

계량경제 분석을 이용한 기후변화 연구 동향

A Literature Review on Econometric Studies of Climate Change

김덕파*

[국문요약]

기후변화는 모든 학문 분야를 망라하여 가장 큰 관심을 받는 주제의 하나이다. 이는 기후 변화가 현재의 추세대로 지속된다면 인류에게 재앙적 결과를 초래할 것이라는 예측 때문이다. 경제학 분야에서도 기후변화에 관해 많은 연구가 이루어졌다. 본 글은 계량경제학 방법론을 이용하여 기후변화를 연구한 논문들에 대한 문헌 고찰을 제공한다. 크게 계량경제학 방법론을 이용하여 자연과학 분야의 기후변화 연구에 공헌한 논문 그리고 보다 전통적인 경제학 논문으로 기후변화의 경제적 영향을 계량적으로 분석한 논문을 검토한다.

핵심주제어: 균형기후민감도, 에너지균형이론, 기후변화의 장단기효과

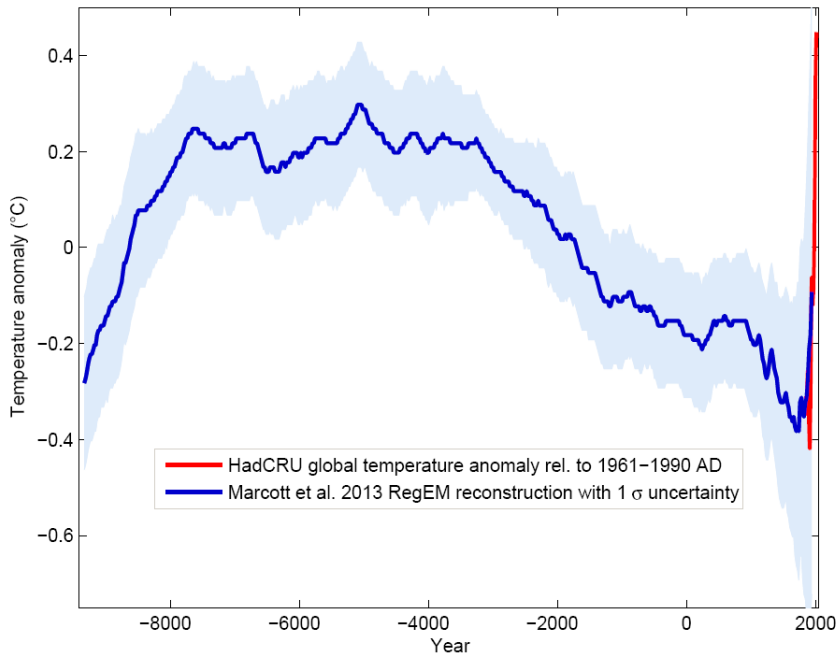
I. 서론

최근 모든 학문분야를 망라하여 가장 큰 관심사 중 하나가 기후변화 또는 지구온난화이다. 2020년부터 발생한 COVID-19의 영향으로 기후변화에 대한 사회적 경각심이 다소 낮아져 보이기도 하지만 기후변화는 우리의 관심과는 무관하게 지속되어 왔다.

통상 날씨의 한 지역에서 매일 측정되는 대기조건을 뜻하며, 기후는 날씨의 장기 평균값으로 정의된다. 또한 우리가 확률을 빈도주의자(frequentist)의 관점으로 이해한다면 매일 다르게 주어지는 날씨는 특정한 분포를 지닌 확률변수의 실현 값으로, 기후는 그 분포를 규정하는 모수의 값으로 생각해 볼 수 있다. 따라서 날씨는 변화하는 것이 당연한 반면, 기후는 시간에 대해 안정적인 것으로 여겨지며 미래의 날씨에 대한 기댓값과도 일치한다. 이때 장기 평균을 구하기 위한 시간의 길이는 보통 한 세대가 경험적으로 체득하고 기억할 수 있는 30년 정도를 고려하는 것이 일반적이다.

* 고려대학교 정경대학 경제학과 교수, E-mail: dukpakim@korea.ac.kr

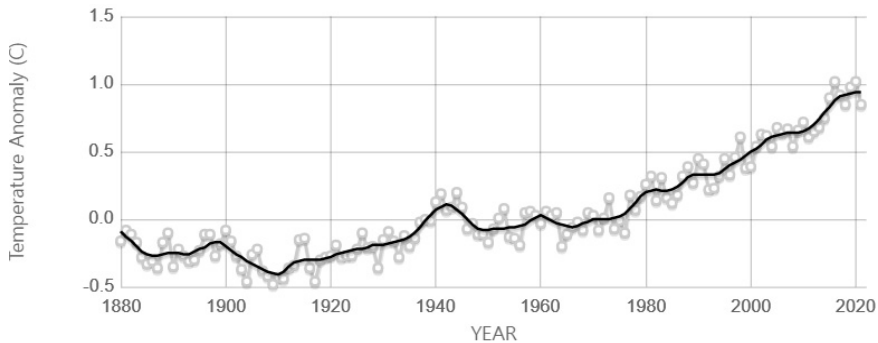
<그림 1> 고기후학의 지구 평균온도 추이, Marcott et al. (2013)



한 가지 주지의 사실은 퇴적물, 빙하, 나이테, 산호 등을 분석하여 지구의 고대기후를 연구하는 고기후학(paleoclimatology)의 연구 결과를 보면 대략 30년 정도의 평균값으로 정의된 지구의 기후는 끊임없이 변화해 왔다는 점이다. 위의 그림에서 파란색 실선은 Marcott et al. (2013)이 다양한 고기후학 자료를 이용해 재구성한 11,300년간의 지구 평균온도의 추이이며 실선 주변의 음영은 신뢰구간을 뜻한다. 기후변화가 전혀 새로운 것이 아님에도 불구하고 최근 큰 주목을 받는 이유는 무엇인가? 그것은 최근에 관찰된 기후변화의 양상이 그 전의 것과는 전혀 다른 특성을 보이기 때문이다. 먼저 이 전까지 관측된 적이 없는 속도로 온난화하고 있다. 위 그림의 오른쪽 끝부분에만 보여지는 주황색 실선이 최근 150년 정도의 기간에 대한 실측 온도이다. 이러한 온도상승 추세는 최소한 일 만여 년 이상의 기간에 비슷한 사례를 찾을 수 없음을 알 수 있다.

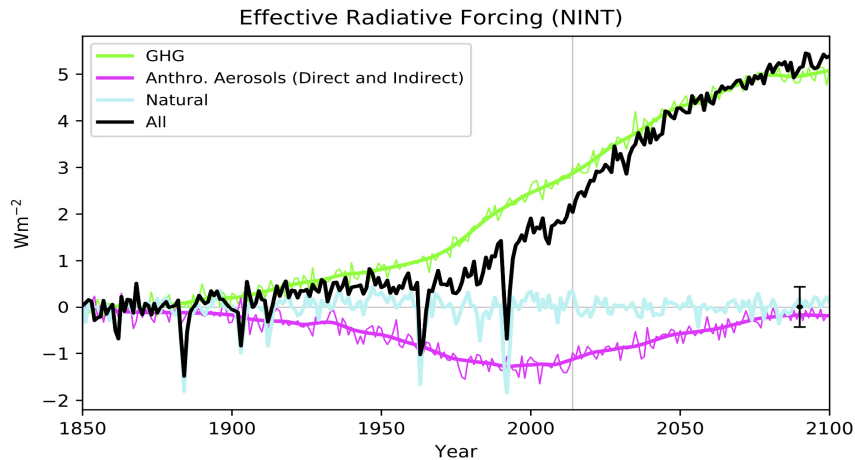
위 그림의 주황색 실선 부분을 자세히 살펴보기 위해서 아래 그림에서 1880년 이후의 지구 평균온도를 나타냈다. 측정방법에 따라 다소간의 차이가 있을 수 있으나 지구 표면의 평균온도(GMST, global mean surface temperature)는 대략 산업화 이전보다 섭씨 0.8에서 1.1도 정도 상승하였으며 대부분의 상승분이 최근 30여 년에 집중되어 있다. 아래 미국 NASA가 제공한 지구 표면의 평균온도의 추이(1951-1980의 평균값 제거 후)를 보면 1980년 이후에 명확한 상승세를 보이는 것을 볼 수 있다.

