

- 기후경제통합 - 지역평가모형
비교분석 및 국내 모형개발을 위한
기초연구

형인창

-

연구진

연구책임자 황인창 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)

산학연정 연구자문위원

강성훈 (한국조세재정연구원 부연구위원)

강희찬 (인천대학교 조교수)

구윤모 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)

권원태 (국립기상과학원 연구위원)

유종민 (홍익대학교 조교수)

이동규 (한국조세재정연구원 부연구위원)

이종덕 (한국교통연구원 Post-Doc.)

© 2015 한국환경정책·평가연구원

발행인 박광국

발행처 한국환경정책·평가연구원

세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지

B동(과학·인프라동) (우편번호) 30147

전화 044) 415-7777 팩스 044) 415-7799

<http://www.kei.re.kr>

인쇄 2015년 11월 26일

발행 2015년 11월 30일

등록 제17-254호(1998년 1월 30일)

ISBN 978-89-8464-944-6 93530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.

황인창. 2015. 「기후경제통합-지역평가모형 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구」. 한국환경정책·평가연구원.

값 5,000원

서 언

최근 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서는 모든 당사국이 신기후체제에서 국가별 기후 변화대응 기여방안(INDC)을 작성하여 제출하도록 하고 있습니다. 국가별 INDC에서 제시한 온실가스 감축목표를 살펴보면, 미국은 2025년까지 2005년 대비 26~28%, 유럽연합은 2030년까지 1990년 대비 40%, 일본은 2030년까지 2013년 대비 26% 감축할 계획입니다. 우리나라는 2030년까지 BAU 대비 온실가스 배출량을 37% 감축하는 것을 목표로 하고 있습니다.

유럽과 미국 등 선진국들에서는 효과적인 온실가스 감축을 위해 배출권거래제도와 탄소세 등 시장메커니즘을 도입하고 에너지와 탄소감축 관련 기술개발에 대한 투자를 높여가고 있습니다. 또한, 국내외적으로 기후변화 적응에 대한 관심도 더욱 높아지고 있습니다. 우리나라에서도 올해부터 온실가스 배출권거래제도를 시행하고 있으며, 2009년에 설립한 국가 기후변화 적응센터를 통해 기후변화 적응사업을 지속해서 수행하고 있습니다.

이렇듯 국내외적으로 기후변화 문제를 해결하기 위한 정책수단에 대한 관심이 높아지는 가운데 정책수단 간에 합리적으로 예산을 배분할 필요성은 더욱더 커지고 있습니다. 이 연구에서 다루는 기후경제통합-지역평가모형은 이러한 내용을 효과적으로 살펴볼 수 있도록 설계된 다학제 간 융합 모형입니다. 구체적으로 기후경제통합-지역평가모형에서는 국가별로 탄소 1톤이 유발하는 사회적 비용을 의미하는 탄소의 사회적 비용, 최적 온실가스 감축량, 연구기술 개발투자, 기후변화 적응투자, 에너지원별 구성(energy mix) 등의 내용을 살펴볼 수 있습니다.

이 연구는 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 첫 시도라고 할 수 있습니다. 이 연구에서 제시한 비교연구와 국내 모형개발을 위한 기초 틀이 향후 개발하게 될 국내모형에서 중요한 기초자료로 사용될 수 있기를 기대합니다.

마지막으로 이 연구를 성실히 수행한 한국환경정책·평가연구원 황인창 박사에게 감사를 표합니다. 아울러 바쁘신 와중에도 자문과 조언을 통해 연구에 도움을 주신 한국조세재정연구원 강성훈 박사, 인천대학교 강희찬 교수, 한국환경정책·평가연구원 구윤모 박사, 국립기상과학원 권원태 박사, 홍익대학교 유종민 교수, 한국조세재정연구원 이동규 박사, 한국교통연구원 이종덕 박사, 그리고 익명의 감수위원에게도 고마움을 전합니다.

2015년 11월

한국환경정책·평가연구원

원장 박광국

국문 요약

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(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제5차 평가보고서에서 제시하고 있는 지역별 온실가스 감축 권고량도 이러한 기후경제통합-지역평가모형의 연구결과에 근거한 것이다. 기후경제통합-지역평가모형의 연구결과는 국내 기후변화정책을 수립하는 데도 중요한 근거로 활용되고 있다. 예를 들어 미국의 경우 연방 정부 워킹그룹(Interagency Working Group on Social Cost of Carbon)에서는 기후경제통합모형을 근거로 탄소의 사회적 비용에 관한 보고서를 발간하고 있다. 학계에서도 기후경제통합-지역모형을 바탕으로 최적의 기후변화정책을 분석하고자 하는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 대표적으로 미국 캘리포니아 버클리 대학의 David Anthoff 교수와 네덜란드 암스테르담 자유대학 및 영국 서섹스 대학의 Richard Tol 교수는 FUND(Climatic Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) 모형을 활용해 국가(지역)별 기후변화 대응전략에 따른 최적 탄소세를 산출한 바 있다.

그러나 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서 한국은 독립된 국가로 다루어지기 보다는 기타 국가군에 포함되고 있어 모형의 결과를 국내 정책에 적용하기에는 한계가 있다. 또한, 한국의 경제규모와 온실가스 배출규모 등을 고려할 때 기후경제통합-지역평가모형에서 한국을 독립된 국가로 다루는 것은 국제 기후변화정책에서도 의미 있는 일이라고 할 수 있다.

기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 것은 효과적인 기후변화정책을 수립해 가는 데 있어 필수적이다. 기후경제통합-지역평가모형을 통해 한국의 특성을 반영한 탄소의 사회적 비용을 산출할 수 있는데, 탄소의 사회적 비용은 탄소세 요율을 정하는 데 활용할 수 있고 에너지 정책 및 대규모 개발 사업의 환경영향 평가 시에도 활용할 수 있다. 기후경제통합-

지역평가모형의 주요 산출물 중 하나인 최적 온실가스 감축량은 배출권거래제도에서 국가 총 배출권 할당량을 정하는 데 있어 중요한 근거로 사용될 수 있다. 또한, 현실적으로 국제 기후변화협상이 이상적인 형태로 진행되기는 어렵다는 점을 고려한다면 개별국가의 전략을 반영할 수 있는 기후경제통합-지역평가모형이 더욱 필요하다고 할 수 있다.

이러한 필요성에 따라 이번 연구에서는 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 첫 번째 단계로서 기존 모형에 대한 비교 분석 및 향후 모형개발을 위한 기본 틀을 제시하였다. 비교분석에서는 기후경제통합-지역평가모형에서 사용하고 있는 사회후생함수, 경제모듈, 기후모듈, 정책모듈 등을 유형화하고 일반화하였다. 또한, 이번 연구에서는 기후경제통합-지역평가모형의 활용 예로서 미국 예일 대학(Yale University) William Nordhaus 교수 연구진이 개발한 RICE(Regional Integrated Climate-Economy Model) 모형의 응용 결과를 살펴보았다. 이론과 수치모형을 활용한 이번 연구의 내용은 국가별로 취하는 선택과 전략에 따라 기후 시스템이 큰 폭으로 변화하고, 이에 따라 최적의 기후변화정책 내용이 큰 폭으로 달라질 수 있음을 잘 보여준다. 이러한 점은 독자적인 기후경제통합-지역평가모형 개발의 필요성을 더욱 잘 보여준다고 할 수 있다. 국제 기후변화협상을 비롯해 변화하는 국제 상황과 새롭게 드러나는 과학적 증거들에 대해 국내 여건을 반영한 효과적인 기후변화 정책을 수립하기 위해서는 이를 분석할 수 있는 도구를 갖추고 있어야 한다. 이번 연구는 이를 위한 유용한 출발점이 될 것이다.

마지막으로 이번 연구에서 GAMS(General Algebraic Modeling System) 버전으로 작성한 RICE 모형은 게임이론을 활용한 기후변화 협상모형을 개발하는 데 활용할 수 있으며, 더 나아가 한국을 독립된 지역으로 포함하는 기후경제통합-지역평가모형을 구축하는 데 있어 기초 모형으로 활용할 수 있다.

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

차례

제1장 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적 및 주요 내용	5
제2장 기후경제통합-지역평가모형 비교분석	8
1. 기후경제통합평가모형 개요	8
2. 기후경제통합평가모형 구성요소	9
가. 경제성장과 외부효과	9
나. 기후변화의 영향	10
다. 기후변화정책	10
3. 기후경제통합-지역평가모형 비교	11
가. 개요	11
나. 지역구분	13
다. 사회후생함수(Social Welfare Function)	15
라. 경제성장 모듈	26
마. 기후 모듈	31
바. 기후영향 및 정책 모듈	36
사. 기타	42
제3장 기후변화 대응전략에 따른 기후변화정책: RICE 응용	46
1. GAMS 버전 RICE 모형	46
2. 기후변화 대응전략 유형	47
가. 유형분류	47

나. 협력전략	48
다. 비협력전략과 하이브리드 방식	50
3. 분석 결과	51
제4장 국내 기후경제통합-지역평가모형 개발을 위한 기본 틀	58
1. 기후경제통합-지역평가모형 개발과정	58
2. 모형개발 기본방향	60
3. 모듈별 세부방향	62
가. 경제모듈	63
나. 기후모듈	65
다. 기후영향 및 정책모듈	66
4. 기타 고려사항	67
5. 관련 연구와의 협력 및 향후 모형 개발일정(안)	68
제5장 맺음말	70
참고문헌	73
Abstract	83

표 차례

<표 2-1> 기후경제통합-지역평가모형 구분	12
<표 2-2> 기후경제통합-지역평가모형 지역구분	14
<표 2-3> 기후경제통합-지역평가모형 사회후생함수	17
<표 2-4> 지속 가능성 관련 사회후생함수	20
<표 2-5> 형평성 관련 사회후생함수	22
<표 2-6> 기후경제통합-지역평가모형 경제성장 모듈	30
<표 2-7> 기후경제통합-지역평가모형 기후모듈 세분화 정도 비교	36
<표 2-8> 기후경제통합-지역평가모형 기후변화 피해비용 함수	39
<표 2-9> 기후경제통합-지역평가모형 기후변화 감축비용 함수	41
<표 2-10> 기후경제통합-지역평가모형 정책수단	42
<표 2-11> 기후경제통합-지역평가모형 기초 자료원	44
<표 2-12> 기후경제통합-지역평가모형 알고리즘 및 소프트웨어	45
<표 4-1> 기후경제통합-지역평가모형 요소별 세부방향(안)	63

그림 차례

<그림 1-1> 기후경제통합 지역평가모형 개발과정	6
<그림 2-1> 기후경제통합평가모형 구조	9
<그림 2-2> 에너지 균형모형	32
<그림 2-3> 기후변화 피해비용함수	37
<그림 2-4> 온실가스 감축비용곡선	40
<그림 3-1> 기후변화 대응전략 유형	48
<그림 3-2> 2025년 온실가스 배출량(Negishi 가중치 적용)	52
<그림 3-3> 2025년 온실가스 배출량(다양한 방식)	53
<그림 3-4> 2025년 온실가스 감축률(BAU 대비)	53
<그림 3-5> 탄소세(Negishi 가중치 적용)	54
<그림 3-6> 탄소세(공리주의 가중치 적용)	54
<그림 3-7> 지구평균기온	55
<그림 3-8> 해수면 상승	55
<그림 3-9> 국가(지역)별 기후변화 총비용	56
<그림 4-1> 기후경제통합-지역평가모형 개발과정	58
<그림 4-2> 모형개발 기본방향	61
<그림 4-3> 기후경제통합-지역평가모형 개발일정(안)	69

