 전망치를 제시
- 2) 탄소 집약도: 과거, 현재, 미래 배출량에 기반한 대기 탄소 집중도(carbon concentration) 전망치를 계산
 - 3) 기후 민감도: 탄소 집중도가 평균 대기 온도에 미치는 효과를 계산
 - 4) 손실함수: 기후변화로 인한 손실을 GDP나 소비로 환산
 - 5) 저감비용: 현재와 미래의 온실가스 배출을 줄이는데 소요되는 비용을 계산
 - 6) 경제동학: 에너지와 기술 부문을 포함한 일반균형 모형으로 경제 부문을 묘사

현재 거시경제학에서 많이 쓰이는 DSGE(Dynamic Stochastic General Equilibrium) 모형의 요소들을 공유하고 있는데 그 이유는 온도 변화, 재난 등 확률적이며 동태적이고 미래지향적(forward-looking) 요소들을 고려해야만 적절한 분석이 가능하기 때문이다. IAM는 다양한 목적으로 사용될 수 있다. 탄소 배출의 최적 저감경로를 계산한 뒤 탄소세의 최적 세율, 그리고 이에 기반한 최적 기후정책을 구할 수 있으며 동시에 기후 민감도, 할인율, 재생에너지 발전 정도에 따른 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행할 수 있다. 또한 전지구적 기후협약들의 사회적 비용을 계산해서 비용효율적인(cost-effective) 정책을 선정하는데 사용될 수 있다.⁵³⁾

아래에서는 매우 단순화된, 그러나 전형적인 IAM 모형에 사용되는 공식들을 간략하게 살펴 본다. 식 (1)-(5)는 탄소의 사회적 비용을 계산하는데 사용되는 식이다.

$$E_t^{gross} = \sigma_t Y_t \quad (1)$$

$$S_t = S_{2020} + \xi \sum_{t=2020}^T E_t \quad (2)$$

53) 우리나라를 대상으로 한 경제학 모형 분석은 많지 않다. 황문성·박종현·김영민(2009)은 내생적 성장모형에 탄소 비중이 상이한 중간재 투입 부문을 결합한 뒤 온실가스 감축의 효과를 분석하였다. 안상기(2015)는 Annicchiarico and Dio(2015)에 기반해서 환경을 고려한 뉴케인지언 DSGE 모형을 구축한 뒤 배출권 거래제와 탄소세가 국내 거시경제에 미치는 영향과 전지구적 협력의 중요성을 분석하였다.

$$T_t = T_{2020} + \eta \log_2 \left(\frac{S_t}{S_{1850}} \right) \quad (3)$$

$$D(T_t) = \phi_1 T_t^{\phi_2} \quad \text{또는} \quad 1 - D(T_t) = \frac{1}{1 + \alpha_1 T_t + \alpha_2 T_t^{\alpha_3}} \quad (4)$$

$$r_t = \rho + \alpha g_t^* \quad (5)$$

식 (1)을 통해 향후 GDP 예상치(예를 들어, Y_{2030} , Y_{2040} , Y_{2050} 등)가 주어진 상황에서 경제활동과 관련된 탄소배출 유량(E_t)을 계산할 수 있고 σ_t 는 GDP 한 단위당 배출량을 의미하는 집약도(intensity)로 해석할 수 있다. 식 (2)는 탄소배출 유량과 저장(S_t)에 대한 관계식이며 ξ 는 해양에 흡수된 탄소 등을 제외하고 대기에 축적되는 탄소 배출량을 결정하는 모수이다. 식 (3)은 탄소 저장 또는 탄소 농도가 기온(T_t)에 미치는 관계를 표현한 식이다. 먼저 온실효과를 가져오는 대기 중 탄소 농도에 의해 복사강제(radiative forcing)가 이루어지는데 식 (3)의 $\eta \log_2(S_t/S_{1850})$ 가 결정한다. 즉 탄소 배출로 인한 복사 정도는 과거 대비 현재의 탄소 배출량에 비례하는데 현재 $S_t = 840\text{GtC}$ 이며 산업혁명 전 수준은 $S_{1850} = 600\text{GtC}$ 이다.⁵⁴⁾ 식 (4)는 손실 함수(damage function)로 기온과 경제에 미치는 손실을 GDP에 대한 비율로 표현한 것이다.⁵⁵⁾ ϕ_1 , ϕ_2 , α_1 , α_2 , α_3 ,와 같

54) GtC는 gigatons of carbon의 약자이며 1기가톤은 10억 metric ton에 해당한다.

55) 보다 복잡한 모형에서는 단순히 GDP 예상치를 쓰지 않고 자본 축적에 대한 식과 함께 명시적으로 생산함수를 고려하면서 손실함수를 포괄할 수도 있다. 예를 들어 생산함수와 식 (4)를 아래와 같은 형태로 연결할 수 있다.

$$Y_t = (1 - D(T_t)) A_t (K_t^\alpha L_t^{1-\alpha})$$

또는 Dietz and Stern(2015)와 같이 전형적인 자본 축적식을 아래와 같이 수정할 수 있다.

$$K_{t+1} = (1 - D(T_t))(1 - \delta)K_t + I_t$$

추가적인 논쟁 중 하나는 손실함수를 GDP의 수준(level)과 결부시킬 것인지, 또는 GDP 성장률(growth rate)과 결부시킬지 여부이다. 400여개의 관련 모형을 교차 검증(cross-validation) 기법을 이용해서 검토한 Newell, Prest, and Sexton (2018)에 따르면 기온 변화와 GDP의 관계를 잘 설명하는 모형은 기온과 GDP 수준을 비선형으로 모형한 것들이었으며 GDP 증가율과 결부한 모형들은 극단적인 수치를 제시하는 경우가 많았다. Dell, Jones, and Olken(2014)에 따르면 높은 기온이 GDP증가율을 낮추는 증거는 후진국에서만 발견되며 선진국에서는 이런 효과가 관찰되지 않았다.

은 모수는 일반화 적률법(GMM) 등을 이용해서 모형 내에서 여러 방정식들의 모수들을 동시에 추정하지 않고 자연과학 분야의 연구에서 해당 수치를 빌려 오거나 방정식 별로 따로 추정하는 것이 일반적이다. 예를 들어 식 (4)의 경우 손실($D(T_t)$)과 기온(T_t) 데이터를 확보하고 비선형 회귀식을 추정해서 관련 모수들을 추정한다. 식 (5)는 램지룰(Ramsey rule)에 의한 이자율 결정식이며 r_t 는 할인율, ρ 는 시선호율, α 는 시점간 대체탄력도의 역수, g_t^* 는 잠재성장률이다. Heal(2017)에 따르면 할인율 r_t 추정에서 가장 논란이 많으며 논의의 주된 대상은 시선호율 ρ 인데 위에서 논의한 할인율을 의미한다.

식 (1)-(5)로 탄소의 사회적 비용 등을 계산하고 기후와 경제의 관계를 분석할 수 있지만 최적 기후대책(optimal climate policy) 등을 분석하기 위해서는 아래 식 (6)-(8)과 같은 저감의 경제적 비용, 사회후생에 대한 목적함수 등 추가적인 수식이 필요하다. 식 (6)의 μ_t 은 저감 정도를 표시하며 식 (7)에서 GDP 대비로 표시된 총저감비용(TAC_t)과 연결된다. 사회후생을 극대화 시키려는 사회계획자(social planner)는 식 (8)에서 현재가치로 표시된 기후변화로 인한 손실과 저감비용 흐름의 합을 최소화시키는 저감비율 μ_t 를 선택한다.

$$E_t^{net} = (1 - \mu_t)E_t^{gross} \quad (6)$$

$$\frac{TAC_t}{Y_t} = \theta_{1t}\mu_t^{\theta_1} \quad (7)$$

$$\min_{\{\mu_t\}_{t=2020}^{2100}} \sum_{j=2020}^{2500} \frac{D(T_t)Y_t + TAC_t(\mu_t)}{(1+r_t)^{(j-2020)}} \quad (8)$$

계산 과정의 여러 단계에서 불확실성이 개입하므로 다양한 모수 값에 따른 결과들을 확인하는 민감도 분석(sensitivity analysis)이 실시되어야 한다. 전술한 바와 같이 세대간 후생에 대한 가중치인 ρ 의 경우 Stern(2006)은 윤리적 이유로 0.001 정도의 작은 값을 주장하는가 하면 Nordhaus(2013)는 자본의 기회비용에 따라 결정되어야 한다고 본다.⁵⁶⁾

56) 앞에서 논의한 할인율은 이산형 모형 $\beta^t u(C_t)$ 에서 β 를 의미하며 ρ 는 연속형 모형

또한 기후 민감도(climate sensitivity)와 관련 있는 식 (3), 재생에너지 기술 개발 등 저감기술이 영향 미칠 수 있는 식 (4), (7) 등에 있는 모수들의 값에 대한 불확실성이 존재한다.⁵⁷⁾ 식 (4)와 관련해서 DICE-2016은 $D(3^{\circ}\text{C})=2.1\%$ 로 기온이 3도 상승할 경우 전지구 GDP의 2.1% 손실이 발생하며 FUND-2013은 $D(3.5^{\circ}\text{C})=1.2\%$, PAGE-2009는 $D(3^{\circ}\text{C})=6.4\%$, 미국의 경우 $D(3^{\circ}\text{C})=1.5\%$ 로 추정한다.

위 모형은 전지구적 기후협약들을 평가하고 상대적 비용을 계산하는데 쓰일 수도 있다. 예를 들어, 기온 상승 폭을 2도 이내로 제한했던 파리 협약은 위 모형에 $T_t - T_{2020} \leq 2^{\circ}\text{C}, \forall t$ 제약을 추가시킨 것이라 볼 수 있다. 또한 아무런 조치도 취하지 않는 자유방임 정책은 $\mu_t = 0, \forall t$ 의 제약조건을, 그린뉴딜 정책을 통해 2050년까지 탄소 순배출을 0으로 만드는 정책을 평가할 때는 $\mu_t = 0, t > 2050$ 의 제약 조건을 고려할 수 있다.

DICE, RICE, PAGE, FUND 이외에도 경제학적 모형에 기반한 주목할만한 연구들이 이어지고 있다. Golosov et al.(2014)는 기후와 경제 사이의 관계를 고려한 엄밀한 일반균형 거시모형을 구축한 뒤 최적 탄소세의 닫힌 해(closed-form)를 도출하였다. 이들 모형이 대표적 경제주체(representative-agent) 모형인 반면, 기후변화의 특수성을 고려해서 다지역(multi-region) 모형을 개발하려는 노력도 계속되고 있다.⁵⁸⁾ RICE는 DICE를 확장하여 12개 지역을 다루고 있으며 FUND와 PAGE는 각각 16개, 8개 지역을 다루고 있는데 Krusell and Smith(2018)은 19,000 지역을 포괄하는 기후-경제 모형을 구축하고 지역별로 기후변화로 인한 손실, 탄소세 부과로 인한 후생 변화를 계산하였다. Acemoglu et al.(2012)는 내생적 성장모형을 이용해서 재생에너지 기술이 발전해서 재생에너지 비

$e^{rt} u(C_t)$ 의 할인율을 의미한다.