<그림 2> 지구 표면의 평균온도(GMST) 추이, climate.nasa.gov



최근 온도상승의 또 다른 특징은 그 원인이 인간의 경제활동에 따른 복사강제력 (radiative forcing)의 증가라는 점이다. 아래의 그림은 1850년 이후 복사강제력의 추이를 보여준다. 검은 실선이 전체 복사강제력이고 연두색은 온실가스에 의한 복사강제력, 분홍색은 인간에 의한 미세먼지의 직간접 효과에 따른 복사강제력, 흐린 파란색은 태양에너지의 변동, 화산폭발 등 자연활동에 따른 복사강제력을 보여준다. 지구는 태양에너지를 받아들이고 적외선 복사를 통해 우주로 에너지를 배출하여 에너지 균형을 유지한다. 그런데 인간이 경제활동을 위해 배출하는 다양한 온실가스(well-mixed-green house-gases)는 투명하여 들어오는 햇빛에 전혀 영향을 미치지 않지만 스스로 온도가 높아져 지구가 복사를 통해 에너지를 방출하는 것을 방해한다. 이러한 인간 활동에 의한 복사강제력의 증가에 따른 온난화는 종전의 기후변화가 지구의 자연스러운 에너지 순환과정에서 발생한 것과 대별되며, 그 원인이 일방향으로 작용하고 있기 때문에 지구의 자정작용으로 다시 균형점을 회복하기 힘들 것으로 예상할 수 있다.

<그림 3> 유효 복사강제력, data.giss.nasa.gov



지구온난화가 지속될 경우 예상되는 결과는 대재앙적 파국이다. 평균온도의 상승은 생태환경의 급격한 변화를 초래한다. 많은 지역을 인간의 거주가 힘들거나 불가능한 곳으로 만들고, 여러 작물의 재배를 어렵게 하며, 해수면을 상승시켜 주요 해안 지역의 영구 침수를 초래하며, 대규모 자연재해의 발생을 증가시키게 된다. 또한 이러한 생태환경의 급격한 변동은 국가간, 민족간, 사회계층간 갈등을 촉발하고 대규모 분쟁을 불러일으킬 수도 있다.

지구온난화가 더 이상 진행되는 것을 막기 위해 다양한 분야의 학자들이 노력하고 있다. 대기물리학, 지구과학 등의 자연과학 분야에서는 대기 중 온실가스 등에 의한 복사강제력의 증가가 지구의 평균온도를 상승시키고 상승한 지표면 온도가 지구 각 부분의 다양한 피드백 과정(feedback processes)을 촉발하는 구체적인 메커니즘을 연구하여 복사강제력에 대한 지구의 기후민감도(climate sensitivity)를 정밀하게 측정하려 한다. 이러한 연구는 현재 궁극적인 기후변화 목표인 섭씨 2도 이내의 지구온난화를 달성하는 데 필요한 대기 중 온실가스의 농도에 대한 과학적 근거를 제공하게 된다. 생물학, 생물지구화학 등의 분야에서는 지구온난화가 생태환경 전반에 미치는 영향을 종합적으로 분석한다. 공학 분야에서는 태양광, 수력, 풍력 등 화석연료를 대체할 수 있는 새로운 에너지원의 상용화, 이산화탄소의 배출을 저감하거나 포집하여 저장(CCS, carbon capture and storage)할 수 있는 기술의 개발 등을 위한 노력이 지속되고 있다.

기후변화는 경제학자에게도 중요한 연구주제이다. 크게 보면 기후변화의 경제적 영향을 계량적으로 분석하는 연구와 기후변화에 대한 대응정책의 수립을 위한 사회제도를 연구하는 분야로 나누어 볼 수 있다. 인간의 경제활동이 지구온난화의 주요 원인인 한편 지구온난화도 생태환경의 변화를 통해 인간의 경제활동에 영향을 미치게 된다. 이는 단순히 농업생산의 감소와 같은 직접적인 효과뿐 아니라 노동생산성 하락에 의한 산출감소 등 간접적인 효과도 포함한다. 실제 데이터를 바탕으로 지구온난화의 영향을 추정해 보는 것은 지구온난화가 초래할 궁극적인 사회적 비용을 추산할 수 있게 해준다는 점에서 매우 중요하다. 특히 섭씨 2도 이내의 지구온난화를 달성하는 데 필요한 여러 조치들의 천문학적인 비용에 대해 사회적 합의를 끌어내기 위해서는 지구온난화가 초래할 사회적 비용에 대한 정확하고 과학적인 평가가 꼭 필요하기 때문이다. 기후변화에 대한 대응은 크게 완화(mitigation)와 적응(adaptation)의 두 축으로 구성되어 있다. 완화란 이산화탄소 등 온실가스의 배출을 감축시켜 온난화 속도를 늦추려는 모든 노력을 포함하며 적응이란 새롭게 대두된 기후환경에 대한 생태적, 환경적, 사회적 취약 요소를 보완하여 사회적 비용을 관리하려는 모든 대응을 포함한다. 이러한 대응책이 성공적으로 실시되기 위해서는 효율적인 자원의 배분과 경제주체의 적극적인 참여가 필수적이다. 이를 위해 필요한 탄소세, 배출권 거래제 등 사회제도의 설계가 경제학자들이 공헌한 중요한 분야 중 하나이다.

본 고에서는 필자의 개인적인 연구경험을 바탕으로 계량경제학을 이용해 기후변화 관련 문헌에 공헌한 연구들에 대해 고찰한다. 필자의 짧은 식견 때문에 불가피하게 매우 편향되고 불완전한 문헌 고찰이 될 수밖에 없음을 미리 밝혀둔다. 기후는 경제학의 매우 전통적인 주제 중 하나이다. 기후가 농업생산뿐 아니라 구성원의 건강 상태, 경제적 동기 부여, 민족 간 갈등, 노동력의 이주 등 다양한 경로를 통해 경제적 성과에 중대한 영향을 미친다는 생각은 근대 경제학의 출발 이전부터 여러 문헌에 남아 있다. 이렇게 방대한 문헌을 모두 고찰하는 것은 사실상 불가능한 작업이며 본 고에서는 상대적으로 최근에 “지구온난화”의 영향을 계량적으로 분석하는 연구에 집중하고자 한다. 즉, 지구온난화에 대한 경각심이 상대적으로 낮았던 시기에 일반적인 기후가 경제적 성과에 미치는 영향을 연구한 논문은 고찰 대상에서 제외한다.

기후변화 관련 연구의 주제는 크게 다음의 네 가지로 구분해 볼 수 있다.