제1장 서론

1. 연구 배경

최근 국제 기후변화협상에서는 기후경제통합-지역평가모형(Regional integrated assessment model of climate and the economy)의 연구결과가 협상의 근거로 활용되고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)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, 2010, 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 기후경제통합모형의 연구 결과를 바탕으로 탄소의 사회적 비용(Social cost of carbon)을 산출하고 있다. 영국의 경우에는 재무부(HM Treasury) 주관으로 기후변화 경제학에 관한 스텐보고서(Stern, 2006)를 발간하고 PAGE 모형을 사용해 최적 기후변화정책을 제시하고 있다.¹⁾

학계에서도 기후경제통합-지역평가모형을 바탕으로 최적의 기후변화정책을 수립

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

하고자 하는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 대표적으로 미국 스탠퍼드 대학(Stanford University)이 주관하고 있는 에너지모델링포럼(Energy Modelling Forum)에서는 1976년부터 전 세계 주요 에너지-기후경제모형에 관한 비교연구를 수행하고 있다(Weyant et al., 2013). 미국 캘리포니아 버클리 대학(University of California at Berkely)의 David Anthoff 교수와 네덜란드 암스테르담 자유대학(VU University Amsterdam) 및 영국 서섹스 대학(University of Sussex)의 Richard Tol 교수는 FUND 모형을 활용해 국가(지역)별 기후변화 대응전략에 따른 최적 탄소세를 산출한 바 있다(Anthoff and Tol, 2010). 이 밖에도 최근에는 다양한 사회후생함수, 에너지 정책, 기후변화 적응정책 등을 고려한 기후경제통합-지역평가모형이 개발되는 등 학계의 연구는 꾸준히 발전해가고 있다.²⁾

그러나 현재 대부분의 기후경제통합-지역평가모형은 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서 개발한 것으로 한국을 비롯한 후발 경제성장국들의 관심이 덜 반영되는 경향이 있다(Stanton et al., 2008). 구체적으로 대부분의 모형에서 한국은 독립된 국가로 다루어지기보다는 기타 국가군에 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 기후변화 정책에서도 의미 있는 일이라고 할 수 있다.³⁾ 특히 현실적으로 국제 기후변화협상이 이상적인 형태로 진행되기는 어렵다는 점을 고려하면(Nordhaus, 2013), 개별국가의 현실과 전략을 반영할 수 있는 기후경제통합-지역평가모형이 더욱 필요하다고 할 수 있다.⁴⁾ 최근에는 기후경제통합-지역평가모형을 활용해 특정 국가의 최적 탄소세를

2) 예를 들어, Ackerman et al.(2013a), Bosello and De Cian(2014), de Bruin(2014) 등은 다양한 사회후생함수, 온실가스 감축비용 함수, 에너지 정책, 기후변화 적응정책 등을 고려한 모형을 개발했다.

3) World Bank의 World Development Indicators에 따르면, 2014년을 기준으로 한국의 GDP는 전 세계 10위(2005년 미국 달러 기준)이며 온실가스 배출량은 전 세계 7위이다(World Bank, 2015).

4) 국제 기후변화정책은 협력게임(cooperative game)과 비협력게임(non-cooperative game)으로 구분하여 살펴볼 수 있는데, 비협력게임의 경우 개별국가의 현실과 전략이 기후경제 분석에서 더 중요한 영향을 미친다.

독자적으로 산출하려는 연구도 진행되고 있다(Wong, 2012).⁵⁾

국내에서는 기후변화정책과 관련하여 주로 연산가능 일반균형(Computable General Equilibrium, CGE)모형을 활용한 연구를 수행해 왔다(예를 들면, 김용건 외, 2014; 강성원 외, 2014). CGE 모형은 미국 스탠퍼드대학 Kenneth Arrow 교수와 (2004년에 작고한) Gerard Debreu의 일반균형이론을 수치계산 가능한 형태로 응용한 경제모형이라고 할 수 있는데, 기후변화와 관련해서는 주로 배출권 할당량, 탄소세 등 외부에서 결정된 기후변화정책이 경제 전반에 미치는 과급효과를 다루는 연구에 적용되어 왔다. 반면 이번 연구에서 다루는 기후경제통합-지역평가모형은 CGE 모형과는 달리 경제활동과 기후변화 과정의 상호작용을 고려하여 (외부효과의 내부화) 사회후생을 최대화하기 위한 기후변화정책(탄소세, 배출권 할당량 등) 내용을 내부에서 결정하도록 하는 수치모형이라고 할 수 있다.⁶⁾

한편 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 활용한 예로는 대표적으로 환경부에서 발간한 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석」이 있다(채여라 외, 2010, 2011, 2012). 구체적으로 해당 과제에서는 한국에 미치는 기후변화의 경제적 영향을 종합적으로 분석하기 위해 케임브리지대학(University of Cambridge) Chris Hope 교수가 개발한 PAGE 모형을 활용했다. 다만 해당 과제에서는 지역구분을 수정해 한국을 독립적인 국가로 표현하기보다는 PAGE 모형의 원래 지역구분을 따라 산출한 결과에 가중치를 적용하는 방식으로 한국의 기후변화 영향을 산출했다.⁷⁾ 또한, 한국환경정책·평가연구원 김용건 박사는 STACO 모형(Finus et al., 2003)을 이용해 기후변화협상에 관한 분석을 수행한 바 있으나 역시 원래 모형의 기본 지역구분을 그대로 사용했다(Kim, 2004).

5) Wong(2012)은 새로운 기후경제통합-지역모형을 개발하기보다는 PAGE 모형에서 산출된 결과(유럽 연합 탄소세)에 가중치를 적용해 말레이시아의 탄소세로 간접적으로 산출했다.

6) 최근에는 컴퓨터 계산 능력이 향상됨에 따라 CGE 기법을 반영한 기후경제통합-지역평가모형들도 개발되고 있다. 구체적인 예는 제2장에서 살펴볼 수 있다.

7) Chae(2006)도 유사한 방식으로 PAGE 모형을 활용해 한국의 기후변화 피해비용을 산출했다. 추후 독자적인 방식으로 개발한 기후경제통합-지역평가모형과 채여라(2010~2012)의 연구결과를 비교하는 것도 의미 있는 일이 될 것이다.

기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 과정은 많은 시간과 노력을 필요로 하는 일이다. 실제로 미국 예일 대학(Yale University) William Nordhaus 교수연구그룹은 RICE 모형을 1996년에 처음 발표했는데(Nordhaus and Yang, 1996), 이를 위한 연구는 1991년 이전부터 진행해왔다(Nordhaus, 1991, 1994a). 이처럼 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 것이 어려운 것은 정의상 기후모듈과 경제모듈, 기후정책모듈을 모두 개발하여야 하고 지역별로 개별 방정식의 모수(parameter)들을 추정해야 하기 때문이다. 또한, 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 데 필요한 자료의 양은 많지만, 장래 기후변화의 영향을 모형하기 위한 기본 관측값이 크게 부족한 것도 원인이다. 예를 들어 인류 역사상 2~3°C 이상의 연평균 기온 상승으로 인한 기후변화 영향에 관한 관측 자료는 거의 없다(IPCC, 2014). Nordhaus 교수는 전문가 판단 조사방법(expert elicitation)을 사용해 일부 불확실한 모수 값을 추정하기도 했지만(Nordhaus, 1994b), 불확실성을 명시적으로 고려할 경우 계산 과정이 복잡해지고 새로운 수치 알고리즘을 개발해야 한다는 단점이 있다(Hwang et al., 2013a). 이처럼 다양하면서 불확실한 자료들을 수집하고 추정하는 과정은 긴 시간과 노력을 필요로 하는 일이다.

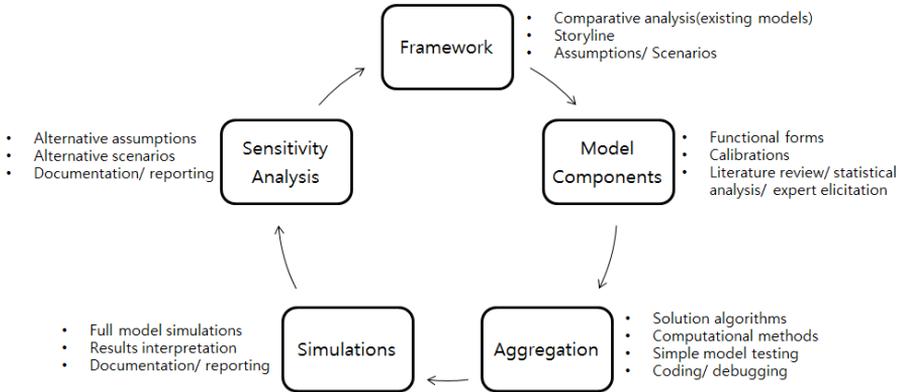
그럼에도 불구하고 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 것은 효과적인 기후변화정책을 수립해 가는 데 필수적이라고 할 수 있다. 기후경제통합-지역평가모형에서 산출할 수 있는 탄소의 사회적 비용이 국가 기후변화정책을 수립하는 데 있어 기초가 되는 값이기 때문이다(Helm, 2005). 구체적으로 기후경제통합-지역평가모형의 주요 산출물 중 하나인 최적 온실가스 감축량은 배출권거래제도에서 국가 총 배출권 할당량을 정하는 데 중요한 근거로 사용될 수 있다. 모형에서 산출되는 탄소의 사회적 비용은 탄소세 요율을 정하는 데 활용할 수 있으며 에너지 정책 및 대규모 개발 사업의 환경영향 평가 시에 활용할 수 있다. 실제로 영국과 미국에서는 개별사업의 환경영향을 평가하는 데 탄소의 사회적 비용도 고려하고 있다(Clarkson and Deyes, 2002; IWGSCC, 2010; 2013). 또한, 기후경제통합-지역평가모형은 개별국가의

기후변화 대응 전략에 따른 국가별 최적 온실가스 감축량(또는 탄소세 요율)을 산정하는 데 활용할 수 있다(Anthoff and Tol, 2010). 더불어 기후경제통합-지역평가모형의 주요 결과들은 국제 기후변화협상 과정에서 유용한 근거로 활용될 수 있다.

이처럼 중요한 탄소의 사회적 비용은 현재와 미래의 기후변화로 인한 피해비용과 온실가스 감축비용의 평가를 통해 산출되며, 이러한 값들은 경제성장 경로, 기후 시스템 변화, 기후변화정책의 상호작용에 따라 달라질 수밖에 없다. 이러한 상호작용을 모두 살펴볼 수 있도록 설계된 모형이 기후경제통합평가모형이며, 이러한 이유로 탄소세를 비롯한 국제적인 기후변화정책 논의는 대부분 기후경제통합평가모형의 산출 결과에 바탕을 두고 있다. 이번 연구에서 살펴볼 기후경제통합-지역평가모형은 기후경제통합평가모형을 지역별로 세분한 것이다.

2. 연구 목적 및 주요 내용

일반적으로 수치모형(numerical model)을 개발하는 과정은 <그림 1-1>과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 과정은 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 과정에도 동일하게 적용할 수 있다. 다만 기후경제통합-지역평가모형에서는 기후모듈, 경제모듈, 정책모듈을 구분하고, 지역별로 개별 모듈을 모형화해야 한다는 점에서 보다 복잡해질 수 있다.



