Environmental and Resource Economics Review Volume 25, Number 1, March 2016: pp. 27~60 DOI: http://dx.doi.org/10.15266/KEREA.2016.25.1.027

사회후생함수를 중심으로 한 기후경제통합-지역평가모형 비교분석[†]

황인창*

요약: 기후경제통합평가모형(Integrated assessment model of climate and the economy)은 기후변화에 관한 경제 분석과 정책제안을 위한 필수적인 도구가 되어왔다. 최근에는 기후변화에 대응하기 위한 정책적 노력들이 대부분 국가 또는 지역 수준에서 일어난다는 인식 하에 국가 또는 지역에서의 기후변화 영향과 정책수단의 효과를 평가할 수 있는 기후경제통합-지역평가모형(Regional integrated assessment model of climate and the economy)의 중요성이 더욱 커지고 있다. 이 논문에서는 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 첫 번째 단계로서 사회후생함수를 중심으로 기후경제통합-지역평가모형을 이론적으로 유형화했으며, RICE(Regional integrated climate-economy model) 모형을 통해 기후변화 대응전략에 따른 국가별 기후변화정책의 변화를 수치적으로 살펴보았다. 변화하는 국제 상황, 새롭게 드러나는 과학적 증거, 국내 여건 등을 모두 반영한 기후변화정책을 수립하기 위해서는 이를 분석할 수 있는 효과적인 도구를 갖추고 있어야 한다. 이 논문에서 살펴본 기후경제통합-지역평가모형은 이를 위한 유용한 도구가 될 수 있다.

주제어: 기후변화, 기후변화정책, 기후경제 통합평가, 지역평가모형, RICE 모형

JEL 분류: Q54

접수일(2015년 11월 17일), 수정일(2016년 2월 4일), 게재확정일(2016년 3월 9일)

^{*}이 논문은 한국환경정책·평가연구원(KEI)에서 수행한 "기후경제통합·지역평가모형 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구"의 일부를 학술 논문의 형태로 발전시킨 것임을 밝힌다. 논문의 초안은 한국환경정책학회 2015년 추계학술대회(2015,10,30, 서울 코엑스)에서 발표된 바 있다. 익명의 논문 심사위원 및 학술대회 참가자분들의 비평과 조언에 감사를 표한다. 논문의 모든 내용에 대한 책임은 저자에게 있다.

^{*} 한국환경정책·평가연구원, 부연구위원(e-mail: ichwang@kei.re.kr)

Comparative Analysis of Regional Integrated Assessment Models of Climate and the Economy

In Chang Hwang*

ABSTRACT: An integrated assessment model of climate and the economy (IAM) has been a standard tool for the economic analysis of climate change and policy recommendations. Since policy measures to address climate change take places at a national level, a regional integrated assessment model of climate and the economy (RIAM) is gaining more importance. A RIAM is a useful tool for the assessment of regional (or national) impacts of climate change. This paper investigates the main features of the currently available RIAMs. The focus is social welfare functions and the regional aspects of climate change. The comparative analysis shows that there is a huge gap between the economics of climate change and its applications to RIAMs. As an application, this paper examines the effect of social welfare functions on optimal solutions of the RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy) model. It is found that optimal climate policy such as carbon tax or emissions control rate is very sensitive to the assumptions on social welfare functions of RIAMs. It is better for each country to have their own RIAM as a basic tool for national climate policy-making and for international bargaining in greenhouse-gas mitigation. This is because a country's own preferences such as efficiency, equity, and sustainable development as well as national circumstances can be reflected in RIAM. The Republic of Korea has not developed its own RIAM yet. The comparative analysis and the numerical model in this paper can be a stepping stone for the development of such a national model.

Keywords: Climate change, Climate policy, Integrated assessment, Regional assessment model, RICE

Received: November 17, 2015, Revised: February 4, 2016, Accepted: March 9, 2016,

^{*} KEI, Research Fellow(e-mail: ichwang@kei.re.kr)

1. 서 론

최근 국제 기후변화협상에서는 기후경제통합-지역평가모형(Regional integrated assessment model of climate and the economy)의 연구결과가 협상의 주요 근거로 활용되고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)의 제5차 평가보고서에서 제시하고 있는 지역별 온실가스 감축 권고량도 이러한 기후경제통합-지역평가모형의 연구결과에 근거한 것이다(Clarke et al., 2014).

기후경제통합-지역평가모형의 연구결과는 국내 기후변화정책을 수립하는 데 있어서도 중요한 근거로 활용될 수 있다. 미국의 경우 연방정부 워킹그룹(Interagency working group on social cost of carbon)에서 기후경제통합모형을 근거로 탄소세에 관한 보고서를 발간하고 있다(IWGSCC, 2013). 구체적으로 미국에서는 DICE (Dynamic Integrated assessment model of Climate and the Economy) (Nordhaus, 2013), FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) (Anthoff and Tol, 2014a), PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect) (Hope, 2011) 등 국제적으로 널리 활용되고 있는 기후경제모형의 연구결과를 바탕으로 미국의 탄소의 사회적 비용(Social cost of carbon)을 산출하고 있다. 영국의 경우에는 재무부(HM Treasury) 주관으로 기후 변화 경제학에 관한 스턴보고서(Stern, 2006)를 발간하고 PAGE 모형을 활용해 최적 기후변화정책을 제시하고 있다.)

학계에서도 기후경제통합-지역평가모형을 바탕으로 최적의 기후변화정책을 분석하고자 하는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 대표적으로 에너지 모델링 포럼(Energy Modelling Forum)에서는 1976년부터 전 세계 주요 에너지-기후경제모형에 대한 비교연구를 수행하고 있다(Weyant et al., 2013). Anthoff and Tol (2010)은 FUND 모형을 활용해 국가(지역)별 기후변화 대응전략에 따른 최적 탄소세를 산출한 바 있다. 이밖에도 최근에는 다양한 사회후생함수, 에너지 정책, 기후변화 적응 등을 고려한 기후경제통합-지역평가모형이 개발되는 등 학계의 연구는 꾸준히 발전해가고 있다.2)

¹⁾ 또한 영국 정부는 2002년에도 탄소의 사회적 비용에 관한 리뷰 보고서(Clarkson and Deyes, 2002)를 발간하고 해당 보고서에서 제시한 탄소의 사회적 비용을 영국 기후변화정책을 위한 기본 값으로 사용해왔다(Pearce, 2005).

²⁾ 예를 들어, Ackerman et al. (2013a), Bosello and De Cian (2014), de Bruin (2014)은 다양한 온실가스

현재 대부분의 기후경제통합-지역평가모형은 미국, 유럽, 일본 등에서 개발한 것으로 한국을 비롯한 후발 경제성장국들의 관심이 덜 반영되는 경향이 있다(Stanton et al., 2008). 구체적으로 대부분의 모형에서 한국은 독립된 국가로 다루어지기보다는 기타 국 가군에 포함되는 경우가 많아 모형의 결과를 국내 정책에 적용하기에는 한계가 있다. 한국의 경제규모와 온실가스 배출규모 등을 고려할 때 기후경제통합-지역평가모형에서 한국을 독립된 국가로 다루는 것은 국제 기후변화정책을 분석하는데 있어서도 의미있는 일이라 할수 있다. 3) 또한 현실적으로 국제 기후변화 협상이 이상적인 형태로 진행되기는 어렵다는 점을 감안한다면(Nordhaus, 2013), 개별국가의 현실과 전략을 반영할수 있는 기후경제통합-지역평가모형이 더욱 필요하다고 할수 있다. 관련하여 최근에는 기후경제통합-지역평가모형을 활용해 특정 국가의 최적 탄소세를 독자적으로 산출하려는 연구도 진행되고 있다(Wong, 2012).4)

국내에서는 기후변화문제와 관련하여 주로 연산가능일반균형(CGE: Computable General Equilibrium)모형을 활용한 연구가 수행되어 왔다(김용건 외, 2014; 강성원 외, 2014). CGE 모형은 Kenneth Arrow와 Gerard Debreu의 일반균형 이론을 연산 가능한 형태로 응용한 수치 모형이라고 할 수 있는데, 기후변화문제와 관련해서는 주로 탄소세등 외부에서 결정된 기후변화정책이 경제 전반에 미치는 파급효과를 다루는 데 사용되어 왔다. 반면 이번 연구에서 다루는 기후경제통합-지역평가모형은 CGE 모형과는 달리경제활동과 기후변화의 상호작용을 고려하여 외부효과를 내부화함으로서 사회후생을 최대화하기 위한 기후변화정책(탄소세, 배출권 할당량 등)을 산출하는 수치모형이라고할 수 있다. 5) 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 활용한 대표적인 예로는 채여라외 (2012)가 있다. 채여라외 (2012)는 기후변화의 경제적 영향을 종합적으로 분석하기위해 PAGE 모형을 활용했는데, PAGE 모형의 지역구분을 따라 산출된 결과에 가중치를 적용하는 방식으로 기후변화가 한국에 미치는 영향을 분석했다. Chae et al. (2006)도

감축비용 함수, 에너지 정책, 기후변화 적응 등을 고려한 기후경제통합-지역평가모형을 개발했다.

³⁾ World Development Indicators (World Bank, 2015)에 따르면, 2014년을 기준으로 한국의 GDP는 전세계 10위이며 온실가스 배출량은 전 세계 7위이다.

⁴⁾ 다만 Wong(2012)은 새로운 기후경제통합-지역모형을 개발하기 보다는 PAGE 모형에서 산출된 유럽 연합 탄소세에 가중치를 적용해 말레이시아의 탄소세로 간접적으로 산출했다.

⁵⁾ 최근에는 컴퓨터 계산 능력이 향상됨에 따라 CGE 기법을 반영한 기후경제모형들도 개발되고 있다.

유사한 방식으로 PAGE 모형을 활용해 한국의 기후변화 피해비용을 산출했다.