- (1) 미래 온실가스 농도에 대한 예측
- (2) 미래 온실가스 경로에 따른 평균 지표면 온도의 변화와 그에 따른 강수, 폭풍 등 기후요소와 생태환경의 변화 양상에 대한 예측
- (3) 기후요소 및 생태환경 변화가 경제활동에 미치는 영향
- (4) 기후변화가 사회구성원의 후생에 미치는 영향

앞서 서술한 것과 같이 자연과학 분야에서 (1)과 (2)에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. (1)은 대규모 기후모형을 이용한 시뮬레이션 방법으로 진행되는 것이 일반적이다. IPCC가 채택한 몇몇 대표적 경로를 흔히 RCP (representative concentration pathways)라 한다. (2)와 관련해서는 Hitz and Smith (2004) 등 여러 문헌 고찰(literature review) 논문에서 정리된 것처럼 그 관심의 대상이 기후변화가 초래한 연안자원, 농업, 물자원, 인류의 건강, 에너지, 육지 및 해양 생태계, 종다양성 등으로 매우 넓다. 경제학에서는 (3)과 (4)와 관련된 연구가 많이 있으며, 해당 문헌은 Dell, Jones, and Olken (2014), Hsiang (2016), Auffhammer (2018), Tol (2018), Kolstad and Moore (2020) 등에 잘 정리되어 있다. 특히 경제학에서는 (3)과 관련해 경제적 결과변수(economic outcome)¹⁾를 기후조건으로 설명하는 축약형 통계모형을 많이 사용하며 이들 연구에 관해서 아래의 본문에서 소개한다. (4)와 관련해서는 Nordhaus 등의 학자들이 주도한 소위 거시경제모형과 기후모형을 결합한 통합기후모형 (Integrated Assessment Model, IAM)을 이용한 연구가 많이 이루어졌다. 통합기후모형은 특히 최근에 많이 발달하였으며 비교적 최근까지의 문헌이 Nikas, Doukas and Papandreou (2019)에 잘 정리되어 있다. 관심이 있는 독자는 해당 논문을 참

1) 경제학 문헌에서 고려된 경제적 결과변수로는 경제성장률, 농업생산, 산업생산, 노동생산성, 건강, 에너지소비, 정치적 안정성, 분쟁, 이주 등이 있음 (Dell, Jones, and Olken, 2014 참조)

고해 주시길 제안한다. 본고는 (2)의 범주에서 계량경제학의 방법론으로 기여한 경제학자들의 연구와 (3) 범주에서 경제성장률과 기후조건의 관계를 분석한 연구들을 중심으로 고찰한다.

II. 본론

1. 평균 지표면 온도의 변화와 그에 따른 환경 변화

1) 지구 평균온도 시계열의 통계적 성격 규명

지구온난화에 대한 자연과학 분야의 문헌을 보면 지구의 평균온도가 증가하고 있는지에 대한 논의에서 출발하여, 평균온도가 증가하는 것이 맞다면 그 원인이 과연 인간인지로 발전해왔다. 관측된 평균온도 시계열에서 통계적 방법으로 지구의 평균온도가 증가한 것을 보이기 위해서는 시간에 대해 선형인 추세가 양의 기울기를 갖음을 통계적으로 보여야 했다. 이러한 논의에 공헌한 계량경제학자의 대표적인 연구로 Fomby and Vogelsang (2002)을 들 수 있다. 양의 기울기를 갖는 선형추세의 존재는 지구 평균온도의 지속적 상승을 의미한다. 만약 평균온도 시계열에 존재하는 추세가 단위근 과정(unit root process)에 의한 확률추세(stochastic trend)라면 평균온도의 지속적 상승을 기대할 수 없는 것과 차이가 난다. 이러한 이유로 지구온난화에 대한 통계적 증거를 제시하려는 입장에서는 지구 평균온도 시계열을 선형추세를 이용하여 모형화하는 것을 선호한 것으로 보인다.

자료의 축적과 더불어 지구온난화 자체는 부정하기 힘든 실체가 되었고 논의는 지구 평균온도의 상승이 자연적인 순환과정에서 발생한 것인지 인간의 활동이 초래했는지에 관한 판단으로 옮겨갔다. 여기서 인간에 의한 것이란 경제활동에 따라 화석연료를 사용하면서 온실가스를 배출하고, 더 많은 작물과 가축을 키우고, 각종 오염물질을 배출하는 모든 행위가 복사강제력을 높여서 평균온도의 증가를 가져온다는 논리이다. 앞서 서론에서 보인 것처럼 평균온도 시계열과 복사강제력 시계열 모두 우상향하는 모습을 보인다. 그러나 두 시계열이 모두 우상향한다는 공통점으로는 인과관계를 보이기에 부족하다. 통상 대기물리학 분야에서는 대규모 기후시뮬레이션 모형을 이용하여 인간이 배출한 온실가스를 제거한 후 20세기의 평균온도를 시뮬레이션하면 실제 관측치와 비슷한 값이 얻어질 확률이 매우 작다는 점을 인간에 의한 온난화의 증거로 제시한다. 이 경우 실제 관측치가 아닌 컴퓨터가 생성한 자료에 의존해야 한다는 단점이 존재한다. 실제 관측치를 바탕으로 인간에 의한 온난화를 보이기 위해 도입된 것이 경제학의 공적분 개념이다. 만약 평균온도 시계열과 복사강제력 시계열이 공적분의 관계를 갖는다면 두 계열

은 공통의 요인에 의해 생성된 추세를 공유하여, 복사강제력의 추세가 평균온도 시계열에 전달된 것이라는 논리를 뒷받침하게 된다. 또한 물리학 이론을 받아들이면 평균온도의 증가는 복사강제력에 큰 영향을 미칠 수 없는 반면 복사강제력의 증가는 평균온도의 증가로 연결되기 때문에 단순히 상관관계를 넘어 인과관계에 대한 추론도 가능하게 해준다. 그러나 공적분 관계를 보이기 위해서는 평균온도와 복사강제력 시계열 모두에 확률추세가 존재하여야 한다. 이는 기존에 선형추세를 이용해 평균온도 시계열을 모형화한 것과 배치되는 것이기에, 자연스럽게 평균온도 시계열에 단위근이 존재하는지에 대한 논쟁으로 연결되었다.

단위근의 존재를 주장하는 학자들은 경제활동 수준을 나타내는 국내총생산(Gross Domestic Product, GDP) 등의 거시경제변수에 확률추세가 존재함을 잘 보일 수 있으므로, 경제활동의 결과인 대기 중 이산화탄소 농도 등으로 결정된 복사강제력에 동일한 추세가 존재한다는 견해이다. 또한 물리학의 에너지 균형이론에 근거하여 복사강제력과 평균온도 시계열의 공적분 관계가 성립한다고 생각한다. 지구 전체, 북반구 또는 남반구의 평균온도 시계열과 복사강제력 시계열에 단위근이 존재하며, 두 시계열은 공적분 관계를 지님을 보인 대표적인 연구로는 Kaufmann and Stern (1997, 2002), Kaufmann et al. (2006a, 2006b, 2010, 2013) 등이 있다.