57) 모수에 따라 결과가 크게 바뀌는 경우를 들어 이들 모형의 유용성에 대해 의문을 제기하기도 하나 Wagner and Weitzman(2015)의 설명처럼 DICE, FUND, PAGE와 같은 모델링 노력을 폄하해서는 안 된다. 부정확함의 이유 중 하나는 모형 자체의 불완전성 보다는 기후에 대한 인간 이해의 불완전성 때문이며 Wagner and Weitzman(2015)는 관련 수치가 아예 없는 것보다는 더 낫다고 반문한다("is some number better than no number at all?").

58) 매기 각 지역 부(wealth) 수준이 다른 모든 지역 의사결정의 상태 변수(state variable)가 되기 때문에 기후에 대한 고려 없이도 다지역 모형은 계산상 매우 복잡한 모형이 된다는 제약이 존재한다.

용이 충분히 낮아질 경우 해당 에너지에 대한 일시적인 보조를 통해 지속가능한 발전을 성취할 수 있으며 R&D 지원과 탄소세의 결합이 최적 정책임을 보였고 이들 정책이 일찍 도입될수록 비용 측면에서 효율적임을 보였다. Acemoglu et al.(2016)는 미국의 에너지 부문 통계를 이용해서 Acemoglu et al.(2012)를 추정하였는데 R&D 지원 없이 탄소세만 부과하는 정책이나 정책 개입을 연기하는 것은 후생 손실이 크다는 것을 보였다. Cai and Lontzek(2018)는 DICE의 각 부분에 불확실성을 명시적으로 고려하고 엡스타인-진(Epstein-Zin) 효용함수를 고려해서 위험기피와 시점간 대체탄력성을 분리해서 분석할 수 있는 모형을 제시하였다. 저자들은 기후와 경제 관련 불확실성을 함께 고려할 경우 탄소의 사회적 비용 분포가 이전 분석들과 매우 다르게, 높게 나올 수 있다는 것을 보였다. 이들 모형은 불확실성을 명시적으로 고려하고, 위험기피도와 대체탄력성을 분리해서 볼 수 있다는 장점이 있는 반면 계산상 너무 복잡해서 슈퍼 컴퓨터를 써야 한다는 단점이 있다.

2. 탄소가격제(Carbon Pricing Mechanism)

탄소 배출량 저감을 위해 가장 효과적인 방법은 가격 메커니즘을 이용해서 가계, 기업, 국가가 경제적 유인에 따라 움직이게 하는 것이며 이를 탄소 가격제라 한다. 대표적인 탄소가격제 수단으로는 탄소세(carbon tax)와 배출권 제도(cap and trade)를 들 수 있다. 탄소세는 온실가스를 배출하는 화석에너지 사용량에 비례해서 부과되는 세금을 말하며 배출권 제도는 배출원에 온실가스 배출 할당량을 부여하고 할당량을 초과하는 배출분, 또는 감축분에 대해 거래를 허용하는 제도이다. 전자는 가격(price), 후자는 양(quantity)에 기반한 정책이며 불확실성이 없는 경우 양자는 동일한 결과를 가져온다.

탄소세는 온실가스 배출에 명시적인 가격을 부과하는 제도로 시장 참여자가 스스로 언제, 어느 분야에서 배출을 줄일지 결정할 수 있다. 대부분의 나라에서 조세 제도가 정비되어 있으므로 상대적으로 시행이 용이하고 정부의 재정 수입을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다. 반면 가격에 비탄력적인 소비자라면 온실가스 배출량에 직접적인 영향을 미칠 수 없으며 조세저항이

따르는 부작용이 있다. 배출권 제도는 온실가스 배출을 할 수 있는 배출권(allowance)을 거래하는 방식이며 유럽의 경우 2005년, 우리나라의 경우 2015년 1월부터 이미 시행하고 있다. 배출권 제도는 온실가스 배출량을 직접적으로 통제할 수 있으나 배출권 수요와 공급의 가격 탄력성에 따라 배출권 가격 변동성이 매우 높을 수 있다. 또한 배출권을 정부가 기업 및 사업장에 무료로 할당을 하는지, 경매를 통해 할당을 하는지에 따라 정부 수입 측면에서 탄소세와 차이가 있을 수 있다.

배출권 제도는 지원대상을 식별하기도 어렵고 효과가 상대적으로 불투명하기 때문에 현실에서는 대다수의 경제학자들이 탄소세를 지지하고 있다. 기후 리더십 위원회(Climate Leadership Council)에서 계획한 기후변화에 대한 경제학자 성명서가 2019년 1월 17일 월 스트리트 저널에 실렸는데 27명의 노벨경제학상 수상자, 4명의 전 연준의장, 15명의 전 백악관 경제자문위원장 등 2020년 9월 기준 3,589명의 미국 경제학자들이 참여했다. 성명서에 따르면 탄소세는 규모와 속도 측면에서 탄소 배출 감소를 위한 가장 비용효율적인(cost-effective) 방안이며 목표에 도달할 때까지 탄소세는 매년 인상되어야 하고 매년 증가하는 탄소세로 인해 기술 혁신과 대규모의 인프라 개발이 촉진될 수 있다. 그리고 매년 인상되는 탄소세를 부과함으로써 상대적으로 비효율적인 관련 규제들을 없앨 수 있고, 공정성을 위해서 모든 시민들에게 일괄적으로 현금으로 돌려주는 탄소 배당금(carbon dividend)을 채택할 것을 주장한다.⁵⁹⁾ 이외에도 현안에 대한 저명 경제학자들의 의견을 묻는 시카고 IGM 포럼에서도 2018년 11월 기후변화 정책 관련 서베이를 실시했는데 경제학자 79%가 탄소세를 지지하였다.⁶⁰⁾ Goulder and Hafstead(2017)는 2019년에 20불의 탄소세를 부과하고 20년간 4%씩 증가시키면 기후관련 편익이 비용보다 70% 더 큼을 보였다. 2019년 10월 IMF에서도 탄소 배출에 가격을 매기는 탄소세가 기

59) <https://clcouncil.org/economists-statement/>. 탄소 배당금 지급을 주장하는 이유는 탄소세 부가시 조세취착의 문제, 형평성의 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 자동차 연료인 가솔린의 가격이 크게 오를 수 있는데 상대적으로 저소득층의 부담이 커지게 된다. 추가적으로 이 성명은 미국 기업의 경쟁력 유지를 위해 탄소세를 도입하지 않은 나라들의 수입품에 대해서는 관세 등의 형태로 국경간 탄소 조정(border carbon adjustment)이 필요하며 이를 통해 다른 나라들도 탄소세를 도입할 동기가 발생한다고 주장한다.

60) <http://www.igmchicago.org/surveys/climate-change-policies/>

후변화를 막는데 ‘가장 강력하고 효율적인(most powerful and efficient)’ 도구라 주장하였다.⁶¹⁾

대다수의 경제학자들이 탄소세를 지지하지만 제도 실행 측면에서 탄소세를 얼마나, 어떻게 부과할 것인가의 문제가 남아 있다. 얼마의 탄소세를 부과할 것인가는 탄소의 사회적 비용(SCC: social cost of carbon)과 관련되어 있다. SCC는 대기에 배출된 이산화탄소가 경제와 생태계에 미치는 효과를 화폐 단위로 표시한 것으로 통상 IAM을 이용해서 계산한다. 문제는 기후변화의 효과 측정이 불확실한 것과 마찬가지로 ‘온실가스 배출량 예측 → 기후에 미치는 영향 계산 → 경제와 생태계에 미치는 영향 계산 → 영향을 할인율을 이용해서 현재 가치로 계산’하는 각 단계마다 불확실성이 영향을 미치기 때문에 SCC의 추정치 분산이 매우 크다는 것이다. 그리고 할인율에 따라, 지역 단위에 따라 값이 크게 변할 수 있다. 예를 들어 3%의 할인율을 적용할 경우 CO2 톤당 미국과 전세계 SCC는 각각 \$7, \$50로 계산되지만 7%의 할인율을 적용할 경우 각각 \$1, \$5로 계산이 된다.⁶²⁾ IWG(2016)에 따르면 탄소의 사회적 비용은 2018년 달러 기준 톤당 51불이며 Wagner and Weitzman(2015)의 계산에 따르면 탄소의 적절한 가격은 40달러 정도이나 전지구적으로 탄소 배출에 15불 정도의 보조금이 있는 것이나 마찬가지이다. Nordhaus(2013)는 기온 상승을 2.5도 이내로 막기 위해 필요한 탄소 가격을 보여 주는데 연구들의 평균값을 보더라도 2030년에는 50불을 상회하는 탄소 가격이 필요하다. 25불의 탄소세가 부과될 경우 석유, 천연가스, 석탄의 가격은 각각 11%, 30%, 134% 증가한다(Nordhaus, 2013). 급격한 탄소세 부과는 경제에 미치는 부정적 영향이 클 수 있으므로 일단 탄소세를 부과하고 시간이 지남에 따라 더 강력하게 부과(‘increasing stringency’)하면서 재생 에너지 개발에 동기 부여를 하는 방식이 다수의 학자들이 주장하는 바이다.⁶³⁾

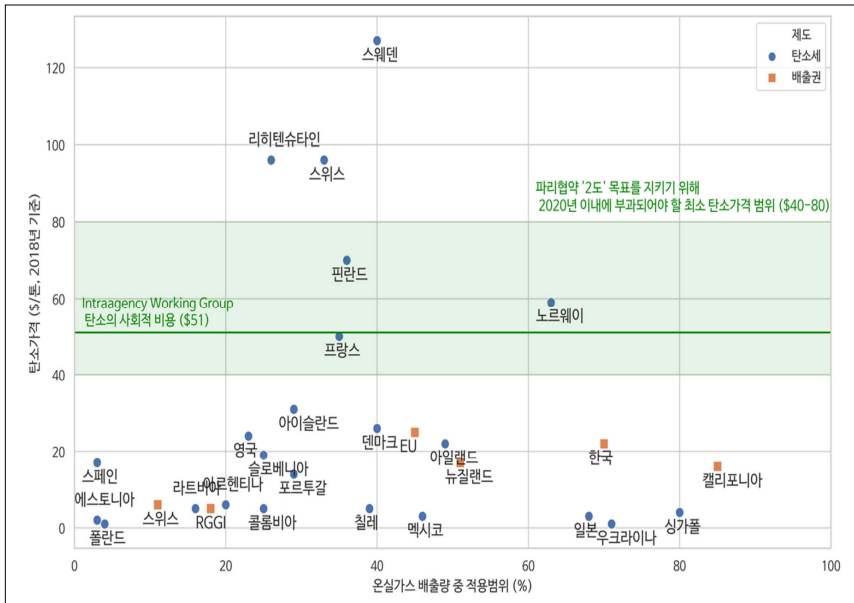
61) <https://blogs.imf.org/2019/10/10/fiscal-policies-to-curb-climate-change/>

62) <https://www.rff.org/publications/explainers/social-cost-carbon-101/>

63) 반면 Daniel, Litterman, and Wagner(2019)는 앵스타인-진 효용함수를 사용해서 시제간 대체탄력도와 위험기피를 분리하고 탄소를 부(-)의 기대 수익률을 가진 자산으로 간주한 자산가격 모형을 이용해서 사회적으로 적정한 탄소 가격의 경로는 현재에 더 높게 부과하고 시간이 지날수록 이 가격을 낮추는 것임을 보였다. 이렇게 기존 연구와 상반되는 결과가 나온 이유는 시간이 지남에 따라 기후변화 관련 불확실성이 해소되면서 탄소 저감의 ‘보험’ 효과가 감소하며 기술 혁신으로 인해 탄소 배

어떻게 탄소에 가격표를 붙일 것인지, 즉 수단과 관련해서는 스웨덴이 1991년 세계 최초로 탄소세를 부과하기 시작했고 이후 여러 나라에서 탄소세와 배출권 제도가 사용되어 왔다. <그림 3>은 전 세계 탄소가격제의 현황과 적용범위, 그리고 SCC를 보여준다. World Bank(2019a)에 따르면 2019년 기준 57개국이 탄소가격제를 도입하였으며 전 세계 탄소 중 가격이 매겨지는 비중도 2016년의 13.4%에서 2019년 20.0%로 증가했다.⁶⁴⁾ <그림 3>에서 알 수 있는 것은 첫째로 탄소세를 채택한 나라들이 배출권을 채택한 나라들보다 많다는 것이다. 둘째, 스웨덴 등 몇 개 나라를 제외하면 대부분의 나라들이 IWC에서 정한 SCC인 \$51, 파리협약 목표를 지키기 위해 필요한 최소한의 SCC인 \$40에 못 미치는 탄소 가격을 부여하고 있다. 우리나라의 경우에도 적용 비율을 높으나 배출권 제도에서 거래되는 탄

<그림 3> 전 세계 탄소가격제 현황과 적용범위(Carbon Prices and Scopes Covered by Existing Carbon Pricing Instruments)



출처: World Bank(2019a)를 이용해서 저자 작성.
Source: The authors created the Figure using data from World Bank (2019a).