이 논문은 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 첫 번째 단계로서 사회후생함수를 중심으로 기존 모형을 비교 분석하고자 한다. 구체적으로 이 논문은 2 장에서 사회후생함수를 중심으로 기후경제통합-지역평가모형을 유형화하였고, 3장에 서는 실제로 수치모형을 응용해 사회후생함수에 관한 가정이 국가별 기후변화정책에 미치는 영향을 살펴보았다. 2장과 3장의 연구 결과들은 사회후생에 관한 국가별 가치체계에 따라 기후 시스템이 큰 폭으로 변하며 이에 따라 국가별 최적 기후변화정책이 크게 달라질 수 있음을 잘 보여준다. 기존 논문들은 기후경제통합평가모형에서 사용된 사회후생함수를 유형화하기 보다는 개별 사회후생함수의 특성을 살펴보는 데 중점을 두거나(Botzen and van den Bergh, 2014), 사회후생함수에 따른 기후정책의 영향을 이번 논문과는 다른 관점에서 분석했다(Stanton et al., 2008; Anthoff and Tol, 2010)는 점에서 이번 논문은 기존 논문들과 차별성을 갖는다. 마지막으로 4장에서는 결론을 제시하였다.

Ⅱ. 사회후생함수 비교분석

1. 분석대상

기후경제통합평가모형(Integrated assessment model of climate and the economy)은 "기후변화문제를 해결하기 위해 필요한 정책적 수단들을 평가하려는 목적으로 고안된 것으로 기후변화에 관한 과학적 측면과 경제적인 측면을 모두 포괄하는 통합모형(Kelly and Kolstad, 1999a: 3)"이라고 정의할 수 있다. 이처럼 기후경제통합평가모형은 기후변화문제에 관한 이해와 정책 결정을 돕기 위해 기후과학과 경제학 등 관련 학문의 학제 간 (interdisciplinary) 통합 연구를 시도하는 모형이다. 이번 연구에서 살펴볼 기후경제통합지역평가모형(Regional integrated assessment model of climate and the economy)은 기후경제통합평가모형을 지역별로 세분한 것이다.

현재 국제적으로 개발되어 활용되고 있는 기후경제통합-지역평가모형에는 다음 표와 같은 것들이 있다. 이중 이 논문에서는 연구목적상 사회후생함수 최대화에 해당하는 모형을 중심으로 분석하되 비교를 위해 시뮬레이션 모형 중 PAGE 모형(Hope, 2011)을 추가로 살펴보았다.

구분	기후경제통합-지역평가모형		
사회후생함수 최대화	RICE, FUND, WITCH, MERGE, CETA-M, GRAPE, AIM/Dynamic, CRED, AD-RICE		
일반균형	IGS/EPPA, SMG, WORLDSCAN, ABARE-GTEM, G-CUBED/MSG3, MS-MRT, AIM, IMACLIM-R, WIAGEM		
부분균형	MiniCAM, GIM		
시뮬레이션	PAGE, ICAM-3, E3MG, GIM		
비용최소화	DNE21+, MESSAGE-MACRO		

〈표 1〉기후경제통합-지역평가모형 구분

Stanton et al. (2008) 역시 기후경제통합평가모형에 대한 비교연구를 수행한 바 있다. Stanton et al. (2008)은 지역 구분과 상관없이 모형별 구조, 불확실성, 형평성, 기술변화와 감축비용 등 4가지를 중점적으로 살펴본 데 반해, 이번 논문에서는 사회후생함수가지역별 기후변화정책에 미치는 영향을 중점적으로 살펴본다는 점에서 차이가 있다. 또한 이번 연구에서는 Stanton et al. (2008)의 연구에서는 다루지 않았던 WITCH 모형 (Bosello and de Cian, 2014), CRED 모형(Ackerman et al., 2013a), AD-RICE 모형(de Bruin, 2014)에 대한 분석도 추가했다. 다른 모형들에 대해서도 Stanton et al. (2008) 연구 이후 갱신된 모형별 최신 내용들을 다루었다.

2. 사회후생함수 유형화

1) 사회후생함수 구성요소

사회후생함수는 개별 효용함수(utility function)를 시간, 공간(지역), 의사결정자, 확률변수의 상태(state of the world) 등에 따라 모두 합산한 값을 의미한다.6) 이때 사회후생함수와 관련하여 결정해야 할 요소들에는 효용함수 형태, 사회후생함수 형태, 사회적선호(preference) 체계가, 후생함수 합산방식 등이 있다. 사회후생함수의 구체적인 함수

주: Stanton et al. (2008)의 분류를 따르되 다른 모형으로 변형되거나 새롭게 발표된 모형은 추가하였다.

⁶⁾ 물론 합리성과 민주적 의사결정을 모두 만족하는 사회후생함수가 존재하는가에 대해서는 부정적이다 (Arrow, 1954). 그러나 모든 기후경제통합평가모형에서는 사회적 의사결정이 필요하고 또 실제로 이뤄지고 있다는 점에서 사회후생함수의 존재를 가정하고 출발하는 경제학의 실용적 접근법을 받아들이고 있다.

⁷⁾ 선호체계에는 할인율(discount rate), 한계효용 탄성치(elasticity of marginal utility), 리스크에 대한 태

식은 유형별로 달라질 수 있기 때문에 이하에서는 먼저 사회후생함수의 구성요소를 살펴보았다. 구체적인 함수식은 다음 소절부터 살펴볼 수 있다.

개별 효용함수는 시장에서 거래되지 않은 것들을 포함하여 재화나 용역의 소비를 통해 얻게 되는 개인이나 집단의 효용 또는 만족도를 나타내는 지표로서 기후경제통합-지역평가모형에서는 대체로 다음과 같은 CRRA(constant relative risk aversion) 효용함수를 사용하고 있다.

$$U(C) = C^{1-\eta}/(1-\eta) \tag{1}$$

여기서 C>0는 소비, U는 효용함수이며, η 는 한계효용 탄성치(elasticity of marginal utility)를 의미한다. 이때 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서 η 는 $1\sim2$ 의 범위에서 선정된다.8)

예외적으로 Hwang et al. (2016)은 CRRA 함수를 일반화한 HARA(harmonic absolute risk aversion) 효용함수를 사용했으며, Sterner and Persson (2008)과 Ackerman et al. (2013b)은 CES(constant elasticity of substitution) 효용함수를 사용했다. 비시장 재화나용역의 소비를 명시적으로 포함한 형태의 CES 효용함수는 다음 식과 같다.

$$U(C) = \lceil (1-\theta)C^{1-1/\sigma} + \theta E^{1-1/\sigma} \rceil^{(1-\eta)\sigma/(\sigma-1)} / (1-\eta)$$
(2)

여기서 E>0는 비시장 재화나 용역의 소비, σ 는 대체 탄성치(elasticity of substitution), θ 는 비시장 재화나 용역의 비율을 의미한다.

Ackerman et al. (2013b)은 또한 Epstein and Zin (1989)이 제안한 다음과 같은 효용함 수를 DICE 모형에 적용한 바 있다.

$$U_t = \left[(1 - r) C_t^{\rho} + r \left(\varepsilon_t U_{t+1}^{\eta} \right)^{\rho/\eta} \right]^{1/\rho} \tag{3}$$

도(risk aversion), 불평등에 대한 태도(inequality aversion), 지속가능성(sustainability)에 대한 태도 등이 포함된다.

^{8) &}lt;식 1~2>에서 η=1일 때 효용함수는 로그함수가 된다.

여기에서 t는 시간, r은 할인율 인자(discount factor), $\eta \neq 0$ 는 리스크에 대한 태도, $\rho \neq 0$ 는 대체 탄성치의 함수(ρ =(σ -1)/ σ)를 의미한다.

Epstein-Zin 효용함수는 기대효용이론 효용함수와 달리 시간에 대한 선호와 리스크에 대한 선호가 미치는 영향을 분리해서 살펴볼 수 있으며, $\eta=\rho$ 인 경우 기대효용이론 효용함수와 같아진다는 점에서 기대효용이론 효용함수를 일반화한 것이라고 할 수 있다 (Epstein and Zin, 1991).

기후경제통합-지역평가모형에서 현재까지 사용된 지역별 사회후생함수는 다음 표와 같이 할인율을 적용한 공리주의(discounted utilitarianism) 함수가 유일하다.

〈표 2〉 기후경제통합-지역평가모형 사회후생함수

구분	지역별 사회후생함수	효용 할인율	지역별 후생함수 합산 가중치
RICE	할인율을 적용한 공리주의	고정 1.5%/년	Negishi 가중치
FUND	할인율을 적용한 공리주의	고정 1%/년	공리주의 가중치
WITCH	할인율을 적용한 공리주의	변동(3%/년 시작, 0.25%/년 속도로 감소)	없음(Nash 균형)
MERGE	할인율을 적용한 공리주의	변동(지역별 자본수익률 5%/년 고정)	Negishi 기중치
CETA-M	할인율을 적용한 공리주의	변동(지역별 자본수익률 5%/년 고정)	Negishi 가중치
GRAPE	할인율을 적용한 공리주의	고정 2%/년	공리주의 가중치
AIM/Dynamic	할인율을 적용한 공리주의	고정 5%/년	Negishi 가중치
CRED	할인율을 적용한 공리주의	고정 0.1%/년 또는 1.5%/년	공리주의 가중치
AD-RICE	할인율을 적용한 공리주의	고정 1.5%/년	Negishi 가중치
PAGE	없음(시뮬레이션)	고정 0.1%/년, 1%/년, 2%/년	없음(시뮬레이션)

주: 모형 개발자들이 공개한 것으로 모형별 최신 버전을 기준으로 작성한 것이다. 보다 자세한 내용은 다음의 문헌들에서 살펴볼 수 있다. RICE(Nordhaus, 2010), FUND(Anthoff and Tol, 2014a), MERGE(Manne and Richels, 2005), WITCH(Bosello and de Cian, 2014), CETA-M(Peck and Teisberg, 1999), GRAPE(Kurosawa, 2004), AIM/Dynamic(Masui et al., 2006), CRED(Ackerman et al., 2013a), AD-RICE(de Bruin, 2014), PAGE(Hope, 2011).

효용 할인율(또는 시간선호율)은 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서 고정할 인율로 연 1~2%를 적용하고 있으나, 일부 모형에서는 스턴보고서에서 사용한 낮은 할 인율(연 0.1%)을 사용자가 선택할 수 있도록 하고 있다. 또한 MERGE나 CETA-M 모형에서는 자본수익률을 매년 5%로 고정하는데, 이를 위해 효용 할인율이 모형 내부에서 때 시기 조정되도록 하고 있다. 의 AD-RICE와 WITCH 모형은 99년 버전 RICE 모형 (Nordhaus and Boyer, 2000)의 할인율 방식을 적용하는데, 이들 모형에서 할인율은 초기 연 3%에서 시작하여 매년 일정 비율로 감소한다. 이처럼 시간에 따라 감소하는 변동할인율은 이론적인 측면에서 최근 주목받고 있을 뿐 아니라 영국 등 일부 국가에서는 실제로 변동할인율을 적용하고 있다(Arrow et al., 2013).