경제학 문헌에는 국내총생산 시계열이 확률추세를 갖기보다는 기울기가 변하는 선형추세를 갖는다는 주장이 있다. 이를 반영하여 지구의 평균온도와 복사강제력 시계열도 기울기가 변화하는 선형추세로 모형화하는 것이 더 적합하다는 주장이 있다. 이 경우 기울기의 변화 시점이 공통인 공추세(cotrending) 모형을 사용하여 공적분의 개념을 대체할 수 있다. 또한 기후변화 문헌 초기에 사용된 양의 기울기를 갖는 선형추세 모형과 일관된 모형의 틀을 유지할 수 있는 장점이 있다. 관련된 연구로는 Gay-Garcia et al. (2009), Estrada et al. (2010), Estrada and Perron (2014), Estrada et al. (2013), Kim et al. (2020), Estrada et al. (2021) 등을 들 수 있다. 가장 최근의 연구로 Chen et al. (2022)은 추세의 형태를 특정하지 않고 평균온도와 대기 중 이산화탄소 농도 간의 장기 안정 관계를 보였다.

2) 균형기후민감도 추정

N 을 지구로 들어오는 순(純)에너지라고 정의하면 지구가 에너지 균형을 달성한 상태에서의 값 N_0 는 0이 된다. 이때 양의 복사강제력 F 를 기후시스템에 더하면 균형이 파괴되고 지구는 균형을 회복하기 위해 온도를 올리게 된다(ΔT). 온도의 증가는 기후시스템의 다양한 피드백 과정(feedback processes)을 촉발시켜서 다시 복사강제력을 감소시키고($\delta N / \delta T < 0$), 지구는 균형을 회복하게 된다. 결국 어떤 피드백 과정이 어느 강도로 진행되는가에 따라 최종적인 온도의 증가폭이 결정된다. 이를 수식으로 나타내면,

$$N = N_0 + F + \frac{\delta N}{\delta T} \Delta T + r.$$

위의 식에서 일계미분치에 -1을 곱한 $(-\delta N/\delta T)$ 을 흔히 기후반응계수(climate response coefficient)라 한다. 지구가 새로운 균형상태를 회복하면($N = 0$), 부과된 복사강제력 F 와 평균온도의 증가분 ΔT 사이에는 정확히 비례의 관계가 성립하게 된다. 즉,

$$\Delta T = S_{eq} F$$

위의 식에서 $S_{eq} = (-\delta N/\delta T)^{-1}$ 이며 통상 균형민감도계수(equilibrium sensitivity coefficient)라고 불린다. 이 균형민감도계수를 이용하면 장래의 복사강제력 수준에 따른 지구 평균온도의 증가분을 가늠해 볼 수 있다. 대기 중 이산화탄소 농도가 산업화 이전 수준의 2배에 도달했을 때의 복사강제력을 $F_{2co2} (\approx 3.71 \text{ Wm}^{-2})$ 라고 하면 이에 상응하는 지구 평균온도의 증가분을 균형기후민감도(equilibrium climate sensitivity, ECS)라고 정의한다.

$$ECS = S_{eq} F_{2co2}$$

균형민감도는 데이터 분석을 통해 얻어진 S_{eq} 값과 복사강제력 F_{2co2} 의 결합으로 얻어지므로 S_{eq} 의 정밀한 추정이 중요한 쟁점이 된다. 특히 대규모 기후 시뮬레이션 모형을 이용하면 최종적인 온도의 증가분 ΔT 의 관측이 가능하나 이는 컴퓨터가 생성한 수치라는 한계점이 있다. 따라서 실제 관측된 평균온도 및 복사강제력 시계열로부터 계량분석을 통해 S_{eq} 를 통계적으로 추정하는 연구가 중요성을 갖게 된다. 통상 자연과학자들은 단순히 최소자승법 또는 각 변수 증가분의 비율을 통해 S_{eq} 를 추정하였으나, 계량경제학자들은 보다 정제된 시계열 분석방법을 이용하여 S_{eq} 를 추정하고자 노력하였다. 자연과학 분야의 관련 연구는 매우 방대하며 Foster (2016)은 비교적 최근까지 연구에 대한 훌륭한 문헌 고찰을 제공한다. 계량경제학 방법론을 사용한 관련 연구로는 Phillips et al. (2020), Pretis (2020), Carrion-i-Silvestre and Kim (2021), Kim (2021) 등이 있다.

3) 북극 빙하 체적 예측

지구 평균온도의 증가에 따라 극지방 빙하의 크기가 빠르게 감소하고 있다. 매년 여름이 끝난 9월경에 빙하의 크기는 연간 가장 작은 크기에 도달하는데 이러한 감소추세가 계속된다면 곧 북극의 빙하가 모두 없어지는 9월이 올 것으로 예상된다. 북극 빙하의 소멸은 해수면의 상승과 연결되며, 극지방 표면의 색을 흰색에서 짙은 파란색으로 바꾸

어 지구의 태양열 흡수를 가속화 할 수 있다. 북극 빙하가 완전히 없어지는 시점을 예측하기 위해서는 현재까지 관측된 빙하의 감소추세 그리고 미래의 대기 중 이산화탄소 농도 또는 복사강제력 수준을 이용한다. 자연과학 분야에서 주로 사용하는 예측 방법은 대규모 시뮬레이션을 이용하는 것이다. Shalina et al. (2020)은 훌륭한 문헌 고찰을 제공한다. 반면 계량경제학 모형을 이용해 북극 빙하 크기에 대한 연구를 진행한 연구들이 있다. 예로서는 Diebold and Rudebusch (2022)와 동일 저자들의 아직 게재되지 않은 몇몇 논문들을 들 수 있다.

2. 기후변화의 경제활동에 대한 영향

1) 계량경제학 분석 방법론의 변천

가. 단기효과 對 장기효과

경제학 문헌에서는 기후변화가 경제활동 또는 경제성장에 미친 영향을 파악할 때, 경제주체들이 새로운 기상조건에 적응(adaptation)할 시간이 있었는지에 따라 단기와 장기로 구분한다. 예를 들어, 여름철 낮 기온이 갑자기 상승할 경우 노동생산성의 저하가 발생할 수 있으나, 고온현상이 매 여름 반복되면 노동시간을 밤 시간으로 조정하거나, 실내 온도조절 장치를 확대하고 건물구조를 개선하여 외부기온이 작업장에 미치는 영향을 최소화하거나, 실외작업장에 그늘막 등을 설치하는 등 환경변화 통해 기온 상승에 따른 노동생산성 하락의 일정부분을 상쇄시킬 수 있다. 이때, 적응할 시간이 주어지지 않은 첫 여름철에 측정된 경제적 효과를 단기효과라 하고 적응이 충분히 이루어진 새로운 균제상태에서 측정된 효과를 장기효과라고 한다. 또 하나의 예로서 생태환경의 변화에 따라 특정 농작물의 산출량이 감소할 경우 최초 산출 감소분이 단기효과에 해당하며 새로운 생태환경에 적합한 관개시설을 구비하거나 작물의 종자를 바꾸어 경작하는 등의 적응이 완료된 후의 산출 감소분을 장기효과라고 한다.