〈그림 1-1〉 기후경제통합 지역평가모형 개발과정

이 연구는 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 첫 번째 과정으로서 기존 모형에 대한 비교 분석 및 향후 모형개발을 위한 기본 틀을 제시하는 것을 목적으로 한다. 첫 번째 과정은 모형의 뼈대를 구축하는 단계이다. 모형에서 살펴보려는 문제/현상에 대한 정의(오염원, 지역구분, 세부 부문 등), 일반적인 사회경제현상(인구, 경제활동 등)에 대한 가정 및 전망(시나리오), 사회경제 현상과 살펴보려는 문제와의 상호작용에 관한 논리적 설명(스토리라인), 이론모형(mathematical/analytical model)을 통한 모형의 논리 구조 결정 등이 이 과정에 포함된다.

첫 번째 과정은 비록 모형을 실제로 구축하고 실행하며 결과를 얻는 단계는 아니지만, 두 번째부터 다섯 번째 과정까지 모두 첫 번째 과정에서 정한 뼈대 위에서 수행된다는 점에서 중요하다. 또한, 첫 번째 과정에서 향후 구축하게 될 모형의 학술적·정책적 기여도, 논리적 완결성 등이 결정되기 때문에 모형 구축에 가장 중요한 단계라고도 할 수 있다. 이 과정에서는 최적제어(optimal control) 이론 등 경제수학과 기후과학 등에 대한 이해가 필요하다.

첫 번째 과정에서는 기존 모형에 대한 비교분석이 주요 연구방법이며, 이를 통해 중요하지만 기존 모형에서 다루지 않은 것들을 발견하고 모형 구축과정에서 발생할

수 있는 문제점과 해결방안에 대해서도 살펴볼 수도 있다. 참고로 CRED(Climatic and Regional Economics of Development) 모형(Ackerman et al, 2013a)을 개발한 스톡홀름환경연구소(Stockholm Environment Institute) 연구진 역시 모형을 개발하기에 앞서 기존 모형들에 관한 다양한 비교연구를 수행한 바 있다(Stanton et al., 2008; Stanton, 2011).

구체적으로 이번 연구에서 비교연구를 통해 중점적으로 살펴본 내용에는 모형별 지역구분 및 지역별 모수 값 조정(calibration) 방법, 모형이 다루고 있는 기후변화 정책의 다양성(온실가스 감축정책, 기후변화 적응정책, 에너지정책, 연구개발 투자 등), 경제성장 및 기후 모듈, 기후 영향의 상세화 정도(해수면 상승 고려 여부 등), 사회후생함수 및 지역별 후생함수 합산 방식, 소프트웨어 및 수치계산 방식 등이 포함된다.

또한 이번 연구에서는 일부 모형에 대해서는 직접 수치모형을 구축하고 실행하여 결과 값을 산출하였다. 수치모형 결과들은 국가별로 취하는 선택과 전략에 따라 기후 시스템이 큰 폭으로 변화하고, 이에 따라 최적의 기후변화정책 내용이 큰 폭으로 달라질 수 있음을 잘 보여준다. 이러한 점은 독자적인 기후경제통합-지역평가 모형의 필요성을 더욱 잘 나타낸다고 할 수 있다.⁸⁾

마지막으로 이번 연구에서는 향후 개발할 기후경제통합-지역평가모형의 기본 틀을 구축하였다. 구체적으로 비교연구를 통해 얻은 정보들을 바탕으로 향후 개발할 기후경제통합-지역평가모형의 내용적 범위(지역구분, 기후모듈, 경제모듈, 정책모듈 등), 소프트웨어 및 알고리즘, 잠정적인 개발 일정 등을 제시하였다.

8) 이와 관련한 주요 연구내용은 한국환경정책학회 2015년 추계 학술발표대회(서울 코엑스, 2015. 10. 31)에서 발표되었다. 지정토론을 비롯해 토론에 참여해 주신 모든 분에게 감사드린다. 수치모형 결과뿐 아니라 보고서에 남아있을 수 있는 모든 오류는 저자의 책임이다.

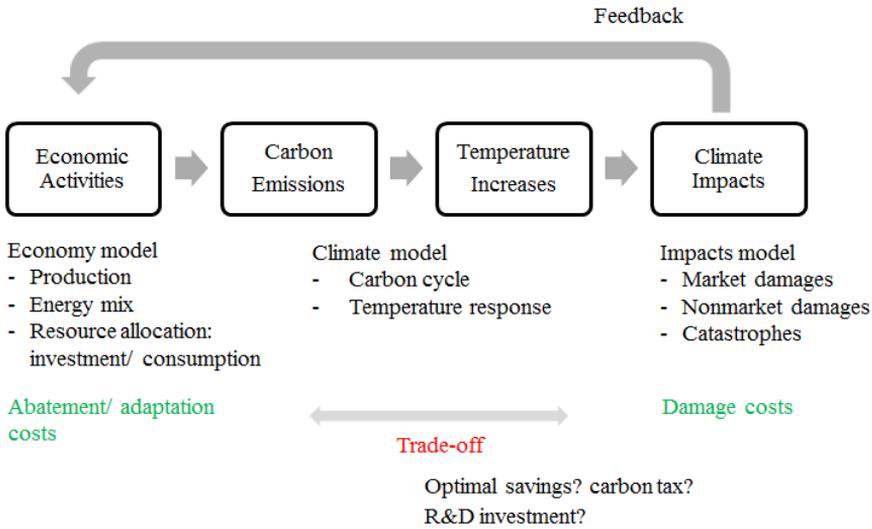
제2장 기후경제통합-지역평가모형 비교분석

1. 기후경제통합평가모형 개요

기후경제통합평가모형(Integrated Assessment Model of Climate and the Economy, IAM)은 “기후변화에 관한 과학적 측면과 사회경제적인 측면을 모두 포괄(통합)하며, 기후변화 문제를 해결하기 위해 필요한 정책적 수단들을 평가하려는 목적으로 고안된 모형”(Kelly and Kolstad, 1999a)이라고 정의할 수 있다.⁹⁾ 이 정의에서도 확인할 수 있듯이 기후경제통합평가모형은 기후변화 문제에 대한 이해와 의사 결정을 돕기 위해 기후과학과 경제학 등 기후변화 관련 학문의 학제 간(interdisciplinary) 통합 연구를 시도하는 모형이라고 할 수 있다.

일반적으로 기후경제통합평가모형은 <그림 2-1>과 같은 내용을 개별 요소로 포함하고 있다. 개별요소에 대한 자세한 설명은 2절에서 다룰 것이다. 기후경제통합평가모형은 이러한 이야기 구조를 수학적으로 표현한 것이라고 할 수 있는데, 연구자의 관심에 따라 최근에는 불확실성과 학습효과를 모형에 반영하기도 하고(Kelly and Kolstad, 1999b; Hwang et al., 2013a, b) 여러 가지 다양한 사회후생함수(social welfare function)를 사용해 효율성, 형평성, 지속 가능성 등 사회가치의 변화가 기후정책과 경제성장에 미치는 영향을 분석하기도 한다(Tol, 1999, 2001; Dietz and Asheim, 2012; Ackerman et al., 2013a).

9) Weyant et al.(1996)과 Tol(2014) 역시 유사한 의미로 기후경제통합평가모형을 정의하고 있다.



〈그림 2-1〉 기후경제통합평가모형 구조

2. 기후경제통합평가모형 구성요소

가. 경제성장과 외부효과

생산, 소비, 투자 등을 통한 자본 축적으로 표현되는 경제성장은 이산화탄소를 비롯한 온실가스 배출과 그로 인한 온실효과라는 외부효과(externality)를 발생시킨다. 구체적으로 대기 중으로 배출된 온실가스는 기후시스템을 따라 해양과 생물권 등을 순환하며 지구에서 외부로 방출되는 적외선을 흡수하고 이를 지표면으로 방출하여 지구의 평균기온을 상승시킨다. 이때 일반적으로 지구평균기온은 온실가스 농도에 대한 증가함수 형태로 표현되지만, 경제성장의 정도와 경제활동 과정에서 사용하는 에너지원의 종류와 양에 따라 외부효과의 크기는 달라진다.¹⁰⁾

10) 기후경제모형을 이해하기 위해 필요한 기후변화의 과학적 배경에 관한 단순하지만 핵심적인 설명은 Tol(2014)에서 확인할 수 있다.

나. 기후변화의 영향

지구평균기온의 상승은 여러 가지 사회-경제-환경적 영향을 일으킨다. 구체적으로 지구평균기온 상승으로 인해 해수면 상승과 이로 인한 연안 손실과 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) 파괴, 시베리아 영구동토(permafrost) 및 심해로부터의 메탄 대방출 등과 같은 비연속적 재난(catastrophe)이 발생할 가능성도 있다.¹¹⁾

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. 기후경제통합-지역평가모형별 피해비용 산출방법은 제3절에서 확인할 수 있다.

다. 기후변화정책

이처럼 경제성장 과정에서 외부효과로서 온실효과 및 그로 인한 기후변화 피해가 발생할 것으로 예상되기 때문에 합리적인 의사결정자는 이러한 외부효과를 내부화 하기 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 내용과 강도를 결정해야 한다.¹²⁾ 이렇게 결정

11) 기후변화 영향에 관한 최근 문헌에 대한 검토는 Nordhaus(2013)에서 확인할 수 있다.

된 기후변화정책에 따라 생산, 소비, 투자라는 경제활동의 내용과 정도가 조정된다(feedback). 일반적으로 기후경제모형에서 지혜롭고(forward-looking) 합리적인 의사결정자는 비시장 재화를 포함하여 사회에서 생산하고 소비하는 재화와 용역의 양을 시·공간적으로 적절히 배분하여 사회적 후생(social welfare)을 최대화하는 것을 목표로 한다. 또한, 이를 달성하기 위해 가능한 모든 정보를 바탕으로 최적의 기후변화정책(온실가스 감축, 적응 등)을 선택하게 된다.

3. 기후경제통합-지역평가모형 비교

가. 개요

기후경제통합-지역평가모형은 기후변화 문제를 다루는 통합지역평가(Integrated regional assessment) 모형이라고 할 수 있다. 이때 통합지역평가는 “지구환경 변화가 지역에 미치는 영향을 분석하고 이해당사자와 정책결정자들이 합리적으로 의사결정을 할 수 있도록 다양한 정보와 지식을 제공하고 활용하는 프로세스(Knight and Jager, 2009: 9)”라고 정의할 수 있다. 이러한 정의에서도 확인할 수 있듯이 통합지역평가모형은 지구환경변화와 지역의 사회·경제적 변화, 둘의 상호작용을 다학제적 접근(interdisciplinary approach)을 통해 살펴본다는 특징을 갖고 있다.

기후경제통합-지역평가모형을 구축하는 과정과 구조는 각각 <그림 1-1>과 <그림 2-1>에서 나타난 바와 같으나, 기후경제통합-지역평가모형은 지역을 여러 개로 구분하고 지역 간 상호작용을 고려한다는 점에서 기후경제통합평가모형보다 더욱 복잡한 형태라고 할 수 있다. 따라서 기후경제통합-지역평가모형을 구축하기 위해서는 모형에 포함되는 함수 형태와 모수들을 지역의 특성에 따라 개별적으로 선정해야 하며, 개별 지역의 사회후생함수를 이용해 전 지구의 사회후생함수를 도출하는 과정도 거쳐야 한다.