PAGE 모형은 사회후생함수를 정의하지 않는 시뮬레이션 기법을 적용하고 있다. 이때 기후변화와 관련한 전 세계 총 비용은 지역별 비용을 Anthoff et al. (2009)이 제안한형평성 가중치(equity weights)를 사용해 합산하는데, 이 과정에서 사용하는 효용 할인율을 위표에 제시하였다. 형평성 가중치는 사회후생함수가 아닌 피해비용함수에 반영하는 것으로 개별국가의 소득수준을 반영해 기후변화 피해비용을 조정하는 방식이다. 이는 동일한 금액의 손실이라도 가난한 자에게 주어지는 손실이 부유한 자에게 주어지는 손실보다 더 큰 후생의 감소를 가져올 수 있기 때문이다. 실제로 FUND 모형과 PAGE 모형에서는 이러한 방식을 형평성을 고려하는 하나의 방안으로 사용하고 있으며 구체적인 산출 식은 다음과 같다.

$$D_W = \sum_{j} \left(\frac{\overline{C}}{C_j}\right)^{\eta} D_j \tag{4}$$

여기서 C_j 는 개별 국가(j)의 소비, \overline{C} 는 전 세계 평균 소비, D_j 는 j 국가의 피해비용, D_W 는 전 세계 총 피해비용, η 는 한계효용 탄성치를 의미하며, $(\overline{C}/C_j)^\eta$ 는 j 국가의 형평성 가중치이다.

지역구분이 없는 기후경제통합모형의 응용 연구까지 범위를 확장해 보면 기후경제통

⁹⁾ 소비나 비용 등 화폐로 표현되는 것에 대한 할인율은 Ramsey 공식에 따라 효용 할인율(시간선호율), 경제성장률, 한계효용 탄성치 등에 따라 결정된다(Ramsey, 1928).

합모형에 활용된 바 있는 사회후생함수는 총 11가지이다(Botzen and van den Bergh, 2014). 참고로 Chichilnisky (2009)는 기존 사회후생함수 8개와 자신의 사회후생함수 (Chichilnisky, 1996)를 비교하였으며, Botzen and van den Bergh (2014)는 현재까지 발표된 주요 사회후생함수 14가지를 제시하였다. 이번 연구에서는 보다 광범위하게 사회후생함수를 분류한 Botzen and van den Bergh (2014)의 구분을 기준으로 기후경제통합모형에 활용된 바 있는 사회후생함수를 중점적으로 살펴보았다. 이들은 다음 소절에 제시한 바와 같이 지속가능성과 관련한 형태, 형평성과 관련한 형태, 불확실성과 관련한 형태 등으로 일반화할 수 있다.

〈표 3〉 사회후생함수 분류

Chichilnisky (2009)	Botzen and van den Bergh (2014)	이번 연구
Discounted utilitarianism	Discounted utilitarianism	Discounted utilitarianism
Chichilnisky	Chichilnisky	Chichilnisky
Green golden rule	Green golden rule	Green golden rule
Ramsey	Classical utilitarianism	Classical utilitarianism
Overtaking criterion	Sustainable discounted utilitarianism	Sustainable discounted
Lim inf	Inequity aversion	utilitarianism
Long-run averages	Epstein-Zin utility	Inequity aversion
Rawlsian rules	Prospect theory	Epstein-Zin utility
Basic needs	Ambiguity aversion	Ambiguity aversion
	Maximin	Maximin
	Minimax regret	Minimax regret
	Generalized maximin/maximax	Limited degree of confidence
	Limited degree of confidence	
	Safety first	

주: 개별 연구는 다음과 같은 목적을 갖고 수행되었다. Chichilnisky (2009)는 경제학에서 사용된 바 있는 대표적인 사회후생함수를 지속가능성의 관점에서 간략히 비교했으며, Botzen and van den Bergh (2014)는 사회후생함수의 특징을 분석하고 기후경제모형과의 관련성을 분석했다. 이번 연구는 기존연구와 달리 사회후생함수를 4가지로 유형화하고 유형별 특징을 분석하였다.

2) 지속가능성 관련 사회후생함수

지속가능성과 관련한 사회후생함수는 다음 식과 같이 일반화할 수 있다. 이 식은 Chichilnisky (1996)가 제시한 '지속가능한 선호(sustainable preference)' 사회후생함수 를 이번 연구에서 새롭게 일반화한 것이다. 구체적으로 Chichilnisky의 사회후생함수는 $0<\lambda<1$ 범위에서 정의되지만, 이번 연구에서는 0과 1을 포함한 형태($0\leq\lambda\leq1$)로 λ 의

범위를 수정하였다.

$$W(U) = (1 - \lambda) \sum_{g=1}^{\infty} r_g U_g + \lambda \Phi(U)$$
 (5)

가중치를 의미한다. 위 식에서 모든 g에 대해 $\mathbf{r_g}\!\!>\!\!0$ 이고 $\sum_{g=1}^\infty r_g U_g < \infty$ 이다.

위 식을 구성하는 개별 요소들의 값에 따라 지속가능성 관련 사회후생함수는 다음 표에 나타낸 바와 같이 여러 다양한 사회후생함수를 포함할 수 있다.

λ	r	사회후생함수	비고
	r<1	할인율을 적용한 공리주의	
λ=0	r=1 고전적 공리주의		
	0≤r≤1	지속가능한 할인율을 적용한 공리주의	<식 6> 적용
λ=1	0≤r≤1	녹색황금률	
0<λ<1	0≤r≤1	지속가능한 선호	

〈표 4〉 지속가능성 관련 사회후생함수 분류

먼저 <식 5>에서 λ =0이면서 모든 세대에 대해 r_g <1일 경우 현재 대부분의 기후경제 통합-지역평가모형에서 사용하고 있는 '할인율을 적용한 공리주의(discounted utilitarianism)' 사회후생함수가 된다. Chichilnisky (1996)의 정의상 이 사회후생함수는 미래의 지속가능성은 고려하지 않고(λ =0) 미래 세대의 효용은 할인하여 합산한다 $(r_g$ <1). λ =0일 경우에는 미래 세대가 생존하지 않는 경우(예를 들어, $\Phi(U) \rightarrow -\infty$)에도 사회후생함수는 정의될 수 있기 때문이다.

 λ =0이면서 모든 세대에 대해 r_g =1일 경우 '고전적 공리주의(classical utilitarianism)' 사회후생합수가 된다. '고전적 공리주의' 사회후생합수에서도 '할인율을 적용한 공리

주: 정의상 $0 \le \lambda \le 1$, $0 \le r \le 1$ 이기 때문에 위의 분류는 가능한 모든 범위를 포함한다.

주의' 사회후생함수와 마찬가지로 미래의 지속가능성을 고려하지 않지만(λ =0), '고전적 공리주의' 사회후생함수에서는 미래 세대의 효용이 현 세대의 효용과 동일한 가치를 가진다(r_g =1). '고전적 공리주의' 사회후생함수와 '할인율을 적용한 공리주의' 사회후생함수의 이러한 차이점은 Stern 보고서를 둘러싼 논쟁(Tol and Yohe, 2006; Weitzman, 2007; Stern, 2008)에서도 잘 드러나듯이 최근 기후변화경제학의 핵심 연구주제 중 하나이다.

λ=0이면서 아래 식과 같은 조건을 만족하면 Asheim and Mitra (2010)가 제시한 '지속 가능한 할인율을 적용한 공리주의(sustainable discounted utilitarianism)' 사회후생함수가 된다.

$$\begin{split} r_{g_2} &= 1 \; (\text{i f } C_{g_2} < C_{g_1}) \\ r_{g_2} &< 1 \; (\text{i f } C_{g_2} \ge C_{g_1}) \end{split} \tag{6}$$

여기에서 g1은 현재 세대 g2는 미래 세대를 의미한다.

위식이 의미하는 바는 미래의 소득이 현재보다 높을 경우에는 '할인율을 적용한 공리주의 사회후생함수'를 적용하지만, 반대로 미래의 소득이 현재보다 낮을 경우에는 '고 전적 공리주의 사회후생함수'를 적용한다는 것이다. 다시 말해 '지속가능한 할인율을 적용한 공리주의 사회후생함수'에서는 미래의 지속가능성은 고려하지 않고(λ =0) 미래 세대의 효용은 할인하여 합산하되, 현재보다 미래 세대가 가난할 경우에는 예외적으로 미래 세대의 효용을 할인하지 않고 합산한다.

λ=1일 때 <식 5>는 Chichilnisky et al. (1995)이 제안한 '녹색황금률(green golden rule)' 사회후생함수가 된다. 이 사회후생함수에서는 현 세대의 효용은 고려하지 않고(λ=1) 미래의 지속가능성만을 고려한다. 다시 말해 '녹색황금률' 사회후생함수에서는 미래 생존가능성이 확보되는 한 할인율은 사회후생에 영향을 미치지 않는다.

마지막으로 0<λ<1일 경우 <식 5>는 Chichilnisky가 제안한 '지속가능한 선호' 사회 후생함수가 된다. 이 사회후생함수에서는 현 세대의 효용과 미래의 지속가능성을 동시에 고려한다. Chichilnisky (1996)는 '지속가능한 선호' 사회후생함수가 수학적으로 잘 정의된다는 점을 증명하였지만 경험적인 측면에서 모수를 추정하는 작업은 한계점으로

지적되고 있다(Tol, 1999; Chichilnisky, 2009).