기후변화의 사회후생 변화를 올바르게 평가하고 적절한 완화정책(mitigation policy)을 수립하기 위해서는 단기효과 보다는 장기효과의 추정이 필요하다. 장기효과는 단기효과보다 추정하기 어려운데 이는 앞으로 발생하는 새로운 기후조건이 필요로 하는 적응이 현재 관측이 가능한 다른 지역의 적응과 상이한 것에 주로 기인한다. 예를 들어 상이한 기후를 지닌 두 지점 A와 B의 농업생산을 고려해 보자. A와 B는 기후가 상이한 것은 물론이고 전반적인 관개시설, 많이 재배하는 작물의 종자, 주로 사용하는 비료나 살충제 등에서도 차이가 있다고 가정하자. A의 기후가 점차 B의 기후로 수렴하는 상황이라고 할 때, 단기효과는 시계열 분석을 통해 새로운 기후조건이 발생한 첫해의 농업생산량을 이전의 농업생산량과 비교하여 추정할 수 있다. 장기효과는 새로운 기후조건에 대해 A의

여러 적응이 완료된 시점에서 농업생산량을 기후변화 이전의 농업생산량과 비교하여 구할 수 있다. A에서 발생할 일련의 적응과정이 우연히도 관개시설, 작물의 종자, 비료 및 살충제의 사용 등 모든 면에서 B의 농업생산 방식과 동일하게 변화하는 것이라면 B의 농업생산량을 통해 장기효과를 추정해 볼 수 있다. 그러나 비록 A의 기후가 B의 기후에 수렴하는 경우에도, A에서 얼마만큼의 관개시설을 추가적으로 확보할지는 주변 수자원의 분포나 자본재에 투자할 재무적 여력 즉 A의 소득수준 등에 영향을 받을 것이다. 작물의 선택도 해당 작물의 주요 수요처와의 거리 등이 중요한 고려요인이 된다. 즉 기후조건이 수렴한다고 해서 A가 적응과정을 통해 B와 동일하게 된다는 보장이 없다. 이러한 이유로 아직 관측되지 않은 적응과정 이후의 장기효과를 정확히 추정하는 것은 아직 미해결 과제로 남아 있다.

적응과정이 배제된 단기효과는 기후변화의 궁극적 영향을 과대평가할 수 있다. 그러나 단기효과는 장기효과보다 비교적 정확히 측정이 가능한 장점이 있다. 또한 Butler and Huybers (2013), Davis and Gertler (2015), Heutel et al. (2017) 등에서와 같이 여러 지역의 단기효과를 추정하고 이를 지역별 기후 특성과 연결하여 장기효과를 추정하려는 연구방법이 주목을 받고 있다. 따라서 단기효과는 그 개념적 제한점에도 불구하고 그 유용성이 완전히 소멸한 것으로 볼 수 없다.

나. 횡단면 분석

1세대 기후변화 계량모형은 기후와 경제변수의 횡단면에서의 상관관계를 이용하여 기후변화의 경제적 효과를 추정하였다. 그 추정식은 다음과 같다.

$$y_i = a + bC_i + \gamma'x_i + e_i$$

위 식에서 i 지역에 대해 y_i 는 경제변수, C_i 는 평균기온, 강수량 등의 기후변수, x_i 는 소득수준 등의 여타 통제변수, e_i 는 오차항을 뜻한다. 대표적인 예로서 미국 자료의 분석을 통해 평균온도 및 강수가 농경지 가격에 미치는 영향을 분석하여 기후변화의 효과를 분석한 Mendelsohn, Nordhaus, and Shaw (1994)가 있다. 온실가스의 경제적 영향을 평가한 Fankhauser (1995)도 유사한 사례로 볼 수 있다.

횡단면 분석의 경우 경제변수와 기후변수의 공간적 변화(spatial variation)의 상관관계를 이용하여 기후변화의 한계효과(marginal effect)를 추정하게 된다. 예를 들면 매우 더운 동남아시아 지역 국가와 훨씬 추운 고위도 지역 국가의 경제적 성과 차이를 두 지역의 기후 차이로 설명하는 것을 생각해 볼 수 있다. 한 시점에 횡단면으로 측정된 경제변수는 각 지역이 오랫동안 경험한 기후에 적응이 완료된 상태의 결과로 해석할 수 있고, 횡단면 분석을 이용하여 추정한 기후변화의 효과는 장기효과에 해당된다.

한 지역의 경제적 성과를 한 시점에서 측정하면 그 측정된 값은 그 지역의 기후뿐 아니라 역사적으로 발생했던 다양한 일들, 예를 들면, 종교의 부침, 정치제도의 변화, 노동력의 대규모 이주, 타민족과의 갈등, 역병, 구성원의 일반적 건강상태, 과학기술의 발전, 주변국의 흥망성쇠 등 수많은 사건의 결과이다. 또한 적지 않은 경우에 이러한 비기후적 사건들이 기후조건과 상관관계를 지니게 된다. 역병이나 구성원의 일반적 건강상태가 기후조건과 연결된 것은 물론이며 노동력의 대규모 이주, 타민족과의 갈등 등 많은 역사적 사건의 동기가 기후조건 또는 그에 따라 결정된 자연환경 위협의 극복에 있기 때문이다. 따라서 이러한 역사적 사건들이 추정과정에서 적절히 통제되지 않으면 기후의 한계효과 추정치에 편의(bias)가 발생한다. 이러한 편의를 최소화하기 위해 기후의 효과를 측정하는 회귀식에 다양한 통제변수를 포함시키지만 경제적 성과에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인을 데이터로 통제하는 것은 불가능에 가까운 일이다. 이는 횡단면 분석이 지닌 가장 큰 문제점으로서 연구자들로 하여금 자연스럽게 패널데이터 분석과 같은 연구방법을 추구하도록 하였다.

다. 패널데이터 분석

1세대 횡단면 모형의 단점을 보완하기 위해 2세대 모형에서는 패널데이터를 사용하였다. 가장 기본적인 모형은 다음과 같다.

$$y_{it} = a_i + bC_{it} + \gamma'x_{it} + \theta_t + e_{it}$$

위 식에서 i 지역의 t 시점에 대해서 y_{it} 는 경제변수, C_{it} 는 기후변수, x_{it} 는 여타 통제변수, e_{it} 는 오차항, a_i 는 미관측 지역특성, θ_t 는 미관측 시간특성을 나타낸다. 미관측 지역특성이란 시간에 대해 불변인 해당지역의 고유한 특성으로서 경제변수에 영향을 미칠 수 있는 요인을 뜻한다. 가령 풍습, 종교, 구성원의 일반적 건강상태 등이 모두 포함되는 개념이다. 미관측 시간특성은 모든 지역에 공통적으로 적용되는 시변요인으로서 과학기술의 일반적인 발달 수준 등을 포함하는 개념이다. 표준적인 선형 패널데이터 모형을 사용한 대표적인 연구로 Deschenes and Greenstone (2007), Burke, Hsiang, and Miguel (2015) 등이 있다.

패널데이터 모형은 미관측 지역특성과 시간특성을 통제할 수 있기 때문에 횡단면 분석에 비해 모형이 잘 식별되며 기후변화의 한계효과에 대한 추정치도 편의의 문제로부터 자유로운 것으로 인식된다.

패널모형은 매 시점에 기후변수와 경제변수가 각 지역별 평균치에서 벗어나는 부분의 상관관계를 이용하여 기후변화의 한계효과를 추정하기 때문에 단기효과를 추정하게 된다. 또한 모든 지역에서 공통의 기후효과 계수 b 가 적용되므로 추정된 효과는 각 지역

별 효과의 평균치로 해석할 수 있다.