12) 기후변화정책에 관한 더 자세한 경제학적 해석은 Helm(2005)에서 확인할 수 있다.

현재 개발되어 활용되고 있는 기후경제통합-지역평가모형에는 <표 2-1>과 같은 것들이 있다. 이 중 이번 연구에서는 사회후생함수 최대화에 해당하는 모형들을 중심으로 분석하되 비교를 위해 시물레이션 모형 중 PAGE 모형(Hope, 2011)을 추가로 살펴볼 것이다. 일반균형, 부분균형, 비용최소화 등과 관련한 모형들은 환경부에서 진행 중인 「한국형 상·하향식 온실가스 통합 감축 시스템 개발」 과제에서 다루는 내용과 중복되는 측면이 있어 이번 연구에서는 분석에서 제외하였다.

<표 2-1> 기후경제통합-지역평가모형 구분

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
시물레이션	PAGE, ICAM-3, E3MG, GIM
비용최소화	DNE21+, MESSAGE-MACRO

주: Stanton et al. (2008)의 분류를 따르되 다른 모형으로 변형되거나 새롭게 발표된 모형은 추가하였다. 이번 연구에서 살펴볼 모형들은 밑줄로 강조하였다.

스톡홀름환경연구소 Elizabeth Stanton 박사와 동료들은 기후경제통합평가모형에 관한 비교연구를 수행한 바 있다(Stanton et al., 2008). 그러나 그들은 지역구분과 상관없이 모형별 구조, 불확실성, 형평성, 기술변화와 감축비용 등 4가지를 중점적으로 살펴보는 데 반해, 이번 연구에서는 지역의 경제성장과 정책결정이 기후변화에 미치는 영향과 기후변화가 역으로 지역에 미치는 영향이 모형에 따라 어떻게 반영되고 있는지를 살펴본다는 점에서 차이가 있다. 또한, 이번 연구에서는 Stanton 박사와 동료들의 연구에서는 다루지 않았던 WITCH 모형, CRED 모형, AD-RICE 모형에 대한 분석도 추가하였다. 다른 모형들에 대해서도 Stanton 박사와 동료들의 연구 이후에 갱신된 내용이 있다면 모형별 최신 내용을 다루었다.

비교분석에서 살펴볼 내용으로는 모형별 지역구분 및 사회후생함수, 경제성장모듈, 기후모듈, 기후영향 및 정책모듈, 알고리즘과 수리계산 방식, 모수 조정 방식, 계산 소프트웨어 등이다. 이러한 내용은 개별 기후경제통합-지역평가모형의 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 최근 학계에서 주목을 받고 있는 주제들이기도 하다(Fankhauser et al., 1997; Tol, 1999, 2001; Anthoff and Tol, 2010; Stanton, 2011; Dietz and Asheim, 2012; Botzen and van den Bergh, 2014; Abbott and Fenichel, 2014). 또한, 이러한 비교분석은 향후 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 데 실질적인 참고자료가 될 것이다.

나. 지역구분

이번 연구에서 살펴볼 모형들이 지역(또는 국가)을 구분하는 방식은 <표 2-2>와 같다. <표 2-2>에 나타난 바와 같이 일괄적으로 적용되는 지역구분은 없으며 개별 모형들은 관심에 따라 다양하게 지역을 구분하고 있다. 가장 세분된 지역구분을 보이는 모형은 16개로 지역을 구분하는 FUND 모형(Anthoff and Tol, 2014a)이며 지역구분이 가장 작은 모형은 2개로 지역을 구분하는 CETA-M 모형(Peck and Teisberg, 1999)이다. 나머지 모형들에서는 대체로 10개 내외로 지역을 구분하고 있다. 총 10개 모형 중 CETA-M 모형을 제외한 모든 모형은 미국을 독립적인 그룹으로 다루고 있으며, 중국은 7개 모형, 일본은 5개 모형, 인도는 3개 모형, 러시아와 캐나다는 각각 2개 모형에서 독립적인 그룹으로 표현되고 있다. 단일 국가로 그룹화된 것이 아닌 경우 대체로 대륙에 따라 그룹을 구분하고 있으며(예를 들어 남아메리카, 아프리카 등), AD-RICE(de Bruin, 2014) 모형 등 일부 모형에서는 소득에 따른 구분도 포함하고 있다.

한국을 독립적인 그룹으로 표현한 모형은 없으며, RICE(Nordhaus, 2010), PAGE, CETA-M, CRED(Ackerman et al., 2013a), AD-RICE 모형에서는 기타 고소득국가, FUND 모형에서는 일본, WITCH(Bosello and de Cian, 2014) 모형에서는 호주와

함께 하나의 그룹에 포함되었다. 한편 GRAPE(Kurosawa, 2004) 모형에서는 한국이 기타 아시아 그룹, MERGE(Manne and Richels, 2005)와 AIM/Dynamic(Masui et al., 2006) 모형에서는 한국이 기타 그룹에 포함되었다.

〈표 2-2〉 기후경제통합-지역평가모형 지역구분

구분	지역	세부 지역
RICE	12	미국, 중국, 일본, 인도, 러시아, 유럽연합, 유라시아, 중동, 아프리카, 남아메리카, 기타 고소득국가, 기타
FUND	16	미국, 중국, 캐나다, 서유럽, <u>한국과 일본</u> , 호주와 뉴질랜드, 중유럽과 동유럽, 구소련연방, 중동, 중앙아메리카, 남아메리카, 남아시아, 남동아시아, 북아메리카, 사하라이남 아프리카, 소규모 섬 국가
WITCH	14	미국, 지중해유럽, 북유럽, 동유럽, 캐나다와 일본과 뉴질랜드, 중국과 대만, 남아시아, 사하라이남 아프리카, 남아메리카와 멕시코와 카리브 해안 국가, <u>한국과 호주와 남아프리카공화국</u> , 구소련연방, 남동아시아, 중동, 북아프리카
MERGE	9	미국, 중국, 일본, 인도, 캐나다, 서유럽, 호주와 뉴질랜드, 동유럽과 구소련연방, 멕시코와 OPEC, 기타
CETA-M	2	<u>OECD</u> , 기타
GRAPE	10	중국, 일본, 북아메리카, 서유럽, 오세아니아, <u>남동아시아와 기타 아시아</u> , 중동과 북아프리카, 사하라이남 아프리카, 남아메리카, 구소련연방과 동유럽
AIM/Dynamic	6	미국, 중국, 일본, 기타 OECD(부속서 1국가), 구소련연방, 기타
CRED	9	미국, 중국, 유럽, 기타 고소득국가, 중동, 남아메리카와 카리브 해안 국가, 러시아와 비EU동유럽, 아프리카, 남아시아와 남동아시아
AD-RICE	13	미국, 중국, 일본, 인도, 러시아, 유럽연합, 동유럽, 아프리카, 기타 <u>고소득국가</u> , <u>중소득국가</u> , <u>중저소득국가</u> , <u>저소득국가</u> , <u>고소득 OPEC 국가</u>
PAGE	8	미국, 유럽연합, 기타 OECD, 구소련연합과 기타 유럽, 중국과 아시아 사회주의 국가, 인도와 남동아시아, 아프리카와 중동, 남아메리카

주: 한국이 속한 그룹은 밑줄로 강조하였다. 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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).

다. 사회후생함수(Social welfare function)

사회후생함수의 형태와 모수의 선택에 따라 수치모형의 결과 값이 크게 달라질 수 있기 때문에 기후경제통합-지역평가모형을 구축하는 데 있어 사회후생함수를 어떻게 정의하느냐는 상당히 중요하다. 이때 사회후생함수와 관련하여 결정해야 할 중요한 요소들에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 효용함수(utility function) 유형
- 사회후생함수 형태
- 선호(preference) 체계: 할인율(discount rate), 한계효용 탄성치(elasticity of marginal utility), 위험에 대한 태도(risk aversion), 불평등에 대한 태도(inequality aversion), 지속 가능성에 대한 태도 등
- 지역별 후생함수 합산방식

사회후생함수는 개별 효용함수를 시간, 공간(지역), 행위주체, 확률변수가 취할 수 있는 상태(state of the world) 등에 따라 합산한 값을 의미한다.¹³⁾ 개별 효용함수는 시장에서 거래되지 않은 것들을 포함한 재화나 용역의 소비를 통해 얻게 되는 개인이나 집단의 효용(만족도)을 나타내는 지표로서 기후경제모형에서는 대체로 다음과 같은 CRRA(constant relative risk aversion) 효용함수를 사용해 왔다.

$$U(C) = C^{1-\eta}/(1-\eta) \quad \text{식(2-1)}$$

여기서 $C > 0$ 는 소비, U 는 효용함수이며, η 는 한계효용 탄성치이다. 일반적으로 한계효용체감의 법칙이 적용되도록 효용함수를 정의하며($dU/dC > 0$, $d^2U/dC^2 < 0$), 대부분 기후경제통합모형에서 η 값은 1~2가 사용된다. $\eta = 1$ 일 때 $U(C) = \log(C)$ 이다.

13) 물론 경제학 이론에서 합리성과 민주적 의사결정을 모두 만족하는 사회후생함수가 존재하는가에 대해서는 부정적이다(Arrow, 1954). 다만 이번 연구에서는 사회적 의사결정이 필요하고 또 실제로 이루어지고 있다는 점에서 사회후생함수의 존재를 가정하고 출발하는 실용적 접근법을 받아들인다.

예외적으로 암스테르담 자유대학 In Chang Hwang 박사와 동료들은 HARA (harmonic absolute risk aversion) 함수를 기후경제통합평가모형에 적용한 바 있으며(Hwang et al., 2016), 스웨덴 예테보리 대학(University of Goeteborg) Thomas Sterner 교수와 Martin Persson 박사, 스톡홀름환경연구소 Frank Ackerman 박사와 동료들은 CES(constant elasticity of substitution) 함수를 기후경제통합평가모형에 적용한 바 있다(Sterner and Perrson, 2008; Ackerman et al., 2013b). 비시장 재화나 용역의 소비를 명시적으로 포함한 형태의 CES 효용함수는 식(2-2)와 같다.

$$U(C, N) = [(1-\theta) C^{1-1/\sigma} + \theta N^{1-1/\sigma}]^{(1-\eta)\sigma/(\sigma-1)} / (1-\eta) \quad \text{식(2-2)}$$

여기서 $N > 0$ 는 비시장 재화나 용역 또는 환경재화의 소비, σ 는 대체 탄성치 (elasticity of substitution), θ 는 비시장 재화나 용역의 비율이다. 다른 기호들은 식(2-1)에서와 같다.

기후경제통합-지역평가모형에서 현재까지 적용된 사회후생함수는 <표 2-3>에 나타난 바와 같이 할인율을 적용한 공리주의(discounted utilitarianism) 함수가 유일하다. <표 2-3>에서 확인할 수 있듯이 효용할인율(또는 시간선호율, pure rate of social time preference)의 경우 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서 고정 할인율 연 1~2%를 적용하고 있으나, 일부 모형에서는 스텐보고서(Stern Review)에서 사용한 낮은 할인율(연 0.1%)을 사용자가 선택할 수 있도록 하고 있다. 또한, MERGE나 CETA-M 모형에서는 자본수익률을 매년 5%로 고정하였는데, 이를 위해 시간선호율이 모형 내부에서 매시기 조정되도록 하고 있다. WITCH 모형은 1999년 버전 RICE 모형(Nordhaus and Boyer, 2000)의 시간할인 방식을 적용하는데, 이들 모형에서 할인율은 초기 연 3%에서 시작하여 매년 일정 비율로 감소한다. 이처럼 시간에 따라 감소하는 변동할인율은 이론적인 측면과 경험적인 측면에서

우수하여 최근 학계에서 주목받고 있을 뿐 아니라 영국 등 일부 국가에서는 실제로 변동할인율을 적용하고 있다(Arrow et al., 2013).