<표 2>에서 제시한 바와 같이 현재 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서는 '할 인율을 적용한 공리주의' 사회후생함수를 적용하고 있으며, 지역구분이 없는 기후경제 모형들도 대부분 할인율을 적용한 공리주의 사회후생함수를 적용하고 있다(Cline, 1992; Nordhaus, 2013). 다른 사회후생함수를 적용하는 것은 대부분 응용연구의 차원에서 수행되고 있다. 구체적으로 '고전적 공리주의' 사회후생함수를 적용한 연구는 FUND 모형을 활용한 Tol (1999)의 연구가 있으며, '지속가능한 할인율을 적용한 공리주의' 사회후생함수를 사용한 사례는 DICE 모형을 활용한 Dietz and Asheim (2012)이 있다. 아직까지 기후경제모형과 관련하여 '녹색황금률' 사회후생함수와 '지속가능한 선호' 사회후생함수를 적용한 연구는 없다.

3) 형평성 관련 사회후생함수

형평성과 관련하여 사회후생함수를 일반화하면 다음 식과 같다. 기후경제통합-지역 평가모형에서 협력게임의 결과를 얻기 위해서는 전 지구 사회후생함수를 도출할 필요 가 있는데 이 식은 이러한 도출 과정을 일반화한 것이라고도 할 수 있다. 이 식은 Tol (2001)이 제안한 '불평등 회비(inequality aversion)' 사회후생함수를 이번 연구에서 새롭게 일반화한 것으로, Tol (2001)의 사회후생함수에서는 아래 식에서 가중치 항목(ω_i)이 없다.

$$W_{global} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N} \omega_j \frac{W_j^{1-\phi}}{1-\phi} & \text{if } \phi \neq 1 \\ \prod_{j=1}^{N} \omega_j W_j & \text{if } \phi = 1 \end{bmatrix}$$
 (7)

여기서 j는 개별 국가 또는 지역, W_j 는 지역별 사회후생함수, ϕ 는 불평등에 대한 태도 (inequality aversion), $\omega \ge 0$ 는 가중치를 의미한다(단, ω_j 가 모두 0일 수는 없다). 이 식에서 ϕ 가 커질수록 불평등을 회피하려는 경향이 더 커진다. 이는 ϕ 가 <식 1>에서 살펴본 바 있는 CRRA 효용함수에서 한계효용 탄성치가 하는 역할과 유사하게 함수의 곡률 (curvature)을 결정하는 역할을 한다는 점에서 확인할 수 있다.

위 식을 구성하는 개별 요소들의 값에 따라 형평성 관련 사회후생함수는 다음 표에 나타낸 바와 같이 여러 다양한 사회후생함수를 포함할 수 있다.

구분	$\omega_{\rm j}$	φ	비고
Tol 유형		φ≥0	
공리주의 가중치 유형	ω _j =1	φ=0	
Bernoulli-Nash 유형		φ=1	
Maximin approach		φ↑∞	
Maximax approach		φ↓∞	
비공리주의 가중치 유형*	$0 \le \omega_j < 1$	φ=0	
기타		φ≠0	ω _j =1인 경우와 유사하게 분류가능

〈표 5〉형평성 관련 사회후생함수

먼저 위 식에서 모든 j에 대해 ω_j =1이면 Tol (2001)이 제안한 '불평등 회피' 사회후생 함수가 되는데, 불평등을 싫어하는 정도에 따라 다양한 형태의 사회후생함수가 도출된다. 예를 들어 φ =0이면 위 식은 개별 지역의 사회후생함수를 단순 합산한 형태가 되고 (<표 2>에서 제시한 공리주의 가중치 유형), φ =1이면 개별 지역의 사회후생함수를 곱한 형태인 Bernoulli-Nash 유형의 사회후생함수가 된다(Tol, 2001). φ 가 양의 방향으로 무한히 커지면 $W_{global} = \min(W_j)$ 가 되는데 이는 가장 가난한 자의 후생을 최우선으로 고려하는 Rawls (1974)의 사회후생함수(maximin approach)가 된다. 반대로 φ 가 음의 방향으로 무한히 커지면 $W_{global} = \max(W_j)$ 가 되어 가장 부유한 자의 후생을 최우선으로 고려하는 사회후생함수가 된다(maximax approach).

한편 $\omega_j \neq 1$ 이면서 ϕ =0인 경우 전 지구 사회후생함수는 가중치를 이용한 지역별 사회후생함수의 합산이라고 할 수 있는데, 경제학에서는 일반적으로 Negishi (1960) 가중치를 사용하고 있다.

마지막으로 $\omega_j \neq 1$ 이면서 $\varphi \neq 0$ 인 경우에는 $\omega_j = 1$ 이면서 $\varphi \neq 0$ 인 경우와 유사하지만 가중치가 부여된다는 점에서 다르다.

주: 정의상 $0 \le \omega_j \le 1$ 이기 때문에 위의 분류는 가능한 모든 범위를 포함한다. * 비공리주의 가중치 유형은 Negishi process를 포함하여 지역별로 다른 가중치를 적용하는 경우를 통칭한다.

할인율 및 지속가능성을 둘러싼 논쟁만큼이나 형평성을 둘러싼 논의는 기후변화경제 학에서 꾸준히 제기되어온 문제이다. 이를 반영하듯이 현재 기후경제통합평가모형에서 는 연구자의 관심에 따라 다양한 형태의 형평성관련 사회후생함수가 적용되어 왔다. 우선 Negishi 가중치를 이용한 사회후생함수는 RICE, MERGE, CETA-M, AIM/Dynamic, AD-RICE 모형 등에서 적용되었으며, 개별 지역의 후생을 단순 합산하는 형태(ω_j =1, φ =0)의 사회후생함수는 CRED, GRAPE, FUND 모형에서 적용되었다. 대체로 Negishi 가중 치를 적용하는 모형들은 경제적 효율성을 강조하는 반면, 단순합산 가중치를 적용하는 경우는 형평성을 고려하는 것이라고 할 수 있다. 한편 Bernoulli-Nash 유형의 사회후생함수(ω_j =1, φ =1)는 Tol (2001)이 비교를 위한 목적으로 적용한 바 있으며, Maximin 사회후생함수(ω_j =1, φ \uparrow ∞)는 Roemer (2011)가 적용했다. 아직 Maximax 사회후생함수(ω_j =1, φ \downarrow ∞)를 기후경제통합평가모형에 적용한 연구는 없다.

4) 불확실성 관련 사회후생함수

자연이나 사회경제 현상에 대한 이해가 부족하여 모형에 입력되는 모수 값이 확률분 포 형태로 주어지거나(parametric uncertainty) 어떤 변수 값이 무작위적으로 변동하여 정확한 예측이 불가능할 경우(stochasticity) 모수나 확률변수가 취하는 값에 따라 모형의 산출 결과는 크게 달라진다. 이러한 불확실성을 분석하기 위해 경제학에서는 일반적으로 기대효용이론(von Neumann and Morgenstern, 1944)을 사용해왔다. 기대효용이론에 근거한 사회후생함수는 다음 식과 같이 일어날 수 있는 모든 경우를 고려하되 개별경우에 발생하는 사회후생(\mathbf{W}_s)의 기댓값(혹은 평균)을 사회후생함수로 선택하는 방식이다.

$$W = \varepsilon \left[W_s \right] = \sum_{s=1}^{S} p_s W_s \tag{8}$$

여기에서 $\mathbf{s}(=1,2,\cdots,\mathbf{S})$ 는 모수 또는 확률 변수가 취할 수 있는 상태(state of the world), p_s 는 \mathbf{s} 가 취할 수 있는 확률을 의미한다. 이때 모든 \mathbf{s} 에 대해 $\mathbf{0} \le \mathbf{p} \le 1$ 이며 $\sum_{s=1}^S p_s = 1$ 이다. \mathbf{e} 는 기댓값을 산출하는 연산자이며 변수가 취할 수 있는 상태가 연속적일 경우 합기

호(Σ) 대신 적분기호(\int)를 사용한다. 이때 확률변수가 취하는 확률이 p_s =1 (s=s') 이고 p_s =0 (otherwise) 이면 '결정론적' 사회후생함수가 된다.

DICE, FUND, PAGE 등 현재 개발되어 활용되고 있는 대부분의 기후경제모형에서 불확실성은 위와 같은 방법으로 고려되고 있다.

한편, Allais 역설에서 잘 드러나듯이 기대효용이론이 실제 사람들의 선택을 잘 설명하지 못하는 경우가 더러 있는데 경제학에서는 이를 해결할 수 있는 대안적인 정책결정이론들이 꾸준히 제기되어 왔다.¹⁰⁾ 이중 이하에서는 기후경제통합모형에 적용되었던사례를 중심으로 대표적인 사회후생함수를 살펴보았다.

Millner et al. (2013)은 Klibanoff et al. (2005)이 제안한 다음과 같은 '모호성 회피 (ambiguity aversion)' 사회후생함수를 DICE 모형에 적용한 바 있다.

$$W(f) = \int_{\Delta} \phi \left[\int_{S} U(f) d\pi \right] d\theta \tag{9}$$

여기서 S와 Δ 는 모형의 변수가 취할 수 있는 공간(state space), π 는 S에 대한 확률분포 (distribution function), f와 ϕ 는 실수 값을 갖는 함수(real-valued function), θ 는 의사결 정자가 갖고 있는 Δ 에 대한 사전 지식(또는 확률분포)(subjective prior distribution)을 의 미한다.

'모호성 회피' 사회후생함수가 의미하는 바는 기대효용이론에서 가정하는 것과 달리 의사결정자는 불확실한 변수에 대해 정확하고 객관적인 지식을 갖고 있지 않을 수 있다는 점이다. 예를 들어 2100년의 지구평균기온이 불확실하여 a(예를 들어 2.5℃)와 b(예를 들어 1.0℃)를 각각 평균과 표준편차로 갖는 확률분포 형태로 전망된다고 하자. 만일 의사결정자가 확률분포의 모수(parameter)인 a와 b를 정확히 알고 있다면 우리는 기대효용이론에 따른 사회후생함수를 적용할 수 있다. 그러나 a와 b에 대한 의사결정자의 지식이 정확하지 않다면(예를 들어, a와 b 역시 불확실하여 별도의 확률분포를 갖는 경우) 기대효용이론에 따른 사회후생함수를 그대로 적용하기는 어렵게 된다.!!) '모호성 회피'

¹⁰⁾ Allais 역설을 포함하여 불확실성 하에서의 정책결정 이론에 관한 보다 자세한 내용은 Eeckhoudt et al. (2005)과 Bikhchandani et al. (2013) 등을 참고할 수 있다.