출 저감의 비용이 감소하기 때문이다.
64) Ritchie and Roser(2017)에 따르면 유럽, 미국, 중국은 1850년부터 전체 배출량의 33%, 25%, 13%를 배출해 왔지만, 현재 배출량 중에서 탄소 가격이 적용되는 비중은 각각 5.5%, 1.0%, 7.0%이다.

소 가격이 적정한 SCC에 미치지 못 하고 변동성이 크다는 문제점이 있다. 국내 배출권 가격은 2015년 1월 당시 톤당 8,000원대였으나 2020년 3월 4만원을 상회했다가 2020년 9월 현재 22,000원대에서 거래되고 있다.⁶⁵⁾

탄소가격제를 일찍 실시한 국가들 대상으로 해당 정책의 효과를 분석한 연구들이 나오기 시작했다. Criqui, Jaccard, and Sterner(2019)는 스웨덴, 캐나다, 프랑스의 사례를 비교 분석했는데 이들 나라에서는 탄소세 정책이 의도한 효과를 내고 있음을 보였다. 그러나 향후 기득권과 이익집단의 로비에 어떻게 대응할 것인지, 탄소세 수입을 어떻게 사용할 지에 대해 분명한 전략이 있어야 함을 강조하고 있다. Martin, de Preux, and Wagner(2014)은 탄소세 적용 여부에 대한 외생적 변화를 도구변수로 사용하여 탄소세가 100% 세율로 부과된 영국 제조업체와 20%만 부과된 업체를 비교한 결과 탄소세가 에너지 원단위와 전력 사용량을 각각 18.1%, 22.6% 감소시켰음을 보였다. Pretis(2019)는 브리티시 컬럼비아의 5% 탄소세가 배출에 미치는 효과를 이중차분법, 가상 대조군(synthetic control) 기법으로 추정하였으나 유의미한 결과를 찾지 못 했으며 현행 탄소세율이 배출량에 영향을 끼칠 정도로 크지 않았음을 보였다. 반면 세금이 부과되지 않은 지역의 고탄소 배출 산업에서 효율적인 저감 장치를 사용하거나, 공장을 폐쇄하는 것이 배출량 감소에 효과적이었음을 보였다. 저자들은 이 결과를 탄소세의 무용론에 대한 증거로 해석하지 않고 기대한 효과가 나올 정도로 탄소세율이 높게 부과되지 않은 것이라 해석한다. Calel and Dechezleprêtre(2016)은 EU ETS가 기술 변화에 미치는 인과 관계를 추정하였는데 규제 기업들의 저탄소 기술 혁신이 10% 증가하였음을 보였다.

탄소 가격제의 장점 중 하나는 세수를 확보할 수 있다는 점이다. World Bank(2019b)에 따르면 관련 세수는 2016년 220억 달러에서 2018년 400억 달러로 증가했으며 톤당 70달러의 탄소세가 부과된다면 전세계 GDP의 1-3%에 해당하는 세수를 올릴 수 있다고 전망한다. 관련 세수는 여러 목적으로 사용될 수 있다: (1) 기존의 비효율적인 세금을 대체하고, (2) 저탄소 기술 개발에 투자하고, (3) 교육, 의료 관련 공공 사업에 투자하고, (4) 저탄소 경제 이행과정에서 소외되거나 손해를 입은 개인이나 기

65) 우리나라 탄소배출권 가격은 한국거래소 배출권시장 정보플랫폼(ets.krx.co.kr)에서 파악할 수 있다.

업에 대한 지원을 하고, (5) 미래 세대의 부채를 감소시키는 목적 등으로 사용할 수 있다. Carl and Fedor(2016)에 따르면 탄소세의 경우 전세계 수입 156억 달러의 72%가 환급되었거나 공공 목적으로 사용되었으며 배출권 제도의 경우 46억 달러의 70%가 환경 친화적 목적을 위해 사용되었다.

3. 기후금융(Climate Finance)

저탄소 경제로의 이행은 막대한 자금이 필요하다. International Energy Agency(2014)는 2035년까지 전세계적으로 48억 달러의 신규 투자가 필요하다고 예상했고, New Climate Economy(2016)는 개도국이 유엔지속가능성장 목표를 달성하기 위해서는 매년 4억 달러의 신규 투자가 필요하다고 산정한다. 이행 과정에서 필요한 자금 조달의 중요성을 국제간 공조에서도 인식하였으며 2015년 파리 협약은 기존 국제협약과 달리 처음으로 기후변화 방지 및 대응에 있어서 금융의 역할을 명시화했고 기후금융의 개념이 중요하게 대두되었다.⁶⁶⁾ FCCC(2018)에 따르면 기후금융은 온실가스 배출을 줄이고, 부정적인 기후변화 충격에 대한 인간과 생태계의 취약성을 보완하면서, 동시에 회복력을 제공하는 목적을 가진 금융을 의미한다.

기본적으로 투자결정 과정에서 환경과 사회적 사안을 고려하여 결정하는 경우를 통틀어 기후금융 또는 녹색금융(green finance)이라 일컫는데, 전통적인 자산 가격 결정 요소들과 환경 관련 요소들 사이에서 우선순위를 어떻게 두느냐에 따라 상호배타적은 아니지만 개념상 구분할 여지가 있다. 첫째, 사회적 책임 투자(SRI: Socially Responsible Investment)는 환경에 치명적인 영향을 미치는 투자처를 제외시키는 방식(negative screening)으로 투자를 한다. 두번째, 임팩트 투자(impact investing)는 사회적 책임 투자보다 더 적극적으로 환경, 사회적으로 긍정적인 영향을 줄 수 있는 기업들을 발굴, 투자를 하는 방식을 의미한다. 환경, 사회, 지배구조, 즉 ESG(Environmental, Social and Governance) 기준으로 해당 투자의

66) 파리협약서 2조 1c항은 “making finance flows consistent with a pathway towards low greenhouse gas emissions and climate-resilient development”라고 명시하고 있다(United Nations, 2015).

영향(impact)이 큰 분야에 투자를 한다. 세째, 이윤 극대화를 피하는 민간 투자자에게 부정적인 의미를 줄 수 있는 요소를 제외하는 명칭을 사용하는 ESG 통합투자(ESG integration)를 들 수 있다. UN산하 책임투자원칙기구(UN PRI: UN Principals for Responsible Investment)는 ESG 통합투자를 “투자 분석 및 결정과정에서 ESG이슈를 명확하고 체계적으로 포함시키는 행위”이라고 정의하고, 실질적으로 투자성과에 영향을 미치는 ESG 이슈를 판별하고 기존 자산 가격 결정 요소에 통합하는 과정을 강조한다.⁶⁷⁾ 최근에는 기후금융보다 더 광범위한 의미를 지닌 “지속가능한투자(sustainable investment)”라는 용어가 자주 사용되는데, 이는 저탄소, 복원력 있는 경제로의 이행을 위한 일련의 투자행위를 지칭하며 투자자가 기업의 환경 영향 등과 관련한 의사결정에 적극적으로 참여하는 이해관계자 행동주의(shareholder activism)의 개념까지 포함한다.⁶⁸⁾

파리 협정 이행에 필요한 자금 규모는 각국 정부들의 재정 여력을 훨씬 웃돌기 때문에 민간과 공공 부문의 협력이 필수적이거나 재무적 이익보다 사회적 영향을 우선시 하는 경향은 이윤 극대화를 추구하는 민간금융 전반에서 이행 상충의 문제가 있을 수 있다.⁶⁹⁾ 특히 신탁의무(fiduciary duty)를 가진 자산 관리자들에게는 재무적 정당성(financial legitimacy)보다 기후변화의 대의를 우선시하는 것이 불가능하게 받아들여졌다. 따라서 기후금융 관련 중요한 논점은 이 둘 사이의 관계를 어떻게 이해하고 조화시키는

67) UN PRI는 투자 결정을 할 때 대상 기업의 재무적 성과 외에 ESG 등 비재무적 성과를 반영한다는 등 6개의 투자 원칙을 천명하고 있고, 현재 세계적으로 총 90조 달러를 운용하는 약 2,500개 금융기관 및 컨설팅 기관이 서명하였다(UN Principles for Responsible Investment, 2019).

68) In, Lee, and Eccles(2020)은 사이언토메트릭 기법(scientometric methodology)을 이용해서 2017-2019년 기간 26,111개의 논문을 대상으로 기업의 사회적 책임(CSR: Corporate Social Responsibility)와 ESG 등의 개념이 지난 47년간 어떻게 형성되고 변화되어 왔는지를 분석했다.

69) 최근 기후변화에 대한 대중의 인식 변화 등으로 인해 기후금융의 규모와 종류가 전 세계적으로 증가하고 있는데 민간 분야의 인식 변화와 적극적 참여를 위해 ‘혼합금융(blended finance)’의 개념이 기후금융에서도 이용되고 있다. 혼합금융은 말 그대로 민간자본과 공공자본의 ‘혼합’을 의미하는데 공공자본이 마중물 역할을 함으로써 투자위험 또는 낮은 수익률로 투자를 꺼리는 민간자본을 유치하는 것을 의미한다. 혼합금융은 기존의 민관투자협력(PPP: Public-Private Partnership)과 비슷하나, 실제 투자 재원이 민간과 공공 양쪽에서 제공이 되며 그 재원이 이분법적이지 않고 더 다양하다는 점에서 그 차이가 있다(Choi and Seiger, 2020; Zhang and Maruyama, 2001).