기후변화의 중요한 특징 중 하나는 그 전개 양상과 파급효과가 모두 지역별 이질성(regional heterogeneity)을 갖는다는 점이다. 그 이유로는 첫째, 지구온난화는 통상 지구 전체의 평균 지표면 온도(GMST)가 지속해서 상승하는 현상을 가리키지만, 지표면의 온도 추이를 위도와 경도로 구분하여 산출해 보면 상당한 지역 간 편차가 존재하며 강수량, 폭풍 등 여타의 기후요소도 고려하면 지역 간 편차는 더욱 확대되기 때문이다. 둘째, 특정 사회는 경험적으로 습득한 기후 조건에 대응할 수 있는 인프라(infrastructure)를 구비하고 있으며, 이러한 인프라의 대응 능력을 넘어서는 이상 기후조건이 경제활동에 영향을 미치게 된다는 점을 고려해 보면 사회별 인프라의 이질성이 동일 종류의 이상 기후조건에 대해서도 상이한 파급효과를 초래하기 때문이다. 기후효과의 지역별 편차가 크지 않다면 패널모형은 효율적인 추정치를 제공한다. 반면 지역별 편차가 큰 경우 각 지역에서 실제로 경험하는 기후변화의 효과와 평균치의 괴리가 커서 해당 지역의 기후변화 대응책 수립에 유용성이 떨어지게 된다.

기본 패널모형의 단점을 극복하기 위해 몇몇 파생모형이 사용되었다. 먼저 기후변화 효과의 지역적 상이성을 감안한 모형은 다음과 같다.

$$y_{it} = a_i + b_0 C_{it} + b_1 C_{it} C_{i0} + \gamma' x_{it} + \theta_t + e_{it}$$

위 식에서 C_{i0} 는 기후변수의 초기치로서 해당 지역의 일반적인 기후의 특성을 나타내며 여타의 변수는 기본모형의 것들과 동일하다. 시변하는 C_{it} 와 시간고정인 C_{i0} 의 교차항이 포함된 것이 특징이다. 대표적인 연구로 Deschenes and Greenstone (2011), Dell, Jones, and Olken (2012) 등이 있다.

이 모형을 앞서 설명한 기본모형과 비교하여 보면 기후변화의 한계효과가

$$\frac{dE(y_{it} | C_{it}, x_{it})}{dC_{it}} = b_0 + b_1 C_{i0}$$

로 주어지는 것을 알 수 있다. 이는 한계효과가 지역별로 이질적일 수 있으나 그 양상이 각 지역별 초기 기후조건과 정확히 선형 관계가 있음을 가정하고 있다. 이는 고온 지역에서 기온이 섭씨 1도 증가할 때의 효과와 저온 지역에서 섭씨 1도 증가할 때의 효과가 각 지역 기온의 초기치에 의해서 정해진다는 뜻으로 해석할 수 있다. 따라서 그 효과가 해당 사회의 소득수준 또는 인프라의 수준 등에 의해 달라질 수 있음을 허용하지는 않는다.

또 하나의 파생모형으로서 동태효과(dynamic climate effects) 모형을 들 수 있다. 동태효과 모형의 추정식은 다음과 같이 주어진다.

$$y_{it} = a_i + \sum_{j=0}^K b_j C_{it-j} + \sum_{j=1}^K d_j C_{it-j} C_{it} + \gamma' x_{it} + \theta_t + e_{it}$$

위 식에서 각 변수는 기본모형의 것들과 동일하다. 이 모형을 기본모형과 비교해 보면 기후변수 C_{it} 의 시차항(C_{it-j}) 그리고 C_{it} 와 시차항의 교차항($C_{it}C_{it-j}$)이 포함된 특징이 있다. 이 파생모형의 목적은 이상 기상조건이 연속적으로 발생하면 그 효과가 가중되어 나타날 수 있다는 점을 허용하기 위함이다. 예를 들어, 가뭄이 처음 발생하면 저수지의 저장수로 대응이 가능하지만, 연속적으로 발생하면 저장수를 이용한 대응이 불가능하여 가뭄의 피해가 더욱 크게 나타나는 것을 생각해 볼 수 있다. 이 모형에서 기후변화의 한계효과는 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{dE(y_{it} | C_{it}, x_{it})}{dC_{it}} = b_0 + \sum_{j=1}^K d_j C_{it-j}$$

여기에서 시차항 앞의 계수 d_j 가 양수이면 앞서 설명한 이상 기상조건에 연속적 발생에 따른 가중효과를 표현할 수 있음을 알 수 있다.

마지막 파생모형으로 장기차분(long differences) 모형을 들 수 있다. 해당 모형의 추정식은 다음과 같이 주어진다.

$$y_{id} = a_i + bC_{id} + \gamma' x_{id} + \theta_d + e_{id}$$

위 식에서 시간 색인 d 는 1970-1980과 1990-2000과 같이 시간상으로 크게 분리된 두 기간의 평균을 뜻한다. 시간적으로 크게 분리된 두 시점에서 경제변수와 기후변수 변화분 간의 상관관계를 통해 한계효과를 추정하려 한다. 비교하는 두 시점을 중심으로 각각 시간 평균을 고려하는 것은 각 변수에 존재하는 단기적 변화들을 서로 상쇄시켜 제거하는 효과가 있다. 시간적으로 충분히 분리되어 있다면 새로운 기후조건에 적응할 시간이 충분히 주어진 것으로 가정하여 추정된 효과가 단기효과보다는 장기효과에 가까울 것으로 여겨진다. 대표적인 연구로 Dell, Jones, and Olken (2012), Burke and Emerick (2016), Moore and Lobell (2015) 등을 들 수 있다.

2) 분석 대상인 경제성과 변수

기후변화의 영향은 총산출, 농업생산 등 많은 경제성과 변수에 대해 다각적으로 연구되었다. 이들 연구를 모두 언급하는 것은 불가능하며, 저자의 짧은 식견이 허락하는 범위 내에서 정리한 비교적 최근의 연구는 다음과 같다.

가. 총산출 및 산업별 산출

온도 또는 강수량과 같은 기후변수가 생산량 또는 노동생산성에 영향을 미치는가에 관한 연구는 아주 오래전에 시작되었다. 현대적 의미의 계량분석이 실시된 연구는 대체로 1990년 이후에 이루어졌다. 이들 연구는 횡단면 분석을 이용하여 온도와 1인당 소득이 음의 상관관계가 있음을 보였다. 국가간 자료를 분석한 대표적인 연구로는 Gallup, Sachs, and Mellinger (1999), Sachs (2001, 2003) 등이 있으며, 동일 국가 내에서 지역별 자료를 분석한 연구로는 Nordhaus (2006), Dell, Jones, and Olken (2009) 등이 있다. 물론 이러한 연구는 앞서 설명한 바와 같이 기후의 효과와 여타의 지역별 특성을 통계적으로 완전히 구분하지 못하는 단점이 있다.

횡단면 분석의 단점을 극복하는 패널모형을 이용한 연구는 대체로 2010년대 이후에 많이 이루어졌다. 예로서는 Dell, Jones, and Olken (2012), Hsiang (2010), Barrios, Bertinelli, and Strobl (2010) 등을 들 수 있다. 이들 연구는 평균온도의 상승은 1인당 소득의 감소로 연결된다는 점을 보였다. 온도와 강수 이외에 폭풍의 경제적 효과에 대한 분석도 이루어졌다. Hsiang and Narita (2012)은 국가 패널 분석을 통해 폭풍이 경제에 음의 영향을 미침을 보였다. Hsiang and Jina (2014)는 폭풍이 경제성장률을 낮춤을 보였다.

기온이 산업별 또는 거시경제 전체적으로도 유의미한 영향을 주는지에 관한 연구가 많이 진행되었다. 예로서 Hsiang (2010), Jones and Olken (2010), and Dell, Jones, and Olken (2012) 등을 들 수 있다. 이 연구들이 제시하는 추정치의 크기나 유의성은 다소 상이하나 대략 기온이 1도 오르면 산출이 2% 안팎 줄어든다는 결과를 보고하고 있다.