사회후생함수는 이러한 경우 의사결정자가 갖고 있는 사전 지식의 불확실성 역시 확률 분포로 표현하며 그것에 대한 기대 값을 한 번 더 계산하도록 하고 있다. 이때 사전지식 이 불확실한 정도에 대한 의사결정자의 태도를 모호성 회피라고 한다.

Anthoff and Tol (2014b)은 Savage (1951)의 다음과 같은 'Minimax regret' 사회후생 함수를 FUND 모형에 적용한 바 있다. 정의상 이 사회후생함수는 의사결정자가 가질 수 있는 최대의 후회(손실)를 최소화하는 정책을 선택하게 한다. 12)

$$W = Min_{s \in S} [Max_{z \in Z} L(z, s)]$$

$$L(z, s) = D(z, s) - D^*(z^*, s)$$

$$(10)$$

여기서 S와 Z는 각각 상태변수와 정책변수가 가질 수 있는 값들의 상태 공간(state space), * 는 최적 값을 의미한다. Min과 Max는 각각 최소 값과 최대 값을 찾는 연산자이다. L은 의사결정자가 갖는 손실을 표현하는 함수로서 주어진 상태 s에서 특정 정책 z를 선택할 경우 발생하는 비용 D(z,s)과 주어진 상태 s에서의 최소 비용 $D^*(z^*,s)$ 의 차이로 정의한다. 13)

Ⅲ. 수치모형 응용

1. RICE 모형

이번 장에서는 대표적인 기후경제통합-지역평가모형인 RICE(Regional Integrated model of Climate and the Economy) 모형을 활용하여 사회후생함수에 따른 기후 시스템의 변화와 그에 따른 기후변화정책을 살펴보았다. 이때 2장에서 살펴본 모든 유형의 사

¹¹⁾ Weitzman (2009)의 구조적 불확실성 또는 심층 불확실성(deep uncertainty)이 의미하는 바가 이러한 내용이다.

¹²⁾ 앞서 형평성을 고려한 사회후생함수에서 살펴보았던 Maximin 사회후생함수와 Maximax 사회후생함수도 <식 10>과 유사한 방식으로 사회후생함수를 정의한 것들이라고 할 수 있다.

¹³⁾ 다른 방식으로 사회후생함수를 정의한 다른 연구들에는 Kahneman and Tversky (1979)의 전망이론 (prospect theory), Quiggin (1982)의 서열의존 기대효용(rank-dependent expected utility) 이론 등이 있는데 아직까지 기후경제모형에 적용된 바는 없다.

회후생함수를 다 살펴보는 것은 어렵기 때문에 이 장에서는 모형 내에서 사회후생함수의 선택으로 표현되는 기후변화대응전략에 따른 산출결과를 살펴보았다.

RICE 모형은 전 지구 단일지역 모형인 DICE 모형(Nordhaus, 2013)을 지역별로 세분한 것으로 Nordhaus and Yang (1996)이 처음 개발한 이후 여러 차례 개정 작업을 거쳐현재 2010년 버전이 사용되고 있다(Nordhaus, 2010). DICE 모형과 마찬가지로 RICE 모형은 비교적 단순한 형태를 갖고 있어 확장성이 좋기 때문에 이후에 개발된 많은 기후경제통합-지역평가모형들의 기초모형이 되어 왔다.

2010년 버전 RICE 모형은 Excel 형태로 배포되고 있는데 연구자의 관심에 따라 모형을 다양하게 확장하기 위해서는 GAMS(General Algebraic Modeling System)와 같은 전문 프로그램 버전이 유용하다. GAMS 프로그램은 확장성이 뛰어날 뿐 아니라 프로그램에서 제공하는 전문적인 Solver를 활용할 수 있기 때문에 안정적이고 정확한 결과를 산출할 수 있다. 14) 따라서 이 논문에서는 2010년 버전 RICE 모형을 GAMS 프로그램으로 구축하고 2장에서 살펴본 사회후생함수를 적용해 결과를 산출하였다. GAMS 버전 RICE 모형의 결과는 원래 모형의 구축 결과(Nordhaus, 2010)와 비교하여 그 정확성을 확인하였다. 이 논문에서는 지역구분, 함수식, 모수 값 등과 관련하여 대부분 RICE 2010 모형의 기본 값을 그대로 사용하였으나, 연구 목적에 따라 시나리오별로 사회후생함수를 달리 적용하였다.

RICE 모형에서 표현하는 기본적인 이야기 구조는 다음과 같다. 물론 RICE 모형을 포함한 기후경제모형에서 아래에서 제시하는 이야기 구조는 모형의 가정에 따라 단순화되어 표현되기도 한다. 함수식과 모수 값 등에 대한 보다 자세한 내용은 <부록 1> 또는 Nordhaus (2010)을 참고할 수 있다.

생산, 소비, 투자 등을 통한 자본 축적으로 표현되는 경제성장은 이산화탄소를 비롯한 온실가스 배출과 그로 인한 온실효과라는 외부효과(externality)를 발생시킨다. 구체적 으로 대기 중으로 배출된 온실가스는 기후 시스템을 따라 해양과 생물권 등을 순환하며 지구에서 외부로 방출되는 적외선을 흡수하고 이를 지표면으로 방출하여 지구의 평균 기온을 상승시킨다. 이때 지구평균기온은 온실가스 농도에 대한 증가함수 형태로 표현

¹⁴⁾ GAMS 프로그램에 대한 보다 자세한 내용은 다음 웹페이지에서 찾아볼 수 있다(http://www.gams.com/).

되지만, 경제성장의 정도와 경제활동 과정에서 사용하는 에너지원의 종류와 양에 따라 외부효과의 크기는 달라진다.

지구평균기온의 상승은 여러 가지 사회-경제-환경적 영향을 일으킨다. 구체적으로 지구평균기온 상승으로 인해 해수면 상승과 이로 인한 연안 손실, 대규모 인구이동, 홍수로 인한 범람, 말라리아나 뎅기열(dengue fever)과 같은 질병의 확산, 열사병과 열파(heat wave)에 따른 사망, 냉방 에너지 수요 증가, 태풍, 폭우, 폭설, 가뭄과 같은 기상재해 및 그로 인한 인명피해와 기간시설 파괴, 농수산업, 임업, 관광업 등의 산업피해, 생물종의 손실 및 자연생태계 교란 등의 피해가 발생할 수 있다. 또한 그린란드(Greenland)와 극지방 빙하의 붕괴, 해양대순환(thermohaline circulation)의 변화, 시베리아 영구동토 (permafrost) 및 심해로부터의 메탄 대 방출 등과 같은 비연속적 재난(catastrophe)이 발생할 가능성도 있다. 이러한 기후변화로 인한 피해비용은 시장에서 거래될 수 있는 재화나 용역 등에 대한 피해로서의 시장(market) 피해비용과 생태계 서비스와 같이 시장에서 거래되지 않는 것들에 대한 피해로서의 비시장(nonmarket) 피해비용으로 구분할 수 있다.

이처럼 기후변화 피해가 발생할 것으로 예상되기 때문에 합리적인 의사결정자는 과학적 정보를 바탕으로 외부효과를 내부화하기 위한 정책을 수립하게 된다. 대표적으로 배출권거래제도, 탄소세, 에너지 정책(에너지 효율 향상 및 재생가능 에너지 개발 및 보급), 기후변화 적응정책 등이 이에 해당한다. 그러나 기후변화정책을 시행하는 데에도 비용이 발생하기 때문에 사회적으로는 이러한 기후변화정책 비용과 기후영향으로 인한 피해비용을 상호 비교함으로써 최적의 기후변화정책의 내용을 결정해야 한다. 이렇게 결정된 기후변화정책에 따라 경제활동의 내용도 조정된다. 이때 의사결정자는 비시장 재화를 포함하여 사회에서 생산하고 소비하는 재화와 용역의 양을 시·공간적으로 적절히 배분하여 사회적 후생(social welfare)을 최대화하는 것을 목표로 한다.

2. 기후변화대응전략

국가별 기후변화대응전략은 크게 협력전략, 비협력전략, 하이브리드 방식 등으로 구분할 수 있다. 15) 협력전략은 기후변화문제를 해결하기 위해 여러 국가가 공동으로 노력

하는 것을 의미한다. 이 경우 기후경제통합-지역평가모형에서는 합리적이고 절대적인 의사결정자(현실적으로는 UN과 같은 의사결정기구)가 존재하여 전세계 사회후생함수를 최대화하기 위한 온실가스 감축 총량을 정하고 이를 개별 국가에 배분한다고 가정한다. 비협력전략은 협력전략과 달리 상호협력이 아니라 개별 국가 수준에서만 기후변화문제를 대응해 가는 것을 의미한다. 따라서 비협력전략을 적용하는 기후경제통합-지역평가모형에서는 개별국가가 자신들의 사회후생을 최대화하는 방식으로 개별 온실가스감축량을 결정한다고 가정한다. 하이브리드 방식은 기후변화문제와 관련하여 일부 국가들은 연합(coalition)을 형성하여 협력하고 연합에 속하지 않은 국가들과는 비협력적인 방식으로 대응해가는 방식을 의미한다. 국제 기후변화협상을 어떻게 바라보느냐에따라 3가지 전략모두 의미 있는 설명이 될 수 있다. 국제 기후변화협상이 실패할 경우 개별국가들은 비협력전략 또는 하이브리드 방식으로 선회할 가능성이 높다는 점에서 비협력전략의 함의를 분석해 보는 것도 필요하지만, 비협력게임에서의 국가별 전략에 따른 최적 기후변화정책에 대한 연구는 게임이론을 활용한 다른 접근법이 필요하기 때문에 이 논문에서는 협력게임을 중심으로 살펴보았다.16

협력전략에서 전 세계 사회후생함수는 개별국가의 사회후생을 인수(argument)로 하는 함수형태로 나타낼 수 있다. 이때 합산방식에서 가중치를 적용하는 방식에 따라 형평성 문제가 제기될 수 있다(Stanton, 2011; Abbott and Fenichel, 2014). 2장에서 살펴보았듯이 현재 기후경제통합-지역평가모형에서 주로 활용하고 있는 가중치는 공리주의 가중치와 Negishi 가중치이다. 공리주의 가중치는 국가별로 가중치를 모두 동일하게 적용하는 방식이고 Negishi 가중치는 자본 잠재가격(shadow price)의 역수를 국가별 가중치로 적용하는 방식이다. 두 방식 모두 장단점이 있어 현재 기후경제통합-지역평가모형에서는 대체로 연구자의 관점에 따라 두 가지 방식 중 하나를 선택하고 있다.