냐에 집중되어 있다.⁷⁰⁾ 이와 관련한 몇가지 논점들이 해결될 필요가 있다. 첫째, 경제학, 경영학의 기후금융 관련 연구에서 중요하게 대두되는 문제는 기업 이윤의 극대화와 환경적 가치 준수가 일치할 수 있는가 여부이다. 주지하다시피 Friedman(1970)은 기업의 유일한 책임은 이윤 창출에 있다고 주장했다. 기고문은 학계에서 큰 논란을 일으켰으며 Friedman의 주장을 지지하는 연구와 반대하는 연구가 오늘날 까지도 논쟁을 계속하고 있다. 1970년대 들어서 일부 기업의 환경 관련 데이터가 제공됨에 따라 기업의 환경 수행 평가와 기업의 가치를 비교하는 실증 연구가 많이 이루어졌으나 실증적 연구도 아직까지 의견의 일치를 보지 못하고 있다. 기존 실증연구들을 비교, 분석하는 메타 연구도 많이 이루어졌으나 다수의 연구들이 기업의 환경 평가와 가치의 관계는 혼재되어 있다고 결론을 내리고 있다. 뚜렷한 결론이 나지 않는 주된 이유로는 이론적 논의의 부족, 데이터 부족, 실증 분석방법의 불일치 등을 꼽힌다.⁷¹⁾ 예를 들면, Bolton and Kacperczyk (2020)은 미국 주식 시장에서 탄소 배출량이 많은 기업일수록 위험을 조정한 초과 수익(abnormal return)이 더 높게 나타나며 매출액 대비 배출량은 주식시장의 횡단면 수익률을 설명하지 못 한다고 보고하는 반면 In, Park, and Monk(2019)은 2009년 이후 미국 주식시장에서 소규모 기업을 제외한 상태에서 매출액 대비 배출량이 낮은 기업을 사고, 매출액 대비 배출량이 큰 기업을 파는 전략을 사용할 경우 연간 3-5%의 초과 수익을 올릴 수 있음을 보고한다.

둘째, 어떤 기준과 방법으로 기업의 환경 수행을 평가할 것인가 이다. 이는 ESG 데이터의 상품화와 이에 따른 신뢰성, 지속가능 회계기준 위원회(SASB: Sustainable Accounting Standards Board), 국제 지속가능 경영보고서 가이드라인(GRI: Global Reporting Initiatives)의 등장과

70) Soezer(2018)은 파리 협약 이행을 위한 재원 중 85-90% 가량이 민간투자자로부터 이루어질 것이라고 전망했지만, 현재로서는 그 규모와 속도 면에서 기대에 훨씬 못 미치고 있으며 Barbara, et al.(2019)는 기후금융 자본의 원천(capital sources)에 따른 분류를 하였는데 2017-18년 기후금융 투자 중 민간자본과 공공자본 비중은 각각 56%, 44%로 시장의 역할이 더 크다는 것을 보여준다.

71) 해당 주제로는 다음 논문들을 참고하십시오: Albertini(2013), Allouche and Laroche(2005), Dixon-Fowler(2013), Endrikat, Guenther, and Hoppe(2014), Fifka(2013), Friede, Busch, and Bassen(2015), Margolis, Hillary, and Walsh(2009), Orlitzky, Schmidt, and Rynes(2003), Rathner(2013), Revelli and Viviani(2015).

합, 그리고 EU 분류체계(taxonomy) 등과 연결이 되어있다.⁷²⁾ 환경이란 개념은 기업을 둘러싼 모든 요소를 포함할 정도로 광범위하기 때문에 기업의 환경 수행을 평가하기 위해서는 뚜렷한 평가 준거가 있어야 하지만 전세계적으로 아직 공통된 평가 기준을 도출해내지 못하고 있다. 최근 들어 MSCI, Sustainalytics, ISS 등 기업의 ESG 정보를 도출, 분석하여 금융 상품이나 컨설팅 서비스를 제공하는 기업들이 늘었으나, Eccles and Strohle(2018)의 실증 분석에 따르면 각 기관의 기업정보들이 불일치한다. Semenova and Hassel(2015)은 MSCI, 톱슨 로이터사의 ASSET4, Global Engagement Services(GES) 3개 회사가 제공한 미국 기업의 환경평가 지표를 Schultze and Trommer(2012)가 제시한 세분화 기준으로 나눠서 2003년에서 2011년간 상관관계를 분석했으나, 이들 지표간 상관관계가 통계적으로 유의적이지 않았다. (Berg, Koelbel, and Rigobon, 2020)은 널리 쓰이는 ESG 평가지표인 KLD(MSCI Stats), Sustainalytics, Vigeo Eiris(Moody's), RobecoSAM(SP Global), Asset4(Refinitiv), MSCI IVA 사이 상관관계와 절대표준편차를 이용해 이질성 지표를 산출하고 지표들이 불일치하는 이유를 분석했는데 평가 범위와 방법의 불일치가 가장 큰 원인이고, 가중치는 상대적으로 그 비중이 적다고 분석했다. 이와 같은 평가 범위와 평가 방법의 불일치를 해결하기 여러 회계 기준들이 제안되었는데 이 중 가장 대표적인 ESG 관련 국제표준 이니셔티브는 지속가능 회계기준 위원회와 국제 지속가능 경영보고서 가이드라인이다. 전자의 경우 투자 수익성과 직결된 ESG 요소만 보고하고, 후자의 경우는 지속 가능한 발전에 기여하는 기업의 ESG를 더 광범위하게 보고하는 점에서 차이가 있다. 양자는 전략적 파트너십을 구축하고 지속가능 분야 보고 체계의 혼란을 줄이는 노력을 하고 있다.

4. 기후 스트레스 테스트(Climate Stress Test)

여러 종류의 기후 리스크가 존재하는데 금융시장에 영향을 미칠 수 있는

72) EU 분류체계는 2019년 12월 채택되었는데 '환경적으로 지속 가능한 경제활동'을 판단하는 기준으로 지속가능 금융의 국제적 기준으로 활용될 가능성이 높다: https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities_en

전과 경로로 물리적 리스크, 이행 리스크, 배상책임 리스크(liability risk) 등을 들 수 있다. 전술한 바와 같이 물리적 리스크는 태풍, 해수면 상승, 혹서 등 기후변화가 인간과 자연에 초래할 가능성이 있는 직간접적 취약성을 의미한다. 이행 리스크는 저탄소 경제로 이행하는 과정과 관련된 기술 혁신, 정책 및 사회적 규범, 시장 수요의 변화 등이 야기하는 불확실성이 초래하는 금융 충격을 의미한다. 예를 들어, 기온 상승을 1.5도 이내로 유지할 경우 상당량의 화석연료와 관련 설비가 가치를 상실하게 되는데 이런 류의 좌초자산이 기업 가치 훼손, 투자 손실 등을 초래하게 될 수 있다. 또한 기후변화 대책의 전지구적 참여를 위해 무임승차를 하는 국가의 수출품에 대해 국경에서 탄소 배출의 정도에 따라 관세를 부과하는 BCA가 제안되고 있는데 이런 제도가 시행될 경우 저탄소 경제로 이행이 늦은 국가들은 불이익을 입을 수 있다. 배상책임 리스크는 기후변화 관련 소송의 결과 과도한 배상금으로 인한 기업의 파산 가능성을 의미하는데 2019년 캘리포니아 산불로 인해 PG&E 전력회사는 25억 달러의 손해배상 청구를 받았으며 파산 보호 신청을 낸 것을 예로 들 수 있다.

기후변화의 심각성과 저탄소 경제(low-carbon economy)로 이행하는 과정에 잠재된 불확실성에 대해서 개별 금융기관 뿐만 아니라 중앙은행과 감독기구에서도 인식하기 시작했으며 해외의 해당 기구들은 기후 위험(climate risk)에 대한 대비를 시작했다. 영란은행 총재를 역임한 Carney (2015)는 기후변화의 여파로 자산가격이 급격하게 변화할 경우 탄소 집약도(carbon intensity)가 높은 활동에 의존하는 기업들의 재무 상태가 악화되고 그 결과 시스템 리스크가 발생하는 “기후 민스키 모먼트(climate Minsky Moment)”의 가능성을 경고했다. Bolton et al.(2020)는 같은 맥락에서 기후변화로 인한 금융위기를 “그린 스완(green swan)”이라 지칭하며 중앙은행이 향후 ‘기후변화에 대한 최종 구조자(climate rescuer of last resort)’의 역할을 하게 될 수도 있다고 주장한다. 이런 맥락에서 해외 중앙은행과 금융감독 기구들이 기후 위기를 고려한 스트레스 테스트 및 대처 방안 등을 잇달아 발표하기 시작하였는데 네덜란드 중앙은행(DNB)은 여러 시나리오에 따라 이행 과정에서 나타날 거시 충격을 시산하고 56개 산업의 취약도를 측정하는 방식으로 스트레스 테스트를 이미 수행하였다(DNB, 2018). 2019년 12월 영란은행은 영국의 대형 은행과 보험사를 대

상으로 기후변화 시나리오를 고려하는 스트레스 테스트를 실시하며 2021년 상반기까지 결과가 나오도록 하겠다고 발표하였다. 녹색금융 시스템을 위한 네트워크(NGFS: Network for Greening the Financial System) 결정을 주도했던 프랑스 중앙은행(Banque de France)은 2020년 1월 금융기관을 대상으로 기후변화 관련 스트레스 테스트를 2020년 12월 이내에 마칠 것이라 발표하였다.⁷³⁾ 우리나라의 경우 본격적인 기후 스트레스 테스트는 아니지만 박수련·정연수(2018)이 좌초자산 관련 국내은행 잠재손실 규모를 시산하였다. 연구에 따르면 2017년 말 기준 국내 은행의 잠재손실 규모는 총자산의 0.8% 수준인 17.9조원이며 BIS 자기비율은 평균 1.1%p 하락하는 것으로 나타났다.⁷⁴⁾

기후 스트레스 테스트(climate stress test)가 기존 스트레스 테스트와 구별되는 점이 몇 가지 있다. 먼저 Campiglio et al.(2018)가 지적했듯이 분석 목적에 적절한 수준의 자세한 데이터가 아직 부족한 상태이다. 예를 들어, 산업별, 신용 등급별 기후 위험에 대한 노출(exposure) 정도를 정확하게 파악하기 위해서는 투자자, 상품 단위의 주식, 채권 보유 관련 데이터가 확보되어야 하며 동시에 탄소 위험 노출(carbon risk exposure) 데이터가 있어야 한다. 둘째, 거시경제, 금융시스템, 기후변화와 환경정책 간 동태적 상호작용을 포괄하는 지난한 모형화 작업이 필요하다. 또는 이 작업을 우회하기 위해 단순화 가정이 필요하다. 달리 표현하면 현 단계에서 만족할 정도로 기후변화 부문, 거시경제 부문, 그리고 두 부문의 상호작용을 만족스럽게 묘사하는 모형이 없다고 볼 수 있다. 이런 이유로 NGFS(2020)는 현 단계에서 불만족스러운 단일 모형보다는 여러 모형들('a suite of models')을 내적으로 일관성 있게 사용하는 것을 권장하고 있다. 예를 들어, DNB(2018)는 관련 정책이 경제에 미치는 영향만 분석하고 경제가 환경에 미치는 분석은 시도하지 않았다. 현 단계 기후 스트레스 테스트는 가용 데이터, 접근방식, 시나리오, 모형, 분석 목적 등의 조합에 따라 다양한

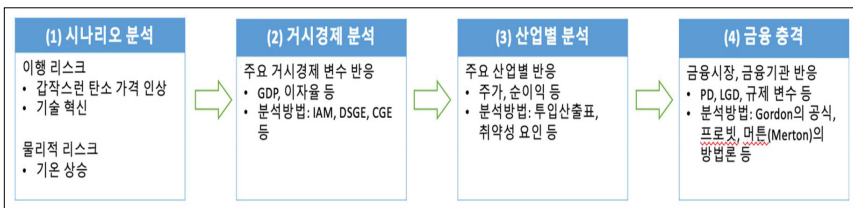
73) 녹색금융 시스템을 위한 네트워크(NGFS)는 기후변화 관련 금융 리스크 관리를 위한 중앙은행 및 감독기구 논의체로 2017년 12월 결성되었으며 2020년 9월 기준 72개 국가가 회원국으로 가입하고 있다. 한국은행은 2019년 11월 가입하였다.