나. 농업

기후가 농업생산에 미친 영향에 관한 연구는 경제학은 물론 자연과학의 많은 분야에서도 이루어졌다. 또한 특정 지역의 특정 작물 수확량에 관한 연구와 같이 매우 세분화된 주제에 관한 연구도 많이 이루어졌다. 농업생산으로 한정하지 않고 특정한 식물 종(種)에 관한 연구로 확대하면 문헌은 더욱 방대해진다. 경제학의 범위를 벗어나지 않고 패널 데이터를 사용한 비교적 최근의 연구로는 Deschenes and Greenstone (2007), Fisher et al. (2012), Schlenker and Lobell (2010), Guiteras (2009), Feng, Krueger, and Oppenheimer (2010), Schlenker and Roberts (2009), Burke and Emerick (2016), Welch et al. (2010), Lobell, Schlenker and Costa-Roberts (2011) 등이 있다. 이러한 연구들이 보고하는 대체적인 결과는 기온의 상승이 농업생산에 부정적인 영향을 미친다는 점이다. 관심이 있는 독자는 해당 분야의 문헌을 별도로 고찰할 것을 제안한다.

다. 노동 생산성 및 노동 공급

기온 등 작업환경을 결정짓는 기후조건이 노동 공급 및 생산성에 영향을 준다는 가설을 검증하기 위한 실증 연구는 매우 오래전부터 이루어졌다. 노동경제학 분야에서 많은 연구성과가 있었기에 해당 연구들을 여기에서 모두 언급하는 것은 불가능하다. 다만 비교적 최근에 실제 관측치를 바탕으로 진행된 연구의 예로서 Graff Zivin and Neidell (2014)을 들 수 있다. 이 연구는 기온이 너무 더워지면 실외 작업이 필요한 산업에서는 노동 공급을 줄이고 여가 활동도 실외가 아닌 실내로 전환하며, 추운 날씨가 따뜻해지면 노동공급에 미치는 영향은 크지 않으나 실외 여가 활동이 증가함을 보였다. 또한 Somanathan et al. (2021)은 인도 제조업 데이터를 바탕으로 기온의 상승이 노동 생산성 및 공급을 감소시킴을 보였다. 또한 실험을 바탕으로 환경이 작업자 또는 학생의 과업 성과에 미친 영향을 측정한 다양한 연구가 존재한다. 역시 관심이 있는 독자는 해당 분야의 문헌을 별도로 고찰할 것을 제안한다.

라. 기타

기후변화가 영향을 주는 변수 중에서 비록 경제적 성과를 직접적으로 나타내지 않아도 궁극적으로 경제적 성과에 영향을 미치는 변수에 관한 연구들은 기후변화의 경제적 영향에 관한 연구의 하나로 인식되기도 한다. 예를 들면, 구성원의 건강이나 사망률, 집단간 갈등, 정치적 안정성, 범죄 등을 들 수 있다. 이러한 변수들에 관한 연구는 경제 성과와 연계되지 않더라도 독자적 중요성을 지니고 있으며, 보건경제학, 정치경제학, 경제사, 범죄경제학, 사회학, 정치학 등 다양한 분야에서 이루어지고 있다.

III. 결론

기후변화의 중요성이 날로 높아지는 가운데 경제학 분야에서도 무수히 많은 연구가 진행되고 있다. 기후변화는 단순히 환경경제학의 문제가 아닌 다양한 경제학 세부 분야의 연구주제가 되었다. 특히 거시경제학, 노동경제학, 보건경제학, 정치경제학 등의 분야에서 연구가 활발하다. 계량경제학의 분석방법을 자연과학 연구에 적용하는 경제학자의 연구도 많이 이루어지고 있다.

경제학적 관점에서 기후변화를 연구하더라도 올바른 연구를 위해서는 기후변화 관련 자연과학적 배경지식이 반드시 필요하다. 앞으로 대기물리학, 기후학, 지구과학 등 자연과학 분야의 학자들과 경제학자의 협업이 많이 이루어져 기후변화 문제의 해결에 실질적으로 기여할 수 있는 연구들이 많이 이루어지길 기대해 본다.

본 문헌 고찰을 쓰면서 저자의 학습이 얼마나 짧고 부족한지 뼈저리게 깨닫게 되었다. 부끄러운 원고이지만 최소한 기후변화 관련 연구를 처음 시작하고자 하는 연구자에게 다소간의 도움이 되기를 희망한다.

참고문헌

- Auffhammer, M.(2018), “Quantifying Economic Damages from Climate Change,” *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 33-52.
- Barrios, S., Bertinelli, L., & Strobl, E.(2010), “Trends in Rainfall and Economic Growth in Africa: A Neglected Cause of the African Growth Tragedy,” *Review of Economics and Statistics*, 92(2), 350-66.
- Burke, M., & Emerick, K.(2016), “Adaptation to climate change: Evidence from US agriculture,” *American Economic Journal Economic Policy*, 8(3), 106-40.
- Burke, M., Hsiang, S., & Miguel, E.(2015), “Global non-linear effect of temperature on economic production,” *Nature*, 527, 235-239.
- Butler, E. E., & P. Huybers(2013), “Adaptation of US maize to temperature variations,” *Nature Climate Change*, 3(1), 68-72.
- Carrion-i-Silvestre, J. L., & Kim, D.(2021), “Statistical tests of a simple energy balance equation in a synthetic model of cotrending and cointegration,” *Journal of Econometrics*, 224, 22-38.
- Chen, L., Gao, J., & Vahid, F.(2022), “Global temperatures and greenhouse gases: A common features approach,” *Journal of Econometrics*, 230(2), 240-254.
- Davis, L. W., & Gertler, P. J.(2015), “Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming,” *PNAS*, 112(19), 5962-67.
- Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A.(2009), “Temperature and Income: Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates,” *American Economic Review*, 99(2), 198-20.
- Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A.(2012), “Temperature shocks and economic growth: evidence from the last half century,” *American Economic Journal Macroeconomics*, 4, 66-95.
- Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A.(2014), “What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature,” *Journal of Economic Literature*, 52(3) 740-798.
- Deschenes, O., & Greenstone, M.(2007), “The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural output and random fluctuations in weather,” *American Economic Review*, 97, 354-85.
- Deschenes, O., & Greenstone, M.(2011), “Climate change, mortality, and adaptation: Evidence from annual fluctuations in weather in the US,” *American Economic Journal Applied Economics*, 3, 152-85.
- Diebold, F. X., & Rudebusch, G. D.(2022), “Probability assessments of an ice-free Arctic: Comparing statistical and climate model projections,” *Journal of Econometrics*,