〈표 2-3〉 기후경제통합-지역평가모형 사회후생함수

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

주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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).

PAGE 모형은 사회후생함수를 정의하지 않는 시뮬레이션 기법을 적용하고 있다. 이때 기후변화와 관련한 전 세계 총비용은 지역별 비용(감축, 피해비용 등)을 David Anthoff 교수와 연구진들이 제안한 형평성 가중치(Anthoff et al., 2009)를 사용해

합산하는데 이 과정에서 사용하는 시간선호율을 <표 2-3>에 제시하였다.¹⁴⁾

지역구분이 없는 기후경제통합모형을 응용한 연구들까지 범위를 확장해 보면 기후경제통합모형에 활용된 바 있는 사회후생함수는 총 11가지이다.¹⁵⁾ 이들은 지속 가능성과 관련한 형태, 형평성과 관련한 형태, 불확실성과 관련한 형태 등으로 일반화할 수 있다. 이하에서는 이들 11가지 사회후생함수를 유형화하고 그 특징을 간략하게 살펴보겠다.

1) 지속 가능성 관련 사회후생함수

첫 번째로 지속 가능성과 관련한 사회후생함수는 식(2-3)과 같다. 식(2-3)은 콜롬비아 대학(University of Columbia) Graciela Chichilnisky 교수가 제시한 지속 가능한 선호(sustainable preference) 사회후생함수(Chichilnisky, 1996, 1997)를 일반화한 것이다. 구체적으로 Chichilnisky의 사회후생함수는 $0 < \lambda < 1$ 범위에서 정의되지만, 이번 연구에서는 이를 일반화하기 위해 0과 1을 포함한 형태로 λ 의 범위를 수정하였다.

$$W = (1 - \lambda) \sum_{g=1}^{\infty} r_g u_g + \lambda \Phi(u) \quad \text{식(2-3)}$$

여기서 $g=1, 2, \dots$ 는 세대(generation), W 는 사회후생함수, u 는 개별세대의 효용, r 은 할인인자(discount factor), $\Phi(u) \equiv \lim_{g \rightarrow \infty} u_g$ 는 마지막 세대의 효용, λ 는 가중치(0

14) 소비, 비용 등에 대한 할인율은 Ramsey 공식에 따라 시간선호율(또는 효용 할인율), 경제성장률, 한계효용 탄성치 등에 따라 결정된다(Ramsey, 1928).

15) 콜롬비아 대학 Graciela Chichilnisky 교수는 기존 사회후생함수 8개와 자신의 사회후생함수를 비교하였다(Chichilnisky, 2009). 한편 암스테르담 자유대학 Wouter Botzen 박사와 Jeroen van den Bergh 박사는 현재까지 발표된 주요한 사회후생함수를 14가지 형태로 분류하였다(Botzen and van den Bergh, 2014). 이번 연구에서는 보다 광범위하게 사회후생함수를 분류하고 있는 Botzen 박사와 van den Berg 박사의 구분을 기준으로 기후경제통합평가모형에서 사용된 바 있는 총 11가지 사회후생함수를 살펴보았다.

$\leq \lambda \leq 1$)를 의미한다. 이때 모든 세대에 대해 $r > 0$ 이고 $\sum_{g=1}^{\infty} r_g u_g < \infty$ 이다.

먼저, 식(2-3)에서 $\lambda = 0$ 이면서 모든 세대에 대해 $r_g < 1$ 일 경우 현재 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서 사용하고 있는 할인율을 적용한 공리주의 사회후생 함수가 된다. 정의상 이러한 사회후생함수는 미래의 지속 가능성은 고려하지 않고 ($\lambda = 0$) 미래 세대의 효용은 할인하여 합산함($r_g < 1$)을 가정한다.

$\lambda = 0$ 이면서 모든 세대에 대해 $r_g = 1$ 일 경우 고전적 공리주의(classical utilitarianism) 사회후생함수가 된다. 이는 미래의 지속 가능성은 고려하지 않고($\lambda = 0$) 미래 세대의 효용은 현세대의 효용과 같은 가치를 가짐($r_g = 1$)을 의미한다.

한편, $\lambda = 0$ 이면서 식(2-4)와 같은 특정 조건이 추가된다면 노르웨이 오슬로 대학(University of Oslo) Geir Asheim 교수와 미국 코넬 대학(Cornell University) Tapan Mitra 교수가 제시한 지속 가능한 할인율을 적용한 공리주의(sustainable discounted utilitarianism) 사회후생함수(Asheim and Mitra, 2010)가 된다.

$$\begin{aligned} r_{g_2} &= 1 \text{ (if } C_{g_2} < C_{g_1} \text{)} \\ r_{g_2} &< 1 \text{ (if } C_{g_2} \geq C_{g_1} \text{)} \end{aligned} \quad \text{식(2-4)}$$

여기에서 g_1 은 현세대 g_2 는 미래세대를 의미한다.

식(2-4)가 의미하는 바는 미래 세대의 효용은 할인하여 합산하되 현재보다 미래 세대가 가난할 경우에는 할인하지 않는다는 것이다.

$\lambda = 1$ 일 경우 식(2-3)은 Chichilinsky 교수와 동료들이 제안한 녹색황금률(green golden rule) 사회후생함수(Chichilinsky et al., 1995)가 된다. 이는 현세대의 효용은 고려하지 않고($\lambda = 1$) 미래의 지속 가능성만을 고려함을 의미한다.

마지막으로 $0 < \lambda < 1$ 일 경우 Chichilinsky 교수의 지속 가능한 선호 사회후생함수가 된다. 이는 현세대의 효용과 미래의 지속 가능성을 동시에 고려함을 의미한다.

위의 내용을 정리하면 <표 2-4>와 같다.

〈표 2-4〉 지속 가능성 관련 사회후생함수

구분	λ	r	비고
할인율을 적용한 공리주의	$\lambda=0$	$r<1$	식(2-4) 적용
고전적 공리주의		$r=1$	
지속 가능한 할인율을 적용한 공리주의		$r=1$ 또는 $r<1$	
녹색황금률	$\lambda=1$	$0\leq r\leq 1$	
지속 가능한 선호	$0<\lambda<1$	$0\leq r\leq 1$	

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

할인율을 적용한 공리주의 사회후생함수를 기후경제통합-지역평가모형에 적용한 연구들은 〈표 2-3〉에서 제시한 바와 같으며 지역구분이 없는 기후경제통합모형들도 대부분 할인율을 적용한 공리주의 사회후생함수를 적용하고 있다(Cline, 1992; Manne and Richels, 1992; Nordhaus, 2008). 고전적 공리주의 사회후생함수를 사용한 연구들은 주로 비교를 위한 목적으로 수행되었으며 FUND 모형을 활용한 Richard Tol 교수의 연구가 이에 속한다(Tol, 1999). 지속 가능한 할인율을 적용한 공리주의를 사용한 사례는 DICE 모형을 활용한 런던정경대(London School of Economics and Social Sciences) Simon Dietz 교수와 Geir Asheim 교수의 연구가 있다(Dietz and Asheim, 2012). 기후경제모형과 관련하여 녹색황금률을 적용한 연구는 아직 없다.

2) 형평성 관련 사회후생함수

두 번째로 형평성과 관련하여 사회후생함수를 일반화하면 식(2-5)와 같다. 이 식은 Richard Tol 교수 연구그룹이 제안한 불평등 회피(inequality aversion) 사회후생함수(Fankahuser et al., 1997; Tol, 2001)를 일반화한 것이다. 이때 Tol 교수 연구그룹이 제안한 사회후생함수에는 이 식과 달리 가중치 항목(ω_j)이 없다. 한편 기후경제통합-지역평가모형에서 협력적 게임의 결과를 산출하기 위해서는 전 지구의

사회후생함수를 계산할 필요가 있는데 식(2-5)는 이를 일반화한 것이라고도 할 수 있다.

$$W_{global} = \begin{cases} \sum_{j=1}^J \omega_j \frac{W_j^{1-\phi}}{1-\phi} & \text{if } \phi \neq 1 \\ \prod_{j=1}^J \omega_j W_j & \text{if } \phi = 1 \end{cases} \quad \text{식(2-5)}$$

여기서 j 는 지역($j=1, 2, \dots, J$), W_j 는 지역별 사회후생함수, ϕ 는 불평등 회피(inequality aversion) 정도, $\omega_j \geq 0$ 는 지역별 가중치를 의미한다. 이때 ω_j 가 모두 0일 수는 없으며, ϕ 가 커질수록 불평등을 회피하려는 경향이 더 커진다.

식(2-5)에서 모든 j 에 대해 $\omega_j=1$ 이면 Richard Tol 교수 연구그룹이 제안한 불평등 회피 사회후생함수 형태가 되는데, 불평등을 싫어하는 정도에 따라 다양한 형태의 사회후생함수가 도출된다. 예를 들어 $\phi=0$ 이면 식(2-5)는 개별 지역의 사회후생함수를 단순 합산한 형태가 되고(공리주의 가중치 유형), $\phi=1$ 이면 개별 지역의 사회후생함수를 곱한 형태인 Bernouilli-Nash 유형의 사회후생함수가 된다(Tol, 2001). ϕ 가 양의 방향으로 무한히 커지면($\phi \uparrow \infty$) 전 지구 사회후생함수는 $W_{global} = \min(W_j)$ 가 되는데, 이는 가장 가난한 지역의 후생을 최우선으로 고려하는 John Rawls의 사회후생함수(maximin approach) 형태가 된다(Rawls, 1974). 반대로 ϕ 가 음의 방향으로 무한히 커지면($\phi \downarrow \infty$) $W_{global} = \max(W_j)$ 가 되어 가장 부유한 지역의 후생을 최우선으로 고려하는 사회후생함수가 된다(maximax approach).

$\omega_j \neq 1$ 이면서 $\phi=0$ 인 경우 전 지구 사회후생함수는 가중치를 이용한 지역별 사회후생함수의 합산이라고 할 수 있는데, 가중치의 경우 경제학에서는 일반적으로 Takashi Negishi 교수가 제안한 방식을 사용하고 있다(Negishi, 1960).

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

위의 내용을 정리하면 <표 2-5>와 같다.

〈표 2-5〉 형평성 관련 사회후생함수

구분	ω_j	ϕ	비고
Tol 유형	$\omega_j = 1$	$\phi \geq 0$	일반적인 형태
공리주의 가중치 유형		$\phi = 0$	-
Bernouilli-Nash 유형		$\phi = 1$	-
Maximin approach		$\phi \uparrow \infty$	-
Maximax approach		$\phi \downarrow \infty$	-
Negishi 가중치 유형*	$0 \leq \omega_j < 1$	$\phi = 0$	-
기타		$\phi \neq 0$	$\omega_j = 1$ 인 경우와 유사하게 분류가능 (단, 지역별로 다른 ω_j 적용)

주: 정의상 $0 \leq \omega_j \leq 1$ 이기 때문에 위의 분류는 가능한 모든 범위를 포함한다. * 편의상 〈표 2-5〉에서 Negishi 가중치 유형은 Negishi process를 포함하여 지역별로 다른 가중치를 적용하는 경우를 통칭한다.