74) 우리나라의 경우 금융감독원은 2020년 9월, 한국은행 2020년 12월 은행권 기후 스트레스 테스트를 수행하였다. 한국은행의 경우 박기영·인소영·김재운(2020)을 참고하시오.

방식으로 실행될 수 있으나 가용 데이터, 그리고 분석 목적과 범위 등이 방법론을 결정할 여지가 크다.

접근방식으로는 기후변화 시나리오가 거시경제에 미치는 영향을 시산한 뒤, 개별 산업, 기관 순서로 분석하는 하향식(top-down) 방식, 반대로 개별 금융기관에 먼저 초점을 맞추는 상향식(bottom-up) 방식이 있다. 하향식 모형의 일반적인 방식은 아래 <그림 4>에서 볼 수 있다. 첫 단계로 기후변화 관련 시나리오를 설정해야 한다. 갑작스런 탄소세 실행, 재생 에너지 기술 혁신 같은 이행 리스크를 고려할 수도 있고, 평균 기온 상승과 같은 물리적 리스크를 고려할 수도 있다. DNB(2018)은 갑작스럽게 탄소 가격이 \$100으로 인상되는 경우와 그렇지 않은 경우, 그리고 재생 에너지 기술 혁신이 급격하게 이루어지는 경우와 그렇지 않은 경우, 그리고 이들의 조합을 분석하고 있다. 영국 PRA는 예상하지 못한 갑작스런 이행(sudden and disorderly transition), 점진적이고 질서 있는 이행(progressive and orderly transition), 무대응(no transition) 세 가지의 시나리오를 고려하고 있다. NGFS(2020)의 경우도 영국 PRA와 유사한 시나리오를 상정하고 있다.

<그림 4> 하향식 기후 스트레스 테스트 진행 순서의 예시(An Example of the Bottom-Up Approach of Climate Stress Test)



두번째 단계에서는 시나리오에 따라 GDP, 이자율, 신용 스프레드, 에너지 가격 등 주요 거시변수들의 변화를 파악한다. IPCC와 UNEP FI (2018)에서는 IAM(Integrated Assessment Model)을 사용하며, DNB (2018)와 프랑스 중앙은행은 다국가 거시계량 모형인 NiGEM(National Institute Global Econometric Model)을, 유럽중앙은행(ECB)와 프랑스 재무부는 CLIMAFIN의 방법론을 사용한다.⁷⁵⁾ 또는 국제에너지기구(IEA)의 세계 에너지 모형(World Energy Model)을 이용해서 시나리오

에 따른 거시 충격을 계산할 수 있다.⁷⁵⁾

세번째 단계는 산업별로 관련 위험에 대한 상이한 노출 정도를 계산한다. 기본적인 원칙은 경제에 기여하는 부가가치 대비 탄소 배출이 많은 산업일 수록 기후변화 관련 위험한 산업으로 분류하는 것이다. 온실가스는 직접 배출(Scope 1), 간접 배출(Scope 2), 가치사슬 간접 배출(Scope 3)로 분류 되는데 DNB(2018)은 산업연관표를 이용해서 온실가스의 직접 배출과 다른 산업의 부가가치 창출을 위한 간접 배출을 구분해서 산업별 탄소 리스크 익스포저라 할 수 있는 이행기 취약성 요인(TVF, Transition Vulnerability Factor)을 계산하였다.

마지막 단계에서는 두번째 단계에서 구한 거시 충격과 세번째 단계의 산업별 노출 정도를 이용해서 산업별 충격을 구하고, 대출, 채권, 주식 등의 가치, 부도율, 부도시 손실률(LGD: Loss Given Default), 부도시 노출 금액(EAD: Expected at Default) 등 금융기관의 건전성 관련 주요 변수들의 반응을 스트레스 테스트를 실행한다. 중앙은행과 감독기구는 이 결과를 이용해서 금융기관들이 기후 위험에 대비할 수 있도록 구체적인 가이드 라인을 제시할 수 있다. Bolton et al.(2020)은 기후 스트레스 테스트의 주된 목적 중 하나는 금융기관들로 하여금 기후변화 관련 리스크에 대해 인식을 갖게 하고 관련 대비를 하게끔 만드는 것이라 하는데 개별 기업들은 기후변화에 대한 인식 정도를 재고하고, 기후 위험에 대비한 전략 재설정, 산업 및 투자 자산의 포트폴리오 재조정을 고려할 수 있다. 단, 기후변화와 연관된 본질적인 불확실성으로 인해 본 스트레스 테스트의 목적은 정확한 예측치를 제공하는 것이 아님을 유념해야 한다.

5. 그린뉴딜(Green New Deal)

구글 트렌드(trends.google.com)에 의하면 그린뉴딜에 대한 관심이 최고조였던 시기는 2019년 2월이었는데 이는 미국의 상원의원 에드워드 마키(Edward Markey), 하원의원 오카시오 코르테즈(Ocasio-Cortez)가 2019년 2월 7일 그린뉴딜에 대한 의정서를 발표하는 시기와 겹치지며 우

75) CLIMAFIN의 방법론은 Battiston et al.(2017)을 참고하십시오.

76) <https://www.iea.org/reports/world-energy-model>

리나라에서도 이 때부터 그린뉴딜에 대한 논의가 활발해지기 시작했다. 하지만 그린뉴딜이란 용어는 2006, 2007년 경부터 녹색당과 환경단체, 언론인 토마스 프리드먼(Thomas Friedman)이 사용하기 시작했다.⁷⁷⁾ 2008년 UNEP에서 ‘글로벌 그린뉴딜’을 통해 일자리 창출, 글로벌 경기 부양과 동시에 기후변화를 늦추자고 주장했으며 미국의 경우 2018년 대선을 거치면서 미국 민주당에서 그린뉴딜에 대한 논의가 잦아졌다. 2020년 4월 유럽 의회는 코로나 사태로 인한 경제회복 계획에 유럽 그린딜(European Green Deal)을 포함시킬 것을 촉구하기도 하였다.

그린뉴딜은 다수의 사람들이 다양한 의미로 사용하고 있으나 아직까지 구체적인 실행 계획보다는 개념상 논의나 선언적 의미가 큰 것으로 보인다. 다만 대부분의 관련 주장에서 다음의 요소들을 공통적으로 포함하고 있다: (1) 기후변화에 대처하며, (2) 그 과정에서 좋은 일자리를 창출하고, (3) 불평등을 해소한다. 미국 상원의원 마키와 코르테즈의 결의안 내용도 10년 내에 미국 전력 수요 100%를 재생에너지로 충당하며, 2050년까지 탄소 중립(net-zero emission)을 달성할 것을 목표로 하고 있다. 그리고 위 목표를 달성하기 위해 기간 시설에 대한 투자와 수백만 개의 일자리를 창출하고 그 과정이 공정하고 정의로와야 한다고 강조한다. 유럽의회의 경우 ‘그린 뉴딜’이란 표현보다는 ‘그린딜’이란 표현을 쓰는데 유로존 27개 국가가 경제적 희생 없이, 삶의 질을 높이면서 저탄소 경제로 이행하는 것을 주된 목표로 삼고 있다. 2030년까지 1990년 대비 탄소 배출을 50-55% 감소시키고 2050년까지 탄소중립을 목표로 하고 있다. 유럽 그린딜은 이 과정에서 재생에너지, 전기차, 친환경 건물 보수 및 리모델링 과정에서 다수의 일자리가 창출될 것으로 기대하고 있다. 미국과의 차별점은 유럽 의회 차원에서 그린딜을 새로운 성장전략으로 명시하고 있다는 것이다.⁷⁸⁾ 즉 유럽의 경우

77) 토마스 프리드먼이 2007년 1월 19일자 뉴욕타임스 칼럼에서 ‘그린뉴딜’을 의미하는 단어들을 사용하였다: “Finally, like the New Deal, if we undertake the green version, it has the potential to create a whole new clean power industry to spur our economy into the 21st century.” (<https://www.nytimes.com/2007/01/19/opinion/19friedman.html>)

78) 유럽연합 집행위원장 Ursula von der Leyen은 다음과 같이 표현하고 있다: “The European Green Deal is our new growth strategy - a strategy for growth that gives back more than it takes away.” (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_6691)

그린딜이 일부 기후변화 활동가, 급진주의자, 일부 정치인들의 주장이 아니라 주류 정책의 하나로 진지되게 논의되고 있다는 차별점이 있다.

그린뉴딜과 관련된 가장 큰 문제는 재원 조달이다. Ocasio-Cortez도 상당한 비용이 소요된다고 인정하면서도 그린뉴딜로 경제 규모가 오히려 커지면서 세수가 확대될 수 있다고 주장하며 심지어 현대화폐이론(MMT: Modern Monetary Theory)을 거론하기도 한다. 반면 유럽 의회는 그린딜을 위한 재원을 최소 1조 유로로 예상하고 5,030억 유로는 EU 예산, 1,140억 유로는 회원국 분담금, 2,790억 유로는 민간 부문에서 충당할 계획을 가지고 있다.⁷⁹⁾ 유럽이 그린딜에 적극적일 수 있는 이유로는 지난 30년간 약 61%의 경제성장을 하면서 탄소 배출을 23%나 감소시켜 왔던 경험을 들 수 있다. 추가적으로 유로 지역은 규모의 경제 효과를 기대할 수 있으며 BCA 차원에서 국가간 공조가 더 원활할 수 있다.⁸⁰⁾

재원 조달의 문제와 함께 그린뉴딜 정책을 추진하면서 고려해야 할 사항들이 몇 가지 있다. 첫째, 저탄소 경제로 이행하는 과정에서 일자리 창출 효과가 큰 부문에 집중할 필요가 있다. ILO(2018)은 저탄소 경제 이행 과정에서 전세계적으로 2.4천만 개의 일자리가 생기고, 6백만 개의 일자리가 소멸될 것으로 예상된다. 미국의 경우 2018년 기준 미국의 경우 '그린잡(green job)'이라 불리는 클린에너지 분야 일자리가 3.3백만 개이며 화석에너지 분야는 1백만 개 정도인데 클린에너지 일자리는 2018년 3.6% 증가했으며 2019년 6.0% 증가할 것으로 기대한다.⁸¹⁾ 그린뉴딜 관련 사업 중 재생에너지 효율성 개선 및 개발, 인프라(배전망 개선, 전기 및 연료전지로 이행, 차량 공유 및 자율운행 관련 운송 인프라 포함) 개선, 주택 및 빌딩의 그린 리모델링, 그리고 이들 사업을 도시 재생화 및 스마트 시티와 연계하는 것이 중요한데 그린뉴딜의 목적에 부합하는 우선순위와 함께 일자리 창출효과를 함께 고려해서 추진할 필요가 있다.⁸²⁾

79) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_24

80) 문제는 정치적 실현이 가능할 것이나인데 유럽의 경우에도 실제 3조 유로 이상이 소요될 것이라 예상된다. Rifkin(2019)은 대안으로 연금기금의 활용을 강조한다. Monk and In(2020)은 연금기금은 안정적인 리스크를 지향하며 투자 기간이 길고 투자가능액수가 크기때문에 친환경, 지속가능 프로젝트 투자에 적합하다고 주장한다. 참고로 우리나라의 사학연금과 공무원연금은 2018년 '탈석탄' 투자를 선언하였다.