공리주의 가중치는 국가별로 동일한 가중치를 적용한다는 점에서 공정하다고 할 수 있지만, 이 경우 모형에서 전 세계 사회후생(곧 개별 국가 사회후생함수의 합)을 최대화 하는 과정에서 고소득국가에서 저소득국가로의 큰 폭의 자본 이동이 급격하게 발생할

¹⁵⁾ 물론 기후변화대응전략에 대해 아직까지 정형화된 분류방식이 존재하는 것은 아니기 때문에 아래의 분류는 여러 가능한 방식 중 하나라고 이해해야 한다.

¹⁶⁾ 비협력게임과 관련한 선행연구로는 Kim (2004), Yang (2008), Anthoff and Tol (2010) 등이 있다.

수 있다. 이는 효용함수의 정의상 단위 소득이 유발하는 효용(만족도)이 가난한 국가들에서 더 높기 때문이다. 다시 말해 한계효용체감의 법칙에 따라 저소득국가에서 소득이한 단위 높아지는 것이 고소득국가에서 소득이한 단위 높아지는 것보다 전 세계 총 사회후생을 증가시키는데 상대적으로 더 큰 기여를 한다. 그러나 고소득국가에서 저소득국가로의 대규모 빠른 자본 이동은 현실적이지 않다는 점에서 공리주의 가중치는 한계를 갖고 있다.

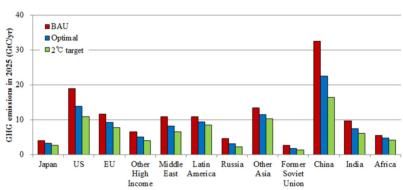
Negishi 가중치는 개별 국가들이 자신들의 예산 제약 내에서 최선의 선택을 하도록 한다는 측면에서 Walras 균형에 도달하게 하는 유일한 가중치이다(Negishi, 1960). 다시말해 Negishi 가중치는 현재의 경제적 여건을 반영한 경제적 균형점에 도달하도록 한다는 장점을 갖고 있다. 그러나 이를 기후변화 문제에 그대로 적용할 경우 저개발 국가의의무감축량이 상대적으로 높아진다는 문제점을 갖고 있다. 현재 대기 중에 존재하는 온실가스의 대부분은 역사적으로 고소득국가들에서 배출한 것이라는 점에서, Negishi 가중치를 적용하기 위해서는 형평성을 유지할 수 있는 방식(예를 들어 적절한 보상 또는기술이전)이 보완되어야 할 것이다.

3. 수치모형 결과

앞서 언급하였듯이 이번 절에서는 연구 목적상 RICE 모형의 응용 결과 중 기후변화 대응전략과 관련된 사회후생함수를 적용한 응용사례만을 제시하였다. 구체적으로 이하에서 제시되는 수치모형의 응용결과는 2장에서 살펴본 사회후생함수 유형 중 형평성 관련 사회후생함수와 관련된다. 지속가능성 및 불확실성과 관련한 내용은 현재 기후경제 통합평가모형에서 가장 많이 사용되고 있는 방식을 그대로 사용하였다. 구체적으로 지속가능성과 관련해서는 '할인율을 적용한 공리주의' 사회후생함수를 사용했으며, 불확실성과 관련해서는 '결정론적' 사회후생함수를 적용하였다. 효용함수는 RICE 기본모형과 마찬가지로 CRRA 효용함수를 사용했다. 다른 유형의 사회후생함수를 적용한 연구는 2장에서 기술하였듯이 기존 연구들에서 많이 다뤄진 바 있는 반면 형평성과 관련한 이번 소절과 같은 연구는 찾기 어렵다는 점에서 이번 소절의 연구는 자체로도 의미있는 결과라고 할 수 있다.

다음 그림은 2025년의 BAU 배출량, 최적 배출량(Optimal), 2[°]C 목표 달성 배출량

(2°C target)을 지역별로 나타낸 것이다.17) 그림에서 BAU 배출량에 비해 최적 배출량, 2°C 목표 달성 배출량이 모든 나라에서 큰 폭으로 낮아짐을 확인할 수 있다. 이때 BAU 배출량은 더 이상 온실가스 감축 노력이 없는 상태에서의 온실가스 배출량을 의미하며, 최적 배출량은 기후변화로 인한 피해비용과 온실가스 감축비용을 모두 고려했을 때의 최적 온실가스 배출량을 의미한다. 2°C 목표달성 배출량은 국제기후변화 협상이 목표로 하고 있는 지구평균기온 2°C 이내 상승을 달성하기 위한 온실가스 배출량을 의미한다. 참고로 이 절의 분석에서는 Negishi 가중치를 적용한 최적(Optimal) 시나리오를 기본 시나리오로 정하였기 때문에 공리주의 가중치 시나리오를 제외하면 이후 제시되는 모든 시나리오들에서는 지역별 사회후생함수 합산을 위해 Negishi 가중치를 적용하였다.

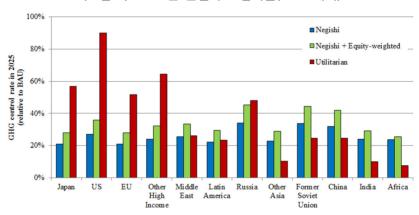


〈그림 1〉2025년 온실가스 배출량(Negishi 가중치 적용)

지역별 온실가스 감축률은 <그림 2>에서 나타난 바와 같이 사회후생함수의 선택에 따라 큰 폭으로 달라진다. 공리주의 방식을 적용할 경우 미국과 유럽연합, 일본 등 선진 국들이 큰 폭의 온실가스 감축(2025년 BAU 대비 50% 이상)을 감당해야 하지만, Negishi 가중치를 적용할 경우 저개발 국가들의 온실가스 감축량이 상대적으로 증가한 다. 형평성 가중치(Equity-weighted) 시나리오에서처럼 저소득국가에서 발생하는 기후 변화 피해비용에 대해 가중치를 부여할 경우(2장의 <식 4> 참고)에는 경제적 효율성만

¹⁷⁾ RICE 기본 모형은 2605년까지 10년 단위로 모형 결과 값을 산출한다. <그림 1>은 예시를 위해 2025년 값을 나타낸 것이다. 모형의 모수 값들을 조정하면 Hwang et al. (2014)에서와 같이 1년 단위로도결과 값을 산출할 수 있다.

을 고려할 경우보다(Negishi 시나리오) 모든 나라들에서 온실가스 감축량이 약 5~10%p 증가한다.



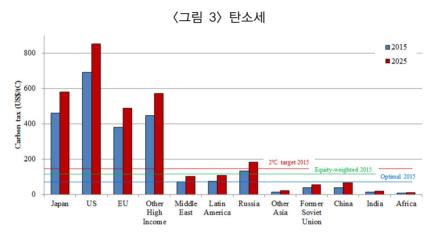
〈그림 2〉 2025년 온실가스 감축률(BAU 대비)

다음 그림에서 나타난 바와 같이 탄소세 역시 사회후생함수의 선택에 따라 큰 폭으로 달라진다. Negishi 가중치를 사용한 경우 이론적으로 모든 지역에 대해 탄소세는 동일하다. 가난한 지역의 기후변화 피해에 대해 가중치를 적용할 경우와 2℃ 목표 달성을 가정할 경우 각각 탄소세는 경제적 효율성만을 가정한 경우의 최적 탄소세에 비해 더 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 Negishi 가중치를 사용한 경우의 결과들은 DICE, PAGE, WITCH 등 기존 무현들의 연구결과와 크게 다르지 않다.18)

한편 공리주의 가중치를 적용할 경우 온실가스 감축과 마찬가지로 고소득국가들이 부담해야 할 탄소세는 상당히 높아지고 저소득 국가들이 부담해야 할 탄소세는 낮아짐을 확인할 수 있다. 기후경제통합-지역평가모형 중 CRED와 GRAPE 모형에서도 공리주의 가중치를 적용하고 있는데, 이들 모형은 <그림 3>에 대응하는 지역별 탄소세 등을 보고하지 않고 있어 이번 연구의 결과와 직접적인 비교가 불가능하다. 한편 FUND 모형을 사용한 Anthoff and Tol (2010)의 연구에서는 이번 연구에서처럼 국가별 탄소세를 제시하고 있지만, 그들의 연구는 비협력게임을 가정했다는 점에서 이번 연구의 결과와 직

¹⁸⁾ 물론 모형마다 함수식과 사용한 모수 값들이 다르기 때문에 직접적인 비교는 불가능하지만, 경제학에서 일반적으로 사용하는 범위 내에서 함수식과 모수 값을 선택한 경우 모형의 결과들은 정성적 의미에서 크게 다르지 않다.

접적인 비교가 어렵다. 다만 공리주의 가중치를 사용한 Anthoff and Tol (2010)의 연구에서도 유럽과 미국 등 고소득 국가들이 부담해야 할 탄소세가 상대적으로 높게 산출되었다는 점에서 이번 연구의 결과와 정성적인 측면에서는 유사하다고 할 수 있다. 물론 비협력게임의 연구결과이기 때문에 그들의 국가별 탄소세 결과 값은 정량적으로는 이번 연구의 결과 값보다 작았다.



주: 가로 실선은 각각 Negishi 가중치 적용 시 2015년의 탄소세를 시나리오별로 나타낸 것이다. 세로 막대 바는 공리주의 가중치 적용 시 2015년과 2025년의 탄소세를 나타낸 것이다.