기후경제통합평가모형과 관련하여 개별 지역의 후생을 단순 합산하는 공리주의 가중치 형태($\omega_j = 1, \phi = 0$)는 CRED, GRAPE, FUND 모형에서 적용되었으며, Bernouilli-Nash 유형의 사회후생함수($\omega_j = 1, \phi = 1$)는 Richard Tol 교수가 비교를 위한 목적으로 적용한 바 있다(Tol, 2001). 또한, Maximin 사회후생함수($\omega_j = 1, \phi \uparrow \infty$)는 예일 대학교 John Roemer 교수가 적용한 바 있으며(Roemer, 2011), Negishi 가중치를 이용한 사회후생함수는 RICE, MERGE, CETA-M, AIM/Dynamic, AD-RICE 모형 등에서 적용되었다. 한편 Maximax 사회후생함수($\omega_j = 1, \phi \downarrow \infty$)를 적용한 연구는 없다.

3) 불확실성 관련 사회후생함수

가) 기대효용(Expected utility)이론

자연이나 사회경제현상에 대한 이해가 부족하여 모형에 입력되는 모수 값이 확률 분포 형태로 주어지거나(parametric uncertainty) 어떤 변수 값이 무작위로 변동하여(random variation) 정확한 예측이 불가능할 경우(stochasticity) 모수나 확률변수가 취하는 값에 따라 모형이 산출하는 결과는 크게 달라진다. 이 경우 경제학에서는

일반적으로 기대효용이론(von Neumann and Morgenstern, 1944)에 근거해 현상을 분석해 왔다. 기대효용이론에 근거한 사회후생함수는 가능한 한 일어날 수 있는 모든 경우(state of the world)를 고려하여 정책을 결정하되 식(2-6)과 같이 개별 경우에 발생하는 사회후생(W_s)의 기댓값(expected value)을 사회후생함수로 선택하는 방식이다.

$$W = \varepsilon [W_s] = \sum_{s=1}^S p_s W_s \quad \text{식(2-6)}$$

여기에서 $s(=1, 2, \dots, S)$ 는 모수 또는 확률 변수가 취할 수 있는 상태, p 는 상태별 확률, ε 는 기댓값을 산출하는 연산자이다. 이때 모든 s 에 대해 $0 \leq p_s \leq 1$ 이며 $\sum_{s=1}^S p_s = 1$ 이다. 변수가 취할 수 있는 상태가 연속적일 경우 합기호(Σ) 대신 적분기호(\int)를 사용한다.

한편, Allais 역설에서 잘 드러나듯 실제 사람들의 선택과 기대효용이론의 예측 내용이 부합하지 않는 경우들이 있는데 이러한 이유로 경제학에서는 대안적인 정책 결정 이론들이 꾸준히 제기되어 왔다. Allais 역설 및 대안적인 기준들을 포함하여 불확실성 하에서의 정책결정 이론에 관한 더욱 자세한 내용은 Eeckhoudt et al.(2005)과 Bikhchandani et al.(2013) 등을 참고할 수 있다. 이하에서는 기후경제 통합모형에 적용되었던 사례를 중심으로 대안적인 사회후생함수의 내용을 살펴본다.¹⁶⁾

16) 정책결정 이론에서는 불확실성(Knightian)을 risk와 uncertainty로 구분하여 사용해 왔다. 구체적으로 특정 변수에 대해 객관적 확률분포가 존재하는 경우를 risk라고 하며 반대로 객관적인 확률분포가 존재하지 않는 경우 uncertainty라고 한다. Ellsberg(1961)는 간단한 실험을 통해 사람들이 uncertainty (또는 모호한) 경우를 risk의 경우보다 더 싫어한다는 것을 보였는데 이러한 경향을 모호성 회피(ambiguity aversion)라고 한다. Knight의 구분에 따른 uncertainty가 존재하는 경우 기대효용이론의 뼈대라 할 수 있는 독립성 명제(independence axiom)가 위반될 수 있다. 많은 연구가 이에 대한 합리적인 설명을 시도해 왔는데 이번 연구에서는 기후경제학 문헌에서 다른 내용을 중심으로 살펴 보았다. 관련하여 이러한 배경을 설명할 필요성을 제기해 주신 익명의 감사위원에게 감사드린다.

나) Epstein-Zin 효용함수

Frank Ackerman 박사와 동료들은 미국 보스턴 대학(Boston University) Larry Epstein 교수와 미국 뉴욕 대학(New York University) Stanley Zin 교수가 제안한 다음과 같은 효용함수(Epstein and Zin, 1989)를 DICE 모형에 적용한 바 있다 (Ackerman et al., 2013b).

$$U_t = \left[(1-\beta) C_t^\rho + r(\varepsilon_t U_{t+1}^\eta)^{\rho/\eta} \right]^{1/\rho} \quad \text{식(2-7)}$$

여기에서 t 는 시간, $\rho = (\sigma-1)/\sigma \neq 0$, σ 는 세대 간 대체소비탄력성(elasticity of substitution)을 의미한다. 다른 기호들은 앞선 식들과 같다.

Epstein-Zin 효용함수는 기대효용이론 효용함수와 달리 시간에 대한 선호와 위험에 대한 선호가 미치는 영향을 분리해서 살펴볼 수 있다는 장점이 있다. 또한, Epstein-Zin 효용함수는 $\eta = \rho$ 일 때 기대효용이론 효용함수와 같아진다는 점에서 기대효용이론 효용함수를 일반화한 것이라고도 할 수 있다(Epstein and Zin, 1991).¹⁷⁾

다) 모호성 회피

런던정경대 Antony Millner 박사 연구그룹은 미국 노스웨스턴 대학(Northwestern University) Peter Klibanoff 교수 연구그룹이 제안한 다음과 같은 모호성 회피(ambiguity aversion) 사회후생함수(Klibanoff et al., 2005)를 DICE 모형에 적용한 바 있다(Millner et al., 2013).

$$W = \int_{\Delta} \psi \left[\int_S U(f) d\pi \right] d\tau \quad \text{식(2-8)}$$

17) 엄격한 의미에서 나) 소절의 내용은 사회후생함수라기보다는 효용함수에 관한 내용이다. 그러나 사회 후생함수는 효용함수를 인수(argument)로 하는 함수이기 때문에 넓게 보면 나) 소절의 내용은 Epstein-Zin 효용함수를 사용한 사회후생함수를 다룬다고도 볼 수 있다. 이를 구분할 필요성을 제기해 주신 익명의 감수위원에게 감사드린다.

여기서 S 는 모형의 변수가 취할 수 있는 공간(state space), π 는 S 에 대한 확률분포(distribution function), f 와 ψ 는 실수 값을 갖는 함수(real-valued function), Δ 는 π 의 집합, τ 는 의사결정자가 가진 Δ 에 대한 주관적 사전 지식(또는 확률분포)(subjective prior distribution)을 의미한다. 다른 기호들은 앞선 식들에서와 같다.

모호성 회피 사회후생함수가 말하고자 하는 바는 기대효용이론에서 가정하는 것과 달리 의사결정자는 불확실한 변수에 대해 정확하고 객관적인 지식을 갖고 있지 않다는 점이다. 예를 들어 2100년의 지구평균기온이 불확실하여 a (예를 들어 2.5°C)와 b (예를 들어 1.0°C)를 각각 평균과 표준편차로 갖는 확률분포 형태로 전망된다고 하자. 만일 우리가 확률분포의 모수인 a 와 b 를 정확히 (객관적으로) 알고 있다면, 우리는 기대효용이론에 따른 사회후생함수를 적용할 수 있다. 그러나 a 와 b 에 대한 우리의 지식이 정확한 값이 아니라면, 예를 들어 a 와 b 역시 불확실하여 별도의 확률분포를 갖는 경우 기대효용이론에 따른 사회후생함수[식(2-6)]를 적용하기 어렵다. 최근 기후변화 불확실성과 관련하여 비용편익분석에 대한 비평으로 유명한 하버드 대학(Harvard University) Martin Weitzman 교수가 말하는 구조적 불확실성(structural uncertainty) 또는 심층 불확실성(deep uncertainty)이 의미하는 바가 이것이라고 할 수 있다(Weitzman, 2009). 모호성 회피 사회후생함수는 이럴 경우 의사결정자가 가진 사전 지식의 불확실성 역시 확률분포로 표현하며 그것에 대한 기댓값을 한 번 더 계산하도록 하고 있다. 이러한 사회후생함수에서는 의사결정자의 사전지식이 불확실한 정도에 대한 의사결정자의 태도를 모호성 회피 정도라고 한다.

라) Minimax 후회

David Anthoff 교수와 Richard Tol 교수는 Leonard Savage의 다음과 같은 Minimax regret 사회후생함수(Savage, 1951)를 FUND 모형에 적용한 바 있다(Anthoff and Tol, 2014b). 정의상 이 사회후생함수는 의사결정자가 가질 수 있는

최대의 후회(손실)를 최소화하도록 정책을 선택하게 한다.

$$W = \text{Min}_{s \in S} [\text{Max}_{z \in Z} R(z, s)] \quad \text{식(2-9)}$$

$$R(z, s) \equiv D(z, s) - D^*(z^*, s)$$

여기서 R은 의사결정자가 갖는 후회(손실)를 표현하는 함수로서 주어진 상태 s에서 특정 정책 z를 선택할 경우 발생하는 비용 D(z, s)와 주어진 상태 s에서의 최소 비용 D*(z*, s)의 차이로 정의한다. S와 Z는 각각 상태변수와 정책변수가 가질 수 있는 값들의 집합(state space)을 의미하고 *는 최적값을 나타낸다. Min과 Max는 각각 최솟값과 최댓값을 찾는 연산자이다.¹⁸⁾

마) 기타

기대효용이론이 아닌 다른 방식으로 의사결정방식을 살펴본 다른 연구들에는 프린스턴 대학(Princeton University) Daniel Kahneman 교수와 Amos Tversky가 제안한 전망이론(prospect theory)(Kahneman and Tversky, 1979), 호주 퀸즐랜드 대학(University of Queensland) John Quiggin 교수가 제안한 서열의존 기대효용(rank-dependent expected utility) 이론(Quiggin, 1982) 등이 있는데, 아직 기후경제통합평가모형에 적용된 바는 없다.¹⁹⁾

라. 경제성장 모듈

1) 신고전주의 경제성장 모형

경제학에서 주로 사용하고 있는 경제성장 이론은 Frank Ramsey, Tjalling Koopmans,

18) 앞서 형평성을 고려한 사회후생함수 유형들에서 살펴보았던 Maximin 사회후생함수와 Maximax 사회후생함수도 이와 유사한 방식으로 정의한 함수들이라고 할 수 있다.

19) 엄밀한 의미에서 이러한 이론들은 사회후생함수를 정의하는 이론은 아니지만 사회후생함수에 반영할 수는 있을 것이다.