81) <https://www.gbes.com/blog/3-3-million-green-building-jobs-by-2018/>

82) Popp et al.(2020)은 금융위기 경제 부양책이었던 미국 경제회복 및 재투자법

둘째, 정부의 역할이다. 기본적으로 기술 개발의 외부성 때문에 과소투자가 이루어진다. 특히 저탄소 기술에 대해 과소 투자가 이루어지는 이유는 기술 혁신에 대한 보상이 사회적 수익률보다 낮게 책정되어 있으며, 그 이유 중 하나가 탄소 가격이 사회적 비용보다 낮게 매겨져 있기 때문이다. 재생 에너지 기술 개발의 특성상 장기간 소요되고 불확실성이 높은 프로젝트에 투자자가 들어오지 않는 “죽음의 계곡(valley of death)” 문제가 발생하므로 정부의 역할이 필수적이다. 정부는 선제적 연구에 대한 지원과 함께 탄소 가격을 올려서 외부성 문제를 경감시킬 필요가 있다. 이와 관련해서 관련 투자를 주도할 기관이 필요한 지에 대해 고민할 필요가 있다. 예를 들어 독일 재건은행(KfW)은 글로벌 금융위기 당시 경기 부양 목적과 함께 재생에너지에 과감한 투자를 했으며 지금도 국내외 투자와 지원을 하고 있다. 또한 2014년부터 KfW 그린본드를 발행해 왔으며 2018년에만 16억 유로의 자금을 조달했다.⁸³⁾ 그린딜에서 핵심적인 재원 역할을 할 유럽투자은행(EIB: European Investment Bank)도 2022년부터는 화석에너지 기업에 대한 금융지원을 중단하며 2030년까지 10억 유로의 저탄소 경제 이행 관련 자금 지원을 할 예정이다.⁸⁴⁾ 일본 정부가 지분 100%를 가지고 있는 일본개발은행(DBJ: Development Bank of Japan)도 2004년 환경평가 대출 프로그램, 2011년 그린빌딩 인증제, 2014년 그린본드 발행, 2015년 지속가능발전채권 발행을 하였다. 그린뉴딜에서 핵심적인 역할을 하는 저탄소 경제 이행에 필요한 투자의 경우 불확실성과 경험 부족 등으로 인해 민간 부문만의 자금 조달만이 쉽지 않으므로 정부 또는 정책금융기관이 시장 조성자의 역할을 하는 것이 매우 중요하다.

(ARRA: American Recovery and Reinvestment Act) 중 환경 관련 지출의 고용 효과를 검증하였는데, 1백만 달러 당 2013-2017년 기간 15개의 새로운 일자리가 창출되었으며 건설과 폐기물 처리 분야의 저숙련 자리가 늘어난 것이며 임금 상승 효과가 없다고 보고한다.

83) <https://www.kfw.de/KfW-Group/Investor-Relations/US-Reporting/>

84) <https://www.eib.org/en/press/all/2019-313-eu-bank-launches-ambitious-new-climate-strategy-and-energy-lending-policy>

IV. 결 론

기후변화는 한 지역의 행위가 시공간적으로 확장되어 수년, 수십년 뒤 지구의 반대편에서 나타날 수 있기 때문에 전지구적 차원의 대처와 공조가 필수적이다. 오늘날의 기후변화는 인간 행위의 결과로 인해 일어나고 있으며 기후변화의 여파가 대다수의 사람들에게 심각한 충격을 줄 확률이 100%는 아니더라도 실제로 발생할 확률이 점점 높아지며, 실제로 일어났을 경우 그 여파가 너무나 클 수 있기 때문에 보험의 차원에서 더 늦기 전에 선제적으로 대처할 필요가 있다. 다행스럽게 사회 전반에 걸쳐 기후변화에 대한 인식이 바뀌고 있으며 경제학자들조차 예외가 아니다. 저명한 경제학자들에게 경제 현안에 대해 의견을 묻는 시카고 대학의 IGM 포럼은 최근 유럽 경제학자들을 대상으로 유럽중앙은행(ECB: European Central Bank)이 정책을 집행할 때 환경에 미치는 효과를 고려해야 하는지에 대한 설문 조사를 했는데 이 질문에 대해 동의한다는 의견이 52%로 동의하지 않는다는 의견 47%보다 더 높게 나왔다.⁸⁵⁾ 생각보다 낮은 동의 의견이라 생각할 수 있지만 같은 설문을 10년 또는 20년 전에 했다면 동의하지 않는다는 의견이 훨씬 높게 나왔을 것이라 추측할 수 있다.

경제학자의 인식 변화와 함께 기후변화 연구 관련 경제학자들의 역할도 더 중요해 지고 있다. 당장 정부의 '2050 탄소중립 추진전략'과 그린뉴딜을 고려할 때 우리나라의 실정을 반영한 기후 시나리오와 대응 수단을 포괄하는 거시 모형의 개발이 시급한 실정이다. IAM에 기반한 모형은 기후변화 관련 요소들이 풍부하게 모형화되어 있는 반면 거시변수에 대한 고려가 충분하지 않고 사용자 접근성이 떨어진다는 약점이 있으며 Annicchiarico and Dio(2015)와 같이 DSGE 모형에 기후변화 요소를 추가한 모형들은 모형의 간결성(parsimony)을 위해 기후변화의 과학적 사실들이 너무 높은 수준에서 추상화되어 있다는 아쉬움이 있다. 이런 맥락에서 NGFS(2020)는 여러 종류의 모형들(a suite of models)을 내적으로 일관성 있는 방식으로 이용할 것을 제안하고 있는데 우리나라의 기후 시나리오를 평가할 수 있는 거시모형들을 활발하게 개선 및 개발하고 모형 간 상호정합성과 현실

85) <https://www.igmchicago.org/surveys/objectives-of-the-european-central-bank/>

성을 평가하는 것이 시급히 이루어져야 할 과제라 생각한다.⁸⁶⁾ 위에서 논의한 경제학이 기여할 분야에 추가해서 대표적인 총수요 관리 정책이라 할 수 있는 통화정책과 재정정책, 그리고 금융안정을 위한 거시건전성 정책 분야의 연구가 시급한 실정이다. 예를 들어, 재정정책의 관점에서 탄소세 세수를 어떻게 사용하는 것이 최적인지, 탄소세 부과의 효과는 단기적으로는 부정적인 공급 충격(supply shock)과 동일하지만 장기적 시시점은 다른데 최적 통화정책은 어떻게 설정해야 하는지, 탄소 리스크 익스포저로 인한 금융기업 부실화를 막기 위해 거시건전성 정책은 어떻게 집행되어야 하는지 등에 대한 연구가 필요한 상황이다. 또한 이행 과정에서 후생을 극대화하는 정책 조합은 무엇인지에 대한 고민도 필요하다.⁸⁷⁾ 마지막으로 연구의 진행 방식 관련해서 기후변화 관련 연구의 특성상 여러 학문 분야를 통합하는 학제간 연구, 그리고 국제기구, 대학, 연구소 간 협업이 적극 권장될 필요가 있다.

투고 일자: 2021. 5. 25. 심사 및 수정 일자: 2021. 6. 23. 게재 확정 일자: 2021. 6. 23.

86) 예를 들어 2020년에 시행된 기후 스트레스 테스트에서 금융감독원은 CGE 모형을, 한국은행은 NiGEM 모형과 Annicchiarico and Dio(2015), 안상기(2015)에 기반한 DSGE 모형을 사용하였으나 두 기관이 사용한 모형들의 상호적합성에 대한 논의는 없었다.

87) 이들 분야에서 관련 연구들이 시작되고 있는데 Chen and Pan(2020)는 환경을 고려한 DSGE 모형을 구축하여 기후정책과 통화정책의 최적 결합에 대해 연구하였다. 이들은 기후정책의 종류에 따라 통화정책의 효과가 다르게 나타날 수 있으며 기후정책의 유무에 따라 테일러 준칙의 계수 차원에서 최적 통화정책이 상이할 수 있음을 보였다. 또한 후생 극대화의 관점에서 기후정책의 실시에 따라 물가 안정, 고용 극대화와 같은 전통적인 통화정책의 목표가 수정될 필요가 있음을 보였다. Barrage(2020)는 탄소세를 최적 재정정책의 관점에서 분석했는데 탄소세 부과가 기존 세금의 과세표준에 미치는 영향을 고려한 결과 최적 탄소세는 기존의 세율보다 8-24% 낮은 것을 보였다. Campiglio(2016)는 탄소세에 추가하여 중앙은행이 거시건전성 정책이나 통화정책으로 개입할 것을 주장하기도 한다. 구체적으로 저탄소 배출 기업에 대한 대출에는 기준율을 낮게 해 주는 정책을 제안한다.