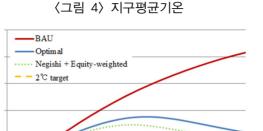
마지막으로 기후 시스템의 변화를 살펴보면, 지구평균기온은 BAU 시나리오에서는 지속적으로 증가하는 반면 다른 기후 정책 시나리오들에서는 2100년대 초반에 2~3℃ 까지 상승한 후 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 2℃ 목표 시나리오에서는 강화된 정책 노력에 의해 21세기 후반부터 22세기 중반 까지 지구평균기온이 2℃ 상승에서 유지될 것으로 전망된다. 해수면의 경우 모든 시나리오에서 지속적으로 높아지지만(지구평균기온과 해수면 상승의 반응시간 차이 때문), 해수면이 상승하는 속도는 정책 시나리오들에서 크게 낮음을 확인할 수 있다. 해수면 최고 상승 높이는 정책시나리오들에서 대체로 24세기 이후 약 1.6m로 전망된다.19)

¹⁹⁾ 기후경제통합-지역평가모형에서는 이 논문에서 제시한 것 외에도 국가(지역)별 기후변화 관련 비용변화, 경제성장 경로, 에너지원별 구성, R&D 및 기후변화 적응 투자의 성과, 온실가스 농도 등 다양한 요소들을 전망할 수 있다.

6

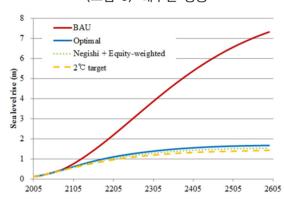
temperature increases (C)

Air 1



〈그림 5〉해수면 상승

2005 2025 2045 2065 2085 2105 2125 2145 2165 2185 2205



Ⅳ. 결 론

기후경제통합-지역평가모형은 기후변화 문제와 관련한 이해와 국가 수준에서의 정책결정을 돕기 위한 목적으로 기후과학과 경제학 등 기후변화 관련 다양한 학문의 학제간 연결을 시도하는 모형이다. 이러한 기후경제통합-지역평가모형은 국제 기후변화협상의 중요한 근거로 사용될 수 있으며, 배출권거래제도와 탄소세 등 국내 기후변화정책을 수립하는 데 있어서도 중요한 근거로 활용될 수 있다. 이를 반영하여 최근 학계뿐 아니라 IPCC, 미국 연방정부 등에서도 기후변화 정책을 수립하고 제안하는 데 있어 기후

경제통합-지역평가모형을 적극 활용하고 있다. 또한 현실적으로 국제 기후변화 협상이 이상적인 형태로 진행되기는 어렵다는 점을 감안한다면 개별국가의 전략을 반영할 수 있는 기후경제통합-지역평가모형이 더욱 필요하다고 할 수 있다.

이 논문에서는 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 첫 번째 단계 로서 사회후생함수를 중심으로 기후경제통합-지역평가모형을 유형화하고 RICE 모형 을 응용하여 국가(지역)별 기후변화대응전략에 따른 최적 기후변화정책을 실증적으로 살펴보았다. 이러한 내용들은 사회후생함수의 선택으로 대표되는 국가별 기후변화대응 전략에 따라 기후시스템과 개별국가의 최적 기후변화정책이 큰 폭으로 변할 수 있다는 것을 잘 보여준다.

국제 기후변화협상을 비롯하여 변화하는 국제 상황과 새롭게 드러나는 과학적 증거들에 대해 국내의 상황을 반영한 효과적인 기후변화정책을 수립하기 위해서는 이를 분석할 수 있는 도구를 갖추고 있어야 한다. 이번 연구는 이를 위한 유용한 출발점이 될 것이다. 20) 또한 실증 연구에서 사용한 수치모형은 게임이론을 활용한 국제 기후변화협상 모형을 개발하는 데 사용할 수 있으며, 더 나아가 한국을 독립된 지역으로 포함하는 기후 경제통합-지역평가모형을 구축하는 데 있어 기초 모형으로 활용될 수 있다.

[References]

- 강성원·김민준, "중장기 환경전망 및 대응전략- KEI 통합환경모형 연구", 한국환경정책· 평가연구원, 2014.
- 김용건·공성용·강성원·서영·이화랑·양유경·김홍균·이윤수·이강오·남준우·임종수· 김태영·정지은, "온실가스 감축정책 평가를 위한 환경경제모형 개발·운용", 한국환 경정책·평가연구원, 2014.
- 채여라·김용건·조광우·조현주·최성윤, "우리나라 기후변화의 경제학적 분석(III)", 환경부, 2012.
- 황인창, "기후경제통합-지역평가모형 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구", 한국

²⁰⁾ 구체적인 모형 개발 전략 등에 관해서는 황인창(2015)을 참고할 수 있다.

- 환경정책·평가연구원, 2015.
- Abbott, J. K. and E. P. Fenichel, "Following the golden rule: Negishi welfare weights without apology," *Unpublished manuscript*, 2014.
- Ackerman, F., E. A. Stanton, and R. Bueno, "CRED: A new model of climate and development," *Ecological Economics*, Vol. 85, Jan, 2013a, pp. 166~176.
- Ackerman, F., E. A. Stanton, and R. Bueno, "Epstein-Zin utility in DICE: Is risk aversion irrelevant to climate policy?," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 56, No. 1, 2013b, pp. 73~84.
- Anthoff, D., C. Hepburn, and R. S. J. Tol, "Equity weighting and the marginal damage costs of climate change," *Ecological Economics*, Vol. 68, No. 3, 2009, pp. 836~849.
- Anthoff, D. and R. S. J. Tol, "On international equity weights and national decision making on climate change," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 60, No. 1, 2010, pp. 14~20.
- Anthoff, D. and R. S. J. Tol, "The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), Technical Description, Version 3.9," 2014a.
- Anthoff, D. and R. S. J. Tol, "Climate policy under fat-tailed risk: An application of FUND," *Annals of Operations Research*, Vol. 220, No. 1, 2014b, pp. 223 ~ 237.
- Arrow, K. J., Social Choice and Individual Values, New York, Wiley, 1954.
- Arrow, K. J., M. Cropper, C. Gollier, B. Groom, G. M. Heal, R. G. Newell, W. D. Nordhaus, R. S. Pindyck, W. A. Pizer, P. Portney, T. Sterner, and R. S. J. Tol, "How should benefits and costs be discounted in an intergenerational context?," *University of Sussex Working Paper*, No. 56-2013, 2013.
- Asheim, G. B. and T. Mitra, "Sustainability and discounted utilitarianism in models of economic growth," Mathematical Social Science, Vol. 59, No. 2, 2010, pp. 148~169.
- Bikhchandani, S., J. Hirshleifer, and J. G. Riley, The Analytics of Uncertainty and Information, New York, Cambridge University Press, 2013.
- Bosello, F. and E. De Cian, "Documentation on the development of damage functions and adaptation in the WITCH model," CMCC Research Papers Issue, RP0228, 2014.
- Botzen, W. J. W. and J. C. J. M. van der Bergh, "Specifications of social welfare in economic studies of climate policy: Overview of criteria and related policy insights,"

- Environmental and Resource Economics, Vol. 58, No. 1, 2014, pp. 1~33.
- Chae, Y., S. Y. Bae, and J. E. Kim, "Estimating Climate Change Damage Using PAGE model," *Korea Environment Institute*, 2006.
- Chichilnisky, G., G. Heal, and A. Beltratti, "The green golden rule," *Economics Letters*, Vol. 49, No. 2, 1995, pp. 175~179.
- Chichilnisky, G., "An axiomatic approach to sustainable development," *Social Choice and Welfare*, Vol. 13, No. 2, 1996, pp. 231~257.
- Chichilnisky, G., "Avoiding extinction: Equal treatment of the present and the future," Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal, Vol. 3, 2009, pp. 1~25.
- Clarke, L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J. C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, and D. McCollum, "Assessing Transformation Pathways," In Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, pp. 413-510, Edenhofer, O. et al., eds., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2014.
- Clarkson, R. and K. Deyes, "Estimating the social cost of carbon emissions," *Government Economic Service Working Paper 140*, HM Treasury, 2002.
- Cline, W. R., "The Economics of Global Warming. Institute for International Economics," 1992.
- de Bruin, K. C., "Calibration of the AD-RICE 2012 model," Unpublished manuscript, 2014.
- Dietz, S. and G. B. Asheim, "Climate policy under sustainable discounted utilitarianism," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 63, No. 3, 2012, pp. 321 ~ 335.
- Eeckhoudt, L., C. Gollier, and H. Schlesinger, "Economic and Financial Decisions under Risk. Princeton," *Princeton University Press*, 2005.
- Epstein, L. G. and S. E. Zin, "Substitution, risk aversion, and the temporal behavior of consumption and asset returns: A theoretical framework," *Econometrica*, Vol. 57, No. 4, 1989, pp. 937~969.
- Epstein, L. G. and S. E. Zin, "Substitution, risk aversion, and the temporal behavior of consumption and asset returns: an empirical analysis," *Journal of Political Economy*,

- Vol. 99, No. 2, 1991, pp. 263 ~ 286.
- Hope, C., "The PAGE09 integrated assessment model: A technical description," *University of Cambridge Working Paper Series 4/2011*, 2011.
- Hwang, I. C., F. Reynes, and R. S. J. Tol, "Climate policy under fat-tailed risk: An application of DICE," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 56, No. 4, 2013, pp. 415~436.
- Hwang, I. C., R. S. J. Tol, and M. W. Hofkes, "The effect of learning on optimal climate policy," *MPRA Working paper No. 53681*, 2014.
- Hwang, I. C., R. S. J. Tol, and M. W. Hofkes, "Fat-tailed risk about climate change and climate policy," *Energy Policy*, Vol. 89, Feb, 2016. pp. 25~35.
- Hwang, I. C., "A recursive method for solving a climate-economy model: Value function iterations with logarithmic approximations," 2016 Korea's Allied Economic Associations Annual Meeting, 2016.
- IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
- IWGSCC, Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis- Under Executive Order 12866. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government, 2013.
- Kahneman, D. and A. Tversky, "Prospect theory: An analysis of decision under risk," *Econometrica*, Vol. 47, No. 2, 1979, pp. 263 ~ 291.
- Kelly, D. L. and C. D. Kolstad, "Integrated assessment models for climate change control," In Folmer, H. and Tietenberg, T., eds., International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues, Cheltenham, UK, Edward Elgar, 1999.
- Kim, Y. G., "A Game-theoretic Analysis on Negotiation Mechanisms for Climate Change Mitigation," Korea Environment Institute, 2004.
- Klibanoff, P., M. Marinacci, and S. Mukerji, "A smooth model of decision making under ambiguity," *Econometrica*, Vol. 73, No. 6, 2005, pp. 1849~1892.
- Kurosawa, A. "Carbon concentration target and technological choice," Energy Economics,