David Cass, 매사추세츠 공대(Massachusetts Institute of Technology) Robert Solow 교수 등의 신고전주의(neoclassical) 경제성장 모형(Ramsey, 1928; Solow, 1956; Koopmans, 1965; Cass, 1965)에 기초하고 있다.²⁰⁾ 신고전주의 경제성장 이론은 수학적으로 잘 정의된 생산함수(production function), 소비와 투자의 선택에 따른 자본축적(capital accumulation) 과정, 인구와 기술의 성장, 완전경쟁(competitive economy) 체제에서 기업과 가정의 합리적 선택 등을 기본 가정으로 한다(Romer, 2006).

기후경제통합-지역평가모형에서도 대부분 신고전주의 경제성장 모형을 적용하고 있는데 일반적인 형태는 식(2-10), (2-11)과 같다.

$$\max_{\{c_t\}_{t=0,1,\dots,T}} W = \sum_{t=0}^T r_t L_t U(c_t) \quad \text{식(2-10)}$$

$$K_{t+1} = (1 - \delta)K_t + I_t = (1 - \delta)K_t + Y_t - C_t \quad \text{식(2-11)}$$

여기서 L은 인구, c는 1인당 소비(=C/L), K는 자본, I는 투자, Y는 생산, δ 는 감가상각률(depreciation rate)을 의미한다. 다른 기호들은 앞선 식들에서와 같다.

일반적으로 사회적 선택을 다루는 경제 모형에서는 사회의 선택을 대표하는 의사결정자가 존재함을 가정한다. 또한, 시기별 효용은 분리 가능함(separability)을 가정한다. 기후경제모형에서도 이러한 가정을 사용한다. 목적함수(objective function)로서 식(2-10)은 이러한 의사결정자가 사회의 효용함수, 선호체계, 인구 수준 등을 반영하여 사회후생을 최대화하기 위해 시기별 소비와 투자 수준을 결정함을 의미한다. 식(2-10)에서는 할인된 공리주의 사회후생함수를 적용했지만 앞서 살펴본 다른 사회후생함수를 적용할 수도 있다. 또한, 식(2-10)에서는 인구 수준이 가중된 형태로 사회후생함수를 정의했지만, 미국 마이애미 대학(University of

20) 독자의 편의를 위해 이번 보고서에서는 최대한 연구자의 소속을 밝히려고 하였으나 작고한 연구자의 경우에는 소속을 밝히지 않았다.

Miami) David Kelly 교수와 캘리포니아 샌타바버라 대학(University of California, Santa Barbara) Charles Kolstad 교수의 연구(Kelly and Kolstad, 1999b)에서처럼 인구수를 고려하지 않고 사회후생함수를 정의하는 경우($W = \sum_{t=0}^T r_t U$)도 있다.

자본축적 함수로서 식(2-11)은 생산된 것 중 소비하고 남은 부분은 미래를 위해 투자하고 이러한 과정에서 자본이 축적되어 감을 의미한다. 이때 자본의 일부는 감가 상각된다.

2) 생산함수

기후경제통합평가모형에서 생산함수는 대체로 자본과 인구를 생산요소로 하며 기술수준에 따라 생산량이 변하는 형태로 정의한다. 또한, 생산함수는 수학적으로 규모수익불변(constant returns to scale), 한계생산체감(diminishing marginal product), Inada 조건(Inada, 1964) 등을 만족하는 것으로 가정한다. 대표적인 예가 식(2-12)와 같은 Cobb-Douglas 생산함수이며 이는 다음에 살펴볼 CES 생산함수의 하나의 유형이다.

$$Y_t = A_t F(K_t, L_t) = A_t K_t^\alpha L_t^{(1-\alpha)} \quad \text{식(2-12)}$$

여기서 F는 생산함수, A는 총요소생산성(total factor productivity), α 는 총소득에 대한 자본의 기여율을 의미한다. 기술 수준은 식(2-12)에서처럼 $Y = AF(K, L)$ 의 형태로 반영할 수도 있지만(Hicks-neutral), $Y = F(K, AL)$ 에서처럼 인구에 곱하는 형태(Harrod-neutral)와 $Y = F(AK, L)$ 에서처럼 자본에 곱하는 형태로 반영할 수도 있다.

한편 에너지 모형에서 출발한 기후경제통합평가모형의 경우 에너지 서비스를 생산요소의 하나로 고려하고 있는데, 이 경우 대체로 식(2-13)과 같은 CES 생산함수를 사용한다.

$$Y_t = A_t \left\{ \kappa \left[K_t^\alpha L_t^{(1-\alpha)} \right]^\nu + (1-\kappa) G_t^\nu \right\}^{1/\nu} \quad \text{식(2-13)}$$

여기서 G 는 에너지 서비스, κ 는 자본노동복합(capital-labor aggregate) 요소의 비율, ν 는 대체탄력성(ε)과 $\nu = (\varepsilon - 1)/\varepsilon$ 의 관계를 갖는 모수이다. 여기서 에너지 서비스는 CES 함수를 이용 다시 에너지원별로 세분될 수 있다.

대부분 기후경제통합평가모형에서 노동과 기술은 모형 내부의 연산 결과와는 별개로 식(2-14)와 같이 외부에서 결정된다(exogenous). 다만 개별 모형마다 이러한 식을 기초로 변형된 형태를 사용할 수 있는데, 예를 들어 인구전망을 위해서는 시그모이드(sigmoid) 함수를 사용할 수도 있다.

$$\begin{aligned} L_t &= L_0 e^{nt} \\ A_t &= A_0 e^{gt} \end{aligned} \quad \text{식(2-14)}$$

여기서 n 과 g 는 각각 인구와 기술의 성장률을 의미한다.

기후경제통합평가모형에서 저축률은 대체로 총생산에 대한 투자의 상대적 규모로서 모형 내부에서 결정되지만, FUND 등 일부 모형에서는 중장기 경제성장 모형에서 저축률의 변동이 크지 않는다는 점을 이용 저축률을 상수로 고정하기도 한다.

〈표 2-6〉 기후경제통합-지역평가모형 경제성장 모듈

구분	유형	생산함수	생산요소
RICE	신고전주의	Cobb-Douglas	자본, 노동
FUND	신고전주의	외생변수	
WITCH	신고전주의	CES	자본노동복합, 에너지
MERGE	신고전주의	CES	자본노동복합, 에너지
CETA-M	신고전주의	CES	자본노동복합, 에너지
GRAPE	신고전주의	CES	자본노동복합, 에너지
AIM/Dynamic	신고전주의	CES	비에너지(자본, 노동, 중간재), 화석연료, 전력
CRED	신고전주의	Cobb-Douglas	자본, 노동
AD-RICE	신고전주의	Cobb-Douglas	자본, 노동
PAGE	외생변수	외생변수	-

주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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).

3) 기타 경제성장 모형

경제성장 모형 중에는 매사추세츠 공대 Peter Diamond 교수의 세대 간 중첩(overlapping generations)모형(Diamond, 1965), 시카고 대학(University of Chicago) Robert Lucas 교수, 뉴욕 대학 Paul Romer 교수, 하버드 대학 Gregory Mankiw 교수 등의 인적자본(human capital) 또는 기술발전(endogenous technological change) 모형 등(Lucas, 1988; Romer, 1990; Mankiw et al., 1992)이 있으나 아직 경험적 측면에서의 연구가 부족하여 본격적으로 기후경제모형에 적용하기에는 한계가 있다.²¹⁾

21) Richard Tol 교수와의 개인적인 의견교환(personal communication).

마. 기후 모듈

일반적으로 기후과학에서는 일반순환모형(general circulation model) 등과 같이 기후 시스템을 상세하게 표현하는 모형을 사용하고 있다(IPCC, 2014). 그러나 기후경제통합-지역평가모형에서는 경제모형과의 통합을 위해 기후모형을 최대한 단순화하여 모형에 포함시킨다. 이때 기후경제통합-지역평가모형의 기후모듈에 사용되는 모수 값들은 복잡한 기후과학 모형의 결과에 비추어 바로잡는 작업을 거치게 된다. 현재 기후경제통합-지역평가모형에서는 일반적으로 대기 중으로 배출된 온실가스의 순환에 관한 모형(carbon cycle model)과 기온변화에 관한 모형(temperature response model)을 포함하고 있으며 최근에는 해수면 상승에 관한 모형(sea level rise model)을 다루는 모형들도 생겨나고 있다.

1) 탄소순환 모형

탄소순환모형은 대기 중에 배출된 온실가스가 생물권, 해양(천해와 심해) 등으로 순환하는 과정을 모형화한 것이다. 단순한 형태의 기후경제통합-지역평가모형에서는 대기 중 온실가스 농도만을 반영하기도 하지만 더 복잡한 형태에서는 온실가스가 머무르는 공간을 3개 또는 5개의 층으로 구분하기도 한다. 3개의 층으로 이루어진 RICE 모형을 예로 들면 탄소순환모형은 식(2-15)와 같다.

$$\begin{aligned}
 M_{AT,t} &= E_t + \zeta_{11}M_{AT,t-1} + \zeta_{21}M_{UP,t-1} \\
 M_{UP,t} &= \zeta_{12}M_{AT,t-1} + \zeta_{22}M_{UP,t-1} + \zeta_{32}M_{LO,t-1} \\
 M_{LO,t} &= \zeta_{23}M_{UP,t-1} + \zeta_{33}M_{LO,t-1}
 \end{aligned}
 \tag{2-15}$$

여기서 M은 매체별 총 탄소량(carbon stock), E는 대기 중 온실가스 배출량을 의미하고, AT, UP, LO는 각각 대기(atmosphere), 천해(upper ocean), 심해(lower ocean)를 의미한다. ζ 는 매체 간 탄소순환계수를 나타낸다.

2) 기온변화 모형

기온변화 모형은 지구평균기온이 대기 중 온실가스 농도에 따라 변화되는 정도를 모형화한 것이다. 현재 기후경제통합-지역평가모형에서 사용되고 있는 기온변화 모형은 <그림 2-2>와 같은 에너지 균형모형(energy balance model)에서 출발한 것으로(Marten, 2011), 단순한 형태에서는 대기 평균기온만을 모형화하지만 더 복잡한 형태에서는 2개 또는 그 이상으로 층을 구분하여 평균기온을 표현한다.

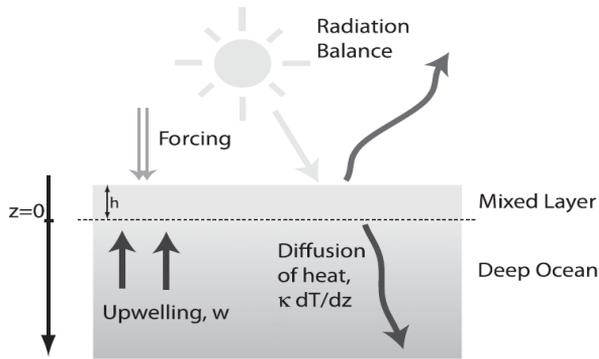


그림 출처: Baker and Roe(2009: 4576).

<그림 2-2> 에너지 균형모형

대기(또는 혼합층)와 해양(또는 심해) 2개의 층으로 구분한 RICE 모형을 예로 들면 기온상승모형은 식(2-16)과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{AT,t} &= T_{AT,t-1} + \xi_1 \{ RF_t - \xi_2 T_{AT,t-1} - \xi_3 [T_{AT,t-1} - T_{LO,t-1}] \} \\
 T_{LO,t} &= T_{LO,t-1} + \xi_4 [T_{AT,t-1} - T_{LO,t-1}]
 \end{aligned}
 \tag{2-16}$$

여기서 T는 지구평균기온, RF는 복사강제력(radiative forcing)을 의미한다. ξ는 에너지 균형모형에서 산출된 모수이다.