◆ 참고문헌 ◆

- 박기영 · 인소영 · 김재윤 (2020), 『기후위험을 고려한 스트레스 테스트』, 한국은행 연구용역 보고서.
- Park, Ki Young, Soh Young In, and Jaeyoon Kim (2020), *Climate Stress Test*, The Bank of Korea Research Project Report.
- 박수련 · 정연수 (2018), 『기후변화와 금융안정』, 한국은행 이슈노트 2018-6.
- Park, Sooryoun, and Yonsoo Jung (2018), *Climate Change and Financial Stability*, The Bank of Korea Issue Note 2018-6.
- 안상기 (2015), 『DSGE 모형을 이용한 온실가스 감축정책의 거시경제 효과 분석』, 서울대학교 농경제사회학부 박사학위 논문.
- Ahn, Sangki (2015), *The Macroeconomic Impact Analysis of Greenhouse Gas Abatement Policies with a DSGE Model*, Ph.D Dissertation, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University.
- 안영환 · 김동구 (2017), 『통합평가모형을 통한 파리협정 타결에 따른 국내외 경제영향 분석』, 에너지경제연구원 기본연구보고서 17-11.
- Ahn, Younghwan, and Dong Gu Kim (2017), *An Economic Analysis on the Effect of Paris Agreement Using Integrated Assessment Models*, Korea Energy Economics Institute Research Report 17-11.
- 한국환경정책평가연구원 (2009), 『우리나라 기후변화의 경제학적 분석(I)』, 한국환경정책평가연구원 보고서.
- Korea Environment Institute (2009), *An Economic Analysis of Climate Change: The Case of South Korea (I)*, Korea Environment Institute Report.
- _____ (2012), 『우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II)』, 한국환경정책평가연구원 보고서.
- Korea Environment Institute (2012), *An Economic Analysis of Climate Change: The Case of South Korea (II)*, Korea Environment Institute Report.
- 허가형 · 김윤희 (2020), 『한국경제의 구조변화와 대응전략 IV: 지속성장을 위한 기후변화 대응전략』, 국회예산정책처 보고서.
- Hur, Gahyong, and Yoonhee Kim (2020), *Structural Changes of the*

- Korean Economy and Response Strategy IV: Climate Policy for Sustainable Development*, National Assembly Budget Office Report.
- 황문성 · 박중현 · 김영민 (2009), “기후변화 대응이 우리 경제에 미치는 영향 및 시사점,” 한국은행 『조사통계월보』.
- Hwang, Munsung, Park Jonghyun, and Youngmin Kim (2009), “The Impact and Implications of Policies on Climate Change,” The Bank of Korea, *Monthly Bulletin*.
- Acemoglu, Daron, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn, and David Hemous (2012), “The Environment and Directed Technical Change,” *The American Economic Review*, 102(1), 131-166. <http://www.jstor.org/stable/41408771>.
- Acemoglu, Daron, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley, and William Kerr (2016), “Transition to Clean Technology,” *Journal of Political Economy*, 124(1), 52-104. <https://doi.org/10.1086/684511>.
- Albertini, E. (2013), “Does Environmental Management Improve Financial Performance? A Meta-Analytical Review,” *Organization & Environment*, 26(4), 431-457.
- Allouche, J., and Laroche, P. (2005), “A Meta-Analytical Investigation of the Relationship between Corporate Social and Financial Performance,” *Revue de Gestion Des Ressources Humaines*, 1-18.
- Annicchiarico, Barbara., and Fabio Di Dio (2015), “Environmental Policy and Macroeconomic Dynamics in a New Keynesian Model,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 1-21.
- Bank of England (2015), “The Impact of Climate Change on the UK Insurance Sector,” *Report submitted to fulfil the requirements of Adaptation Reporting and inform the UK Climate Change Risk Assessment due to be laid before Parliament in 2017*.
- Barbara, B., Clark, A., Falconer, A., Macquarie, R., Meattle, C., Tolentino, R., and Wetherbee, C. (2019), *Global Landscape of Climate Finance 2019*, Climate Policy Initiative, London, Available at: <https://climatepolicyinitiative.org/publication/global-climate-finance-2019/>

- Barnett, Michael, William Brock, and Lars Peter Hansen (2020), "Pricing Uncertainty Induced by Climate Change," *The Review of Financial Studies*, 33(3), 1024-1066. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhz144>.
- Barrage, Lint (2020), "Optimal Dynamic Carbon Taxes in a Climate Economy Model with Distortionary Fiscal Policy," *The Review of Economic Studies*, 87(1), 1-39. <https://doi.org/10.1093/restud/rdz055>.
- Batten, Sandra (2018), "Climate Change and the Macroeconomy: A Critical Review," *Bank of England Working Paper No. 706*.
- Batten, Sandra, Rhiannon Sowerbutts, and Misa Tanaka (2016), "Let's Talk About the Weather: The Impact of Climate Change on Central Banks," *SSRN Electronic Journal* (603).
- Battiston, S., Mandel, A., Monasterolo, I., Schütze, F., and Visentin, G. (2017), "A Climate Stress-Test of the Financial System," *Nature Climate Change*, 7(4), 283-288.
- Becker, Gary S., Kevin M. Murphy, and Robert H. Topel (2010), "On the Economics of Climate Policy," *The BE Journal of Economic Analysis*, 10(2), 1-25.
- Berg, F., Koelbel, J. F., and Rigobon, R. (2020), "Aggregate Confusion: the Divergence of ESG Ratings," *Available at SSRN 3438533*.
- Bollen, Johannes, Bruno Guay, Stéphanie Jamet, and Jan Corfee-Morlot (2009), "Co-Benefits of Climate Change Mitigation Policies," (693). <https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/224388684356>.
- Bolton, Patrick et al. (2020), "The Green Swan: Central Banking and Financial Stability in the Age of Climate Change," *BIS report*.
- Bolton, Patrick, and Marcin Kacperczyk (2020), "Do Investors Care about Carbon Risk?" *NBER Working Paper 26968*.
- Broecker, Wallace S. (1975), "Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?" *Science*, 189(4201), 460 LP-463. <http://science.sciencemag.org/content/189/4201/460.abstract>.
- Burke, Marshall, Solomon M. Hsiang, and Edward Miguel (2015), "Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic

- Production,” *Nature*, 527(7577), 235-239.
- Cai, Yongyang, and Thomas S Lontzek (2018), “The Social Cost of Carbon with Economic and Climate Risks,” *Journal of Political Economy*, 127(6), 2684-2734. <https://doi.org/10.1086/701890>.
- Caldecott, Ben et al. (2016), “Stranded Assets: A Climate Risk Challenge.” *Inter-American Development Bank report*.
- Calel, Raphael, and Antoine Dechezleprêtre (2016), “Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market,” *The Review of Economics and Statistics*, 98(1), 173-191. <https://econpapers.repec.org/RePEc:tpr:restat:v:98:y:2016:i:1:p:173-191>.
- Campiglio, Emanuele (2016), “Beyond Carbon Pricing: The Role of Banking and Monetary Policy in Financing the Transition to a Low-Carbon Economy,” *Ecological Economics*, 121, 220-230. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180091501056>.
- Carl, Jeremy, and David Fedor (2016), “Tracking Global Carbon Revenues: A Survey of Carbon Taxes versus Cap-and-Trade in the Real World,” *Energy Policy*, 96, 50-77. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516302531>.
- Carney, Mark (2015), “Breaking the Tragedy of the Horizon - Climate Change and Financial Stability,” *Speech at Lloyd’s of London*.
- Chan, Faith Ka Shun et al. (2018), “‘Sponge City’ in China—A Breakthrough of Planning and Flood Risk Management in the Urban Context,” *Land Use Policy*, 76, 772-778. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837717306130>.
- Chen, Chuanqi, and Dongyang Pan (2020), “The Optimal Mix of Monetary and Climate Policy,” *MPRA Paper No. 97718*.
- Choi, E., and Seiger, A. (2020), *Catalyzing Capital for the Transition toward Decarbonization: Blended Finance and Its Way Forward*, Sustainable Finance Initiative, Stanford University.
- Cook, John et al. (2013), “Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature,” *Environmental Research Letters*, 8(2), 24024. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024024>.

- Criqui, Patrick, Mark Jaccard, and Thomas Sterner (2019), "Carbon Taxation: A Tale of Three Countries," *Sustainability*, 11(22).
- Daniel, Kent D, Robert B Litterman, and Gernot Wagner (2019), "Declining CO2 Price Paths," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(42), 20886 LP-20891. <http://www.pnas.org/content/116/42/20886.abstract>.
- Dell, Melissa, Benjamin F Jones, and Benjamin A Olken (2014), "What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature," *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740-798.
- Deryugina, Tatyana, and Solomon M Hsiang (2014), "Does the Environment Still Matter? Daily Temperature and Income in the United States," *National Bureau of Economic Research Working Paper Series No. 20750*. <http://www.nber.org/papers/w20750>.
- Dietz, Simon, and Nicholas Stern (2015), "Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk: How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions," *The Economic Journal*, 125(583), 574-620. <https://doi.org/10.1111/eoj.12188>.
- Dixon-Fowler, H. R. (2013), "Beyond 'Does It Pay to Be Green?' A Meta-Analysis of Moderators of the CEP-CFP Relationship," *Journal of Business Ethics*, 112(2), 353-366.
- DNB (2018), "An Energy Transition Risk Stress Test for the Financial System of the Netherlands," *DeNederlandscheBank Occasional Studies 16-7*.
- Eccles, R. G., and Strohle, J. C. (2018), "Exploring Social Origins in the Construction of ESG Measures," *Available at SSRN 3212685*.
- Eckstein, David., Vera Kunzel and Laura Schafer (2018), "Global Climate Risk Index 2018: Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2016 and 1997 to 2016," *Germanwatch Briefing Paper*.
- Ehrlich, Paul (1971), *The Population Bomb*. Sierra Club/Ballantine Books.

- Endrikat, J., Guenther, E., and Hoppe, H. (2014), "Making Sense of Conflicting Empirical Findings: A Meta-Analytic Review of the Relationship between Corporate Environmental and Financial Performance," *European Management Journal*, 32(5), 735-751.
- Farmer, J. Doyne, Cameron Hepburn, Penny Mealy, and Alexander Teytelboym (2015), "A Third Wave in the Economics of Climate Change," *Environmental and Resource Economics*, 62, 329-357.
- Fifka, M. S. (2013), "Corporate Responsibility Reporting and its Determinants in Comparative Perspective—a Review of the Empirical Literature and a Meta-Analysis," *Business Strategy and the Environment*, 22(1), 1-35.
- Fouré, Jean, Houssein Guimbard, and Stéphanie Monjon (2016), "Border Carbon Adjustment and Trade Retaliation: What Would Be the Cost for the European Union?" *Energy Economics*, 54, 349-362. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988315003436>.
- Friede, G., Busch, T., and Bassen, A. (2015), "ESG and Financial Performance: Aggregated Evidence from More than 2000 Empirical Studies," *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), 210-233.
- Friedman, M. (1970), "The Social Responsibility of Business Is to Increase Its Profits," *New York Times Magazine*, p.32.
- Gaddy, B., Sivaram, V., and O'Sullivan, F. (2016), "Venture Capital and Cleantech: The Wrong Model for Clean Energy Innovation," *MIT Energy Initiative Working Paper*.
- Goulder, Lawrence, and Marc Hafstead (2017), *Confronting the Climate Challenge: U.S. Policy Options*, Columbia University Press.
- Goulder, Lawrence, and William Pizer (2006), "The Economics of Climate Change," *National Bureau of Economic Research Working Paper Series No. 11923*.
- Golosov, Mikhail, John Hassler, Per Krussel, and Aleh Tsyvinski (2014), "Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium," *Econometrica*, 82(1), 41-88.
- Groosman, Britt, Nicholas Z Muller, and Erin O'Neill-Toy (2011), "The

- Ancillary Benefits from Climate Policy in the United States,” *Environmental and Resource Economics*, 50(4), 585-603. <https://doi.org/10.1007/s10640-011-9483-9>.
- Hallegatte, Stéphane, and Valentin Przyluski (2010), *Policy Research Working Papers The Economics of Natural Disasters: Concepts and Methods*, The World Bank. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-5507>.
- Heal, Geoffrey (2017), “The Economics of the Climate,” *Journal of Economic Literature*, 55(3), 1046-1063. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jel.20151335>.
- Holland, H., Dixon, A., In, S. Y., Monk, A., and Sharma, R. (2019), “Governing Blended Finance: An Institutional Investor Perspective,” *Economics of Transition* (forthcoming).
- Hope, Chris, John Anderson, and Paul Wenman (1993), “Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE Model,” *Energy Policy*, 21(3), 327-338. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030142159390253C>.
- Hsiang, Solomon, and Robert E Kopp (2018), “An Economist’s Guide to Climate Change Science,” *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 3-32. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.32.4.3>.
- ILO (2018), “Greening with Jobs,” *World Employment Social Outlook*.
- In, S. Y., and Monk, A. (2018), “Financing Energy Innovation: The Need for New Intermediaries in Clean Energy,” *Stanford Global Projects Center Working Paper (Available at SSRN 3248032)*.
- In, S. Y., and Weyant, J. (2020), “Pricing Climate-Related Risks of Energy Investments,” *Stanford Global Projects Center Working Paper (Available at SSRN 3704167)*.
- In, S. Y., Lee, Y. J., and Eccles, R. (2020), “Looking Back, Looking Forward: Scientometric Analysis on 47 Years of Sustainability Research,” *Stanford Global Projects Center Working Paper (Available at SSRN 3693254)*.
- In, Soh Young, Ki Young Park, and Ashby Monk (2019), “Is ‘Being Green’ Rewarded in the Market?: An Empirical Investigation of Decarbonization and Stock Returns,” *Stanford Global Project*