- Vol. 26, No. 4, 2004, pp. 675 ~ 684.
- Manne, A. S. and R. Richels, "MERGE: An integrated assessment model for global climate change," In Loulou, R. et al., eds., Energy and Environment, Springer US, 2005.
- Masui, T., T. Hanaoka, S. Hikita, and M. Kainuma, "Assessment of CO₂ reductions and economic impacts considering energy- saving investments," *The Energy Journal*, Vol. 27(Special issue), 2006, pp. 175~190.
- Millner, A., S. Dietz, and G. Heal, "Scientific ambiguity and climate policy," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 55, No. 1, 2013, pp. 21 ~ 46.
- Negishi, T., "Welfare economics and existence of an equilibrium for a competitive economy," *Metroeconomica*, Vol. 12, No. 2-3, 1960, pp. 92~97.
- Nordhaus, W. D., "Economic aspects of global warming in a post Copenhagen environment," Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 107, No. 26, 2010, pp. 11721 ~ 11726.
- Nordhaus, W. D., "The Climate Casino, New Haven," Yale University Press, 2013.
- Nordhaus, W. D. and Z. Yang, "A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies," *American Economic Review*, Vol. 86, No. 4, 1996, pp. 741 ~ 765.
- Nordhaus, W. D. and J. Boyer, "Warming the World: Economic Models of Global Warming, Cambridge," *MIT Press*, 2000.
- Pearce, D., "The social cost of carbon," In Helm, D., eds., Climate-change Policy, New York, Oxford University Press, 2005.
- Peck, S. C. and T. J. Teisberg, "CO₂ concentration limits, the costs and benefits of control, and the potential for international agreement," In Carraro, C., eds, International Environmental Agreements on Climate Change, Springer Netherlands, 1999.
- Quggin, J., "A theory of anticipated utility," *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol. 3, No. 4, 1982, pp. 323 ~ 343.
- Ramsey, F. P., "A mathematical theory of saving," *The Economic Journal*, Vol. 38, No. 152, 1928, pp. 543 ~ 559.
- Rawls, J., "Some reasons for the maximin criterion," *The American Economic Review*, Vol. 64, No. 2, 1974, pp. 141 ~ 146.

- Roemer, J. E., "The ethics of intertemporal distribution in a warming planet," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 48, No. 3, 2011, pp. 363 ~ 390.
- Savage, L. J. "The theory of statistical decision," *Journal of the American Stastical Association*, Vol. 46, No. 253, 1951, pp. 55~67.
- Stanton, E. A., F. Ackerman, and S. Kartha, "Inside the Integrated Assessment Models: Four Issues in Climate Economics," Stockholm Environment Institute Working Paper WP-US-0801, 2008.
- Stanton, E. A., "Negishi welfare weights in integrated assessment models: The mathematics of global inequality," *Climatic Change*, Vol. 107, No. 3-4, 2011, pp. 417~432.
- Stern, N. H., "Stern Review: The Economics of Climate Change," *London, HM treasury*, 2006.
- Stern, N. H., "The economics of climate change," *American Economic Review*, Vol. 98, No. 2, 2008, pp. 1~37.
- Sterner, T. and U. M. Persson, "An even sterner review: Introducing relative prices into the discounting debate," *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 2, No. 1, 2008, pp. 61~76.
- Tol, R. S. J., "Time discounting and optimal emission reduction: An application of FUND," *Climatic Change*, Vol. 41, No. 3-4, 1999, pp. 351 ~ 362.
- Tol, R. S. J., "Equitable cost-benefit analysis of climate change policies," *Ecological Economics*, Vol. 36, 2001, pp. 71~85.
- Tol, R. S. J. and G. W. Yohe, "A review of the Stern review," *World Economics*, Vol. 7, No. 4, 2006, pp. 233~250.
- Tol, R. S. J. "Targets for global climate policy: An overview," *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 37, No. 5, 2013, pp. 911~928.
- Tol, R. S. J., Climate Economics, Cheltenham, Edward Elgar, 2014.
- Von Neumann, J. and O. Morgenstern, "Theory of Games and Economic Behavior," *Princeton University Press*, 1944.
- Weitzman, M., "A review of the Stern review on the economics of climate change," Journal of Economic Literature, Vol. 45, No. 3, 2007, pp. 703~724.
- Weitzman, M., "On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate

- change," Review of Economics and Statistics, Vol. 91, No. 1, 2009, pp. 1~19.
- Weyant, J. P., B. Knopf, E. De Cian, I. Keppo, and D. P. van Vuuren, "Introduction to the EMF28 study on scenarios for transforming the European energy system," *Climate Change Economics*, Vol. 4, Supp01, 1302001, 2013.
- Wong, K. Y., "Evaluating Climate Change Taxation for Economic and Environmental Policy Purposes in Malaysia: Insights from the Enhanced PAGE09 Integrated Assessment Model," Ph. D. thesis, University of Cambridge, 2012.
- World Bank, World Development Indicators, 2015.
- Yang, Z., "Strategic Bargaining and Cooperation in Greenhouse Gas Mitigations," *Cambridge*, The MIT Press, 2008.

[부록 1] RICE 2010 모형 기본 식

RICE 2010년 모형의 기본 식은 다음과 같다. 외생함수, 모수(parameter) 값 등 보다 자세한 내용은 Nordhaus (2010)을 참고할 수 있다. 먼저 RICE 모형의 사회후생함수는 다음과 같다.

$$\max_{[\mu_{j,t},I_{j,t}]} W = \sum_{j=1}^J \sum_{t=0}^T w_{j,t} L_{j,t} \mathit{U} \big(\mathit{C}_{j,t}, L_{j,t} \big) R_t$$

여기서 W는 사회후생함수, L은 인구, I는 투자, C는 소비, U는 효용함수, R은 할인율 인자, μ는 온실가스 감축률을 의미한다. w는 지역별 가중치, j는 개별국가(J=12), t는 시 간(T=60 decades)을 의미한다. RICE 모형에서 효용함수는 CRRA 효용함수를 사용한다.

RICE 모형의 경제모듈은 신고전주의 경제성장 이론에 기초해 소비와 투자의 선택에 따른 자본축적 과정, 인구와 기술의 성장, 완전경쟁 체제에서 기업과 가정의 합리적 선택 등을 기본 가정으로 한다.

$$\begin{split} K_{j,t+1} &= (1-\delta)K_{j,t} + I_{j,t} = (1-\delta)K_{j,t} + Y_{j,t} - C_{j,t} \\ Y_{i,t} &= (1-\Lambda_{i,t})Q_{i,t}/(1+\Omega_{i,t}) \end{split}$$

여기서 K는 자본, Q는 총생산함수, Y는 기후변화 관련비용이 감안된 생산, A는 총요 소생산성(total factor productivity), δ 는 감가상각률(depreciation rate)을 의미하고, Ω 와 Λ 는 각각 다음과 같이 정의되는 기후변화 피해비용 함수와 온실가스 감축비용 함수를 나타낸다. RICE 모형에서 생산함수는 Cobb-Douglas 함수를 사용한다.

$$\begin{split} &\Omega_{j,t} = \Omega_{j,t}^{A\,T} + \Omega_{j,t}^{SLR} \\ &\Omega_{j,t}^{A\,T} = 1 + \beta_{1,j} T_{A\,T,t} + \beta_{2,j} T_{A\,T,t}^2 \\ &\Omega_{j,t}^{SLR} = 1 + \beta_{3,j} SLR_t + \beta_{4,j} SLR_t^2 \\ &\Lambda_{j,t} = \gamma_{1,j} \mu_{j,t} + \gamma_{2,j} \mu_{j,t}^{\gamma_{j,3}} \end{split}$$

여기서 $T_{AT,t}$ 는 지구대기 평균기온을 의미하며, $\Omega_{j,t}^{AT}$ 와 $\Omega_{j,t}^{SLR}$ 는 각각 기온상승과 해수면 상승에 따른 피해비용 함수를 나타낸다. β 와 γ 는 각각 기후변화 피해비용 함수와 온실가스 감축비용 함수의 모수로서 국가(지역)별로 추정된 값을 사용한다.

RICE 모형의 기후모듈은 다음과 같이 탄소순환 모형, 기온상승 모형, 해수면상승 모형 등으로 구성되어 있다.

$$\begin{split} M_{A\,T,t} &= \sum_{j}^{J} E_{j,t} + \zeta_{11} M_{A\,T,t-1} + \zeta_{21} M_{UP,t-1} \\ M_{UP,t} &= \zeta_{12} M_{A\,T,t-1} + \zeta_{22} M_{UP,t-1} + \zeta_{32} M_{LO,t-1} \\ M_{LO,t} &= \zeta_{23} M_{UP,t-1} + \zeta_{33} M_{LO,t-1} \\ T_{A\,T,t} &= T_{A\,T,t-1} + \xi_1 \big\{ RF_t - \xi_2 T_{A\,T,t-1} - \xi_3 \big[T_{A\,T,t-1} - T_{LO,t-1} \big] \big\} \\ RF_t &= \chi \big\{ \log_2 \big[M_{A\,T,t} / M_{A\,T,1750} \big] \big\} + RF_{EX,t} \\ T_{LO,t} &= T_{LO,t-1} + \xi_4 \big[T_{A\,T,t-1} - T_{LO,t-1} \big] \\ SLR_t &= \sum_{j} SLR_{i,t} \end{split}$$

여기서 M은 매체별 총 탄소량(carbon stock), E는 온실가스 배출량을 의미하고, AT, UP, LO는 각각 대기(atmosphere), 천해(upper ocean), 심해(lower ocean)를 의미한다. 여기서 $T_{AT,t}$ 와 $T_{LO,t}$ 는 각각 지구대기 평균기온과 해양 평균기온을 의미한다. RF_t 와 $RF_{EX,t}$ 는 각각 온실가스 배출로 인한 복사강제력(radiative forcing)과 온실가스 이외의 요소로 인한 복사강제력을 의미한다. SLR_t 과 $SLR_{i,t}$ 은 각각 총 해수면상승과 원인별 (i) 해수면상승을 의미한다. ξ,ξ,χ 는 각 기후모형의 모수이다. $SLR_{i,t}$ 는 별도의 산출 식을 갖고 있는데, 보다 자세한 내용은 Nordhaus (2010)을 참고할 수 있다.