- 231(2), 520-534,
- Estrada, F., Gay, C., & Sanchez, A.(2010), "A reply to "does temperature contain a stochastic trend? evaluating conflicting statistical results" by r. k. kaufmann et al.," *Climatic Change*, 101(3/4), 407-414.
- Estrada, F., Kim, D., & Perron, P.(2021), "Spatial variations in the warming trend and the transition to more severe weather in midlatitudes," *Scientific Reports*, 11, 145.
- Estrada, F., & P. Perron(2014), "Detection and attribution of climate change through econometric methods," *Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana*, 20(1), 107-136.
- Estrada, F., P. Perron, & B. Martinez-Lopez(2013), "Statistically derived contributions of diverse human influences to twentieth-century temperature changes," *Nature Geoscience*, 6, 1050-1055.
- Feng, S., Krueger, A. B., & Oppenheimer, M.(2010), "Linkages among Climate Change, Crop Yields, and Mexico-US Cross-Border Migration," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(32), 14257-62.
- Fisher, A. C., Hanemann, W. M., Roberts, M. J., & Schlenker, W.(2012), "The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather: Comment," *American Economic Review*, 102(7), 3749-60.
- Fisher, L. A., H.-S. Huh, & A. R. Pagan(2016), "Econometric methods for modelling systems with a mixture of I(1) and I(0) variables," *Journal of Applied Econometrics*, 31, 892-911.
- Fankhauser, S.(1995), *Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse*, London, Earthscan.
- Fomby, T. B., & Vogelsang, T. J.(2002), "The Application of Size Robust Trend Analysis to Global Warming Temperature Series," *Journal of Climate*, 15, 117-123,
- Forster, P. M.(2016), "Inference of climate sensitivity from analysis of earth's energy budget," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 85-106.
- Gallup, J. L., Sachs, J. D., & Mellinger, A. D.(1999), "Geography and Economic Development," *International Regional Science Review*, 22(2), 179-232.
- Gay-Garcia, C., Estrada, F., & Sanchez, A.(2009), "Global hemispheric temperatures revisited," *Climatic Change*, 94, 333-349.
- Graff Zivin, J., & Neidell, M.(2014), "Temperature and the Allocation of Time: Implications for Climate Change," *Journal of Labor Economics*, 32(1), 1-26. <https://doi.org/10.1086/671766>
- Guiteras, R.(2009), *The Impact of Climate Change on Indian Agriculture*, Unpublished manuscript, Maryland Population Research Center.

- Heutel, G., Miller, N. H., & Molitor, D.(2017), “Adaption and the mortality effects of temperature across U.S. climate regions,” *NBER Working Paper*, 2371.
- Hitz, S.I., & Smith, J.(2004), “Estimating global impacts from climate change,” *Global Environmental Change*, 14(3), 201-218.
- Hoekman, B., & M. Kosteki(2001), *The Political Economy of the World Trading System: WTO and Beyond*, Oxford University Press.
- Hsiang, S. M.(2010), “Temperatures and Cyclones Strongly Associated with Economic Production in the Caribbean and Central America,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(35), 15367-72.
- Hsiang, S. M.(2016), “Climate Econometrics,” *Annual Review of Resource Economics*, 8, 43-75.
- Hsiang, S. M., & Jina, A.(2014), “The Causal Effect of Environmental Catastrophe on Long-Run Economic Growth: Evidence from 6,700 Cyclones,” *NBER Working Paper*, 20352.
- Hsiang, S. M., & Narita, D.(2012), “Adaptation to Cyclone Risk: Evidence from the Global Cross-Section,” *Climate Change Economics*, 3(2), 1-28.
- Jones, B. F., & Olken, B. A.(2010), “Climate Shocks and Exports,” *American Economic Review*, 100(2), 454-59.
- Kaufmann, R. K., Kauppi, H., & Stock, J. H.(2006a), “Emissions, concentrations, & temperature: A time series analysis,” *Climatic Change*, 77, 249-278.
- Kaufmann, R. K., Kauppi, H., & Stock, J. H.(2006b), “The relationship between radiative forcing and temperature: What do statistical analyses of the instrumental temperature record measure?,” *Climatic Change*, 77, 279-289.
- Kaufmann, R. K., Kauppi, H., & Stock, J. H.(2010), “Does temperature contain a stochastic trend? evaluating conflicting statistical results,” *Climatic Change*, 101(3/4), 395-405.
- Kaufmann, R. K., Kauppi, H., Mann, M. L., & Stock, J. H.(2013), “Does temperature contain a stochastic trend: Linking statistical results to physical mechanisms,” *Climatic Change*, 118(3/4), 729-743.
- Kaufmann, R. K., & Stern, D. I.(1997), “Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations,” *Nature*, 388, 39-44.
- Kaufmann, R. K., & Stern, D. I.(2002), “Cointegration analysis of hemispheric temperature relations,” *Journal of Geophysical Research*, 107(D2), ACL 8-1-ACL 8-10.
- Kolstad, C. D., & F. C. Moore(2020), “Estimating the Economic Impacts of Climate Change Using Weather Observations,” *Reveiw of Environmental Economics and Policy*, 14(1), 1-24.

- Kim, D.(2021, “On the invalidity of the ordinary least squares estimate of the equilibrium climate sensitivity,” *Theoretical and Applied Climatology*, 146, 21-27.
- Kim, D., Oka, T., Estrada, F., & Perron, P.(2020), “Inference related to common breaks in a multivariate system with joined segmented trends with applications to global and hemispheric temperatures,” *Journal of Econometrics*, 214, 130-152.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J.(2011), “Climate Trends and Global Crop Production since 1980,” *Science*, 333, 616-620. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1204531>
- Marcott, S. A., J. D. Shakun, P. U. Clark & A. C. Mix(2013), “A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years,” *Science*, 339(6124), 1198-1201.
- Mendelsohn, R. W. D. Nordhaus, & D. Shaw(1994), “The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis,” *American Economic Review*, 84, 753-771.
- Moore, F. C., & Lobell, D. B.(2014), “The adaptation potential of European agriculture in response to climate change,” *Nature Climate Change*, 4, 610-14.
- Nordhaus W. D.(2006), “Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10), 3510-17.
- Nordhaus, W. D., & Moffat, A.(2017), “A survey of global impacts of climate change: Replication, survey methods, and a statistical analysis,” *National Bureau of Economic Research Working Paper*, 23646.
- Peersman, G.(2005), “What caused the millenium slowdown? Evidence based on autoregressions,” *Journal of Applied Econometrics*, 20, 185-207.
- Phillips, P. C. B., Leirvik, T., & Storelvmo, T.(2020), “Econometric estimates of Earth’s transient climate sensitivity,” *Journal of Econometrics*, 214(1), 6-32.
- Pretis, F.(2020), “Econometric modelling of climate systems: The equivalence of energy balance models and cointegrated vector autoregressions,” *Journal of Econometrics*, 214, 256-273.
- Sachs, J. D.(2001), “Tropical Underdevelopment,” *CID Working Papers*, 57A, Center for International Development at Harvard University.
- Sachs(2003), “Institutions Don’t Rule: Direct Effects of Geography on Per Capita Income,” *National Bureau of Economic Research Working Paper*, 9490.
- Schlenker, W., & Lobell, D. B.(2010), “Robust Negative Impacts of Climate Change on African Agriculture,” *Environmental Research Letters*, 5(1), 014010.
- Schlenker, W., & Roberts, M. J.(2009), “Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to U.S. Crop Yields under Climate Change,” *Proceedings of the National*

Academy of Sciences, 106(37), 15594-98.

Shalina, E. V., O. M. Johannessen, & S. Sandven(2020), “Changes in Arctic Sea Ice Cover in the Twentieth and Twenty-First Centuries,” in Johannessen, O.M., Bohylev, L.P., Shalina, E.V., & Sandven, S. eds., *Sea Ice in the Arctic: Past Present and Future*, Springer Nature, 93-166.

Somanathan, E., Somanathan, R. Sudarshan, A., & Tewari, M.(2021), “The Impact of Temperature on Productivity and Labor Supply: Evidence from Indian Manufacturing,” *Journal of Political Economy*, 129(6), 1797-1827.

Tol, R. S. J.(2018), “The Economic Impacts of Climate Change,” *Reveiw of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 4-25.