- Center Working Paper (Available at SSRN 3020304).*
- International Energy Agency (2014), *World Energy Outlook 2014*, International Energy Agency, Paris.
- IPCC (2010), "Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties," *UN Intergovernment Panel on Climate Change*.
- ____ (2014), "The Fifth Assessment Report," *UN Intergovernment Panel on Climate Change*.
- ____ (2018), "Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change," *UN Intergovernment Panel on Climate Change*.
- IWG (2016), "Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis," *Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government*.
- Khan, M., Serafeim, G., and Yoon, A. (2016), "Corporate Sustainability: First Evidence on Materiality," *The Accounting Review*, 91(6), 1697-1724.
- Krenek, Alexander, Mark Sommer, and Margit Schratzenstaller (2019), "Sustainability-Oriented Future EU Funding: A European Border Carbon Adjustment," *Austrian Institute of Economic Research Working Paper No. 537*.
- Krusell, Per, and Anthony Smith (2018), *Climate Change Around the World*, Society for Economic Dynamics. <https://econpapers.repec.org/RePEc:red:sed017:1582>.
- Lo, A. W. (2019), "Bridging the Valley of Death Through Financial Innovation: Written Testimony of Andrew W. Lo," *Prepared for the US House of Representatives Financial Services Committee*.
- Margolis, J. D., Hillary, E. A., and Walsh, J. R. (2009), "Does it Pay to Be Good...And Does it Matter? A Meta-Analysis of the Relationship between Corporate Social and Financial Performance," *Available at SSRN 1866371*.
- Martin, Ralf, Laure B de Preux, and Ulrich J Wagner (2014), "The

- Impact of a Carbon Tax on Manufacturing: Evidence from Microdata,” *Journal of Public Economics*, 117, 1-14. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0047272714001078>.
- Meadows, Donella (1972), *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Pubs.
- New Climate Economy (2016), *The Sustainable Infrastructure Imperative: Financing for Better Growth and Development*, New Climate Economy, London.
- Newell, Richard G, Brian C Prest, and Steven E Sexton (2018), “The GDP-Temperature Relationship: Implications for Climate Change Damages,” *Working Paper 18-17 REV* (July), 64. www.rff.org.
- NGFS (2020), “Scenario Analysis Guide,” *NGFS Workstream 2 2020-015*.
- Nikas, Alexandros, Harris Doukas, and Andreas Papandreou (2018), “A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models,” a book chapter in *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy*, Springer.
- Nordhaus, William (1975), “Can We Control Carbon Dioxide?” *mimeo*.
 _____ (1980), *Thinking About Carbon Dioxide: Theoretical and Empirical Aspects of Optimal Control Strategies*, Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University. <https://econpapers.repec.org/RePEc:cwl:cwldpp:565>.
 _____ (2008), *A Question of Balance*, Yale University Press. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1npzkh>.
 _____ (2013), *The Climate Casino*, Yale University Press. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt5vkrpp>.
- Nordhaus, William D. (1974), “Resources as a Constraint on Growth,” *The American Economic Review*, 64(2), 22-26. <http://www.jstor.org/stable/1816011>.
 _____ (1977), “Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem,” *The American Economic Review*, 67(1), 341-346. <http://www.jstor.org/stable/1815926>.
 _____ (1992), “An Optimal Transition Path for

- Controlling Greenhouse Gases,” *Science*, 258(5086): 1315 LP-1319. <http://science.sciencemag.org/content/258/5086/1315.abstract>.
- Nordhaus, William, and James Tobin (1972), “Is Growth Obsolete?” In National Bureau of Economic Research, Inc, 1-80 BT-Economic Research: Retrospect and Prosp. <https://econpapers.repec.org/RePEc:nbr:nberch:7620>.
- Nordhaus, William, and Zili Yang (1996), “A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies,” *American Economic Review*, 86(4), 741-765. <https://econpapers.repec.org/RePEc:aea:aecrev:v:86:y:1996:i:4:p:741-65>.
- NRC (1979), *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*, Washington, DC: The National Academies Press. <https://www.nap.edu/catalog/12181/carbon-dioxide-and-climate-a-scientific-assessment>.
- ____ (2001), *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Washington, DC: The National Academies Press. <https://www.nap.edu/catalog/10139/climate-change-science-an-analysis-of-some-key-questions>.
- ____ (2011), *Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts over Decades to Millennia*, Washington, DC: The National Academies Press. <https://www.nap.edu/catalog/12877/climate-stabilization-targets-emissions-concentrations-and-impacts-over-decades-to>.
- Nunn, Ryan et al. (2019), *Ten Facts about the Economics of Climate Change and Climate Policy*.
- Orlitzky, M., Schmidt, F. L., and Rynes, S. L. (2003), “Corporate Social and Financial Performance: A Meta-Analysis,” *Organization Studies*, 24(3), 403-441.
- Parson, Edward A, and David W Keith (2013), “End the Deadlock on Governance of Geoengineering Research,” *Science*, 339(6125), 1278 LP-1279. <http://science.sciencemag.org/content/339/6125/1278.abstract>.
- Pindyck, Robert S. (2013), “Climate Change Policy: What Do the

- Models Tell Us?" *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-872. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jel.51.3.860>.
- Popp, David (2019), "Environmental Policy and Innovation: A Decade of Research," *International Review of Environmental and Resource Economics*, 13(3-4), 265-337.
- Popp, David, Francesco Vona, Giovanni Marin, and Ziqiao Chen (2020), *The Employment Impact of Green Fiscal Push: Evidence from the American Recovery Act*. <http://www.nber.org/papers/w27321>.
- Pretis, Felix (2019), "Does a Carbon Tax Reduce CO2 Emissions? Evidence From British Columbia," *SSRN eLibrary*. <https://ssrn.com/abstract=3329512> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3329512>.
- Rathner, S. (2013), "The Influence of Primary Study Characteristics on the Performance Differential between Socially Responsible and Conventional Investment Funds: A Meta-Analysis," *Journal of Business Ethics*, 118(2), 349-363.
- Revelli, C., and Viviani, J. L. (2015), "Financial Performance of Socially Responsible Investing (SRI): What Have We Learned? A Meta-Analysis," *Business Ethics: A European Review*, 24(2), 158-185.
- Ritchie, Hannah, and Max Roser (2017), "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions," *Published online at OurWorldInData.org*.
- Rogers, J., and Serafeim, G. (2019), "Pathways to Materiality: How Sustainability Issues Become Financially Material to Corporations and their Investors," *Harvard Business School Accounting & Management Unit Working Paper, (20-056)*.
- Schultze, W., and Trommer, R. (2012), "The Concept of Environmental Performance and Its Measurement in Empirical Studies," *Journal of Management Control*, 22(4), 375-412.
- Semenova, N., and Hassel, L. G. (2015), "On the Validity of Environmental Performance Metrics," *Journal of Business Ethics*, 132, 249-258.
- Smith, Wake, and Gernot Wagner (2018), "Stratospheric Aerosol Injection Tactics and Costs in the First 15 Years of Deployment," *Environmental Research Letters*, 13(12), 124001.

- <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aae98d>.
- Soezer, A. (2018), "Carbon Markets as the Next Frontier of Global Climate Action," Retrieved from United Nations Development Programme: <https://www.ndcs.undp.org/content/ndc-support-programme/en/home/impact-and-learning/ideas-and-insights/2018/carbon-markets-as-the-next-frontier-of-globoal-climate-action.html>
- Starks, L. T., Venkat, P., and Zhu, Q. (2018), "Corporate ESG Profiles and Investor Horizons," *Available at SSRN 3049943*.
- Stephenson, David B. (2008), "Definition, Diagnosis, and Origin of Extreme Weather and Climate Events," In *Climate Extremes and Society*, eds. Henry F Diaz and Richard J Murnane. Cambridge: Cambridge University Press, 11-23. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-extremes-and-society/definition-diagnosis-and-origin-of-extreme-weather-and-climate-events/FEE089929CF3EF12B471983765331C28>.
- Stern, Nicholas (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge: Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/books/economics-of-climate-change/A1E0BBF2F0ED8E2E4142A9C878052204>.
- _____ (2013), "The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models," *Journal of Economic Literature*, 51(3), 838-859. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jel.51.3.838>.
- UNFCCC (2018), "Summary and Recommendations by the Standing Committee on Finance on the 2018 Biennial Assessment and Overview of Climate Finance Flows," *UN Framework Convention on Climate Change*.
- UN Principles for Responsible Investment (2019), *Fiduciary Duty in the 21st Century*.
- United Nations (2015), Paris Agreement, *In Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Paris.
- Wagner, Gernot, and Martin Weitzman (2015), *Climate Shock: The*

Economic Consequences of a Hotter Planet, Princeton University Press.

World Bank (2019a), *State and Trends of Carbon Pricing 2019*.

_____ (2019b), "Using Carbon Revenues," *International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank Technical Note 16*.

Zhang, Z., and Maruyama, A. (2001), "Towards a Private-Public Synergy in Financing Climate Change Mitigation Projects," *Energy Policy*, 29(15), 1363-1378.

Zivin, Joshua Graff, and Matthew Neidell (2014), "Temperature and the Allocation of Time: Implications for Climate Change," *Journal of Labor Economics*, 32(1), 1-26. <http://www.jstor.org/stable/10.1086/671766>.

The Economics of Climate Change

Soh Young In* · Ki Young Park**

Abstract

This study aims to provide a comprehensive review of key issues related to climate change to economists. For this purpose, we first discuss the established scientific facts of climate change and then discuss their implications to the economy and the field of economics. We start with explaining scientific consensus on climate change, types of climate risks and measures to mitigate them, need for international cooperation and the current state of South Korea. We then elaborate on economic perspectives of climate change and highlights the critical roles of economic research in this subject. In particular, we cover key discussions on economic modeling such as integrated assessment model (IAM), carbon pricing of carbon tax and cap & trade, climate finance, climate stress test, and green new deal. After reviewing key issues, we call for prompt attention from economists and policymakers to address since South Korea is facing relatively higher transition risks to low carbon economy.

KRF Classification : B030902, B030100

Key Words : climate change, carbon pricing, green new deal, IAM (Integrated Assessment Model), climate finance

* First Author, Precourt Institute of Energy, Stanford University, e-mail: si2131@stanford.edu

** Corresponding Author, Professor, School of Economics, Yonsei University, Phone: +82-2-2123-5495, e-mail: kypark@yonsei.ac.kr