복사강제력은 지구대기 평균기온의 변화를 유발하는 물질들(온실가스, 구름, 수증기, 에어로졸 등)이 지구 에너지 수지 변화에 미치는 영향으로 정의할 수 있으며, 일반적으로 기후경제통합-지역평가모형에서는 식(2-17)과 같이 복사강제력을 산출하고 있다.

$$RF_t = \chi \{ \log_2 [M_{AT,t} / M_{AT,1750}] \} + RF_{EX,t} \quad \text{식(2-17)}$$

여기서 RF_{EX} 는 온실가스 이외의 물질로 인한 복사강제력을 의미하며, χ 는 온실가스 농도를 복사강제력으로 전환해주는 계수이다.

3) 해수면 상승 모형

기후경제통합-지역평가모형에서 해수면 상승을 모형화하는 방식은 지구평균기온 상승에 따른 총 해수면 상승 민감도를 이용해 산출하는 형태에서부터 해수면 상승 원인별로 해수면 상승 정도를 산정해 모두 합산하는 형태로 구분할 수 있다. 예를 들어 RICE 모형에서는 IPCC 평가보고서에 근거해 해수면 상승 원인을 열팽창(thermal expansion), 빙하 및 만년설(glaciers and small ice caps), 그린란드(Greenland), 남극의 빙상(ice sheet) 등 크게 4가지로 구분하고 있다. 이하에서는 이를 크게 열팽창과 해빙 두 가지로 구분하여 살펴볼 것이다.

가) 열팽창

열팽창에 따른 해수면 상승은 물의 밀도가 온도의 함수라는 점에서 기인한다. 구체적으로 열팽창에 따른 해수면 상승을 전망하기 위해서는 먼저 기온상승에 따른 장기(long-run) 해수면 상승 민감도를 산정해야 한다. 이때 기온상승에 따른 장기 해수면 상승 민감도는 지구평균기온이 1°C 상승할 때 해수면이 상승하는 정도를 의미하며 기후경제통합-지역평가모형에서는 대체로 기후과학 모형에서 산출한 해

수면 상승 민감도 결과를 사용한다. 다음으로 식(2-18)과 같이 장기 해수면 상승에 대한 통계적 조정(adjustment process)을 통해 시기별(transient) 해수면 상승을 산출한다.

$$\begin{aligned} SLR_{TEt} &= SLR_{TEt-1} + \zeta_{SLR}^{TE} \{SLR_{TEt}^* - SLR_{TEt-1}\} \\ SLR_{TEt}^* &= \lambda_{SLR}^{TE} T_{AT,t} \end{aligned} \quad \text{식(2-18)}$$

여기서 SLR_{TE} 은 열팽창에 따른 해수면 상승, SLR_{TE}^* 은 기온상승에 따른 장기 해수면 상승을 의미한다. λ_{SLR}^{TE} 과 ζ_{SLR}^{TE} 은 통계적 조정을 위한 모수로 지구시스템 모형(Earth system model)에서 산출된 결과를 활용한다.²²⁾

나) 해빙

대륙 빙하와 만년설, 그린란드 빙상, 남극 빙상 등의 붕괴에 따른 해수면 상승은 해빙속도가 결정적 요소이며, 해빙속도는 총 빙하의 양, 남은 빙하의 양, 초기 해빙 속도, 지구평균기온 등에 따라 달라진다. 이를 일반화하면 식(2-19)와 같다.

$$\begin{aligned} SLR_{ISi,t} &= SLR_{ISi,t-1} + MR_{i,t-1} \\ MR_{i,t} &= \tau_{MR} MR_{i,0} (RI_{i,t} / TI_i) (T_{AT,t} - T_{AT}^*) \\ SLR_{IS,t} &= \sum_i SLR_{ISi,t} \end{aligned} \quad \text{식(2-19)}$$

여기서 SLR_{ISi} 는 원인별(i) 해빙에 따른 해수면 상승, MR은 해빙속도, TI는 해수면 상승 높이로 환산된 총 빙하의 양, RI는 해수면 상승 높이로 환산된 남은 빙하의 양($RI = TI - SLR$), τ_{MR} 는 시간 보정 계수, T_{AT}^* 는 평형상태 지구평균기온을 의미한다.

22) 통계적 조정을 위해 RICE 모형에서는 first-order adjustment process를 사용했다.

SLR_{IS} 는 해빙에 따른 총 해수면 상승을 나타낸다.

마지막으로 총 해수면 상승은 다음과 같이 열팽창으로 인한 상승과 해빙으로 인한 상승을 합하여 산출한다.

$$SLR_t = SLR_{TE,t} + SLR_{IS,t} \quad \text{식(2-20)}$$

4) 기후경제통합-지역평가모형에서 사용된 기후모듈

현재 기후경제통합-지역평가모형에서는 <표 2-7>에서 나타난 것처럼 모형에 따라 1~5개의 박스로 탄소순환을 표현하고 있다. 구체적으로 RICE, WITCH, CRED, AD-RICE 모형은 전 지구 모형인 DICE(Nordhaus, 2008) 모형의 기후모듈을 기반으로 하여 3개의 박스로 탄소순환을 모형화한다. FUND와 MERGE 모형의 경우에는 독일 막스플랑크연구소(Max-Planck Institute) Maier-Reimer 교수와 Hasselmann 교수가 제시한 5개의 박스로 된 충격반응함수(impulse response function)를 기본 모형으로 사용하고 있다(Maier-Reimer and Hasselmann, 1987). 나머지 모형들은 대기만으로 구성된 탄소순환모형을 사용하고 있다.

기온변화의 경우에는 DICE 모형의 기후모듈을 기반으로 한 모형들은 2개의 박스(대기, 심해)로 기온변화를 모형화하며 다른 모형들은 대기평균기온만을 표현한다.

해수면 상승의 경우 RICE와 AD-RICE 모형은 3~4개의 원인별로 모형화하고 FUND, GRAPE, PAGE 모형은 총 해수면 상승만을 산출한다. 나머지 모형들에서는 해수면 상승을 반영하지 않는다.

〈표 2-7〉 기후경제통합-지역평가모형 기후모듈 세분화 정도 비교

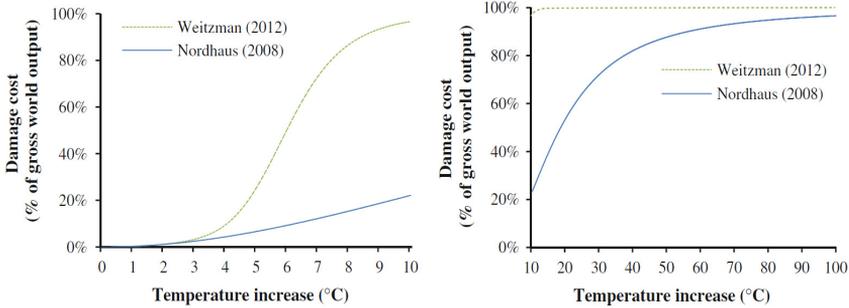
구분	탄소순환	기온변화	해수면 상승
RICE	3	2	4
FUND	5	1	1
WITCH	3	2	없음
MERGE	5	1	없음
CETA-M	1	1	없음
GRAPE	1	1	1
AIM/Dynamic	1	없음	없음
CRED	3	2	없음
AD-RICE	3	2	3
PAGE	없음	1	1

주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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).

바. 기후영향 및 정책 모듈

1) 기후변화 피해비용

기후변화 경제 분석과 관련하여 가장 큰 관심과 함께 논쟁이 되고 있는 부분은 기후변화 피해비용이다(Weitzman, 2012; Tol, 2009, 2013). 대표적으로 <그림 2-3>에 나타난 바와 같이 Nordhaus 교수와 Weitzman 교수의 피해비용함수는 3°C 이상의 기온상승에 대해 상당한 차이를 보인다.



자료: Hwang et al.(2013a), p.429.

〈그림 2-3〉 기후변화 피해비용함수

이처럼 저명한 두 경제학자의 피해비용함수가 크게 다른 것은 인류의 기록 역사상 3°C 이상의 기온 상승을 경험한 바가 없기 때문이다. 물론 <그림 2-3>에서 확인할 수 있듯이 3°C 이내의 기온상승에 대한 피해비용함수는 거의 일치한다. 이는 소규모 기온상승에 대해서는 피해비용함수가 비교적 정교한 경제 분석에 기초해 산출되고 있기 때문이다.

평균과 같은 대표 값만을 고려하는 분석에서는 지구평균기온이 2100년까지 대체로 3°C 이내로 유지될 것으로 전망되기 때문에(Nordhaus, 2013) 피해비용함수의 차이에 따른 모형 산출 결과의 차이는 크지 않을 수 있다. 그러나 불확실성을 고려한 분석에서는 어떤 피해비용함수를 적용하느냐에 따라 결과 값은 상당한 차이를 보인다(Hwang et al., 2013a, 2016). 이에 최근 기후변화 경제학에서는 가능한 피해비용함수를 모두 적용한 후 그 결과를 비교하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

기후경제통합-지역평가모형에서는 지역별로 피해비용함수의 형태를 정하고 모수 값들을 추정해야 한다. 이때 Nordhaus 교수와 Weitzman 교수의 피해비용함수를 포함하여 기후변화 경제학에서 주로 사용하고 있는 피해비용함수는 다음과 같은 고차 다항 함수(polynomial function) 형태이다. 물론 일부 학술 연구에서는 지수함수(exponential function)와 같이 다른 형태의 함수를 사용하기도 한다(Bartz and Kelly, 2008).

$$\Omega_t = 1 / (1 + \beta_1 T_{AT,t} + \beta_2 T_{AT,t}^2 + \beta_3 T_{AT,t}^{\beta_4}) \quad \text{식(2-21)}$$

여기서 Ω 는 피해비용함수로 $(1-\Omega) \times 100\%$ 가 기후변화 피해 비용(총생산 대비 %)에 해당한다. β 는 피해비용 함수의 모수이다. RICE 모형 피해비용함수의 기초가 되는 Nordhaus 교수의 피해비용함수에서는 $\beta_1 = \beta_3 = 0$ 이다. $(1-\Omega)$ 에 총생산을 곱하면 총 피해비용이 산출되는데 이와 같은 방식을 곱(multiplicative)의 방식이라고 한다. 한편 Weitzman 교수는 합(additive)의 방식을 사용한 피해비용함수를 제안하기도 했다(Weitzman, 2010).

기후변화 피해비용을 추정하기 위한 본격적인 연구는 1990년대 초반 Nordhaus 교수에 의해 시작되었다. 구체적으로 Nordhaus 교수는 DICE 모형을 개발하는 과정에서 미국을 대상으로 농업, 에너지, 해안침식, 기상재해, 질병 등 다양한 부문에 대한 기후변화 피해비용을 추정하였으며 이를 바탕으로 식(2-21)과 같은 피해비용 함수를 산출하였다(Nordhaus, 1994a). Nordhaus 교수의 연구를 포함하여 현재까지 적용된 기후변화 피해비용 산출 방법은 대체로 열거적(enumerative) 접근법과 통계적(statistical) 접근법으로 구분할 수 있다(Tol, 2009, 2013). 열거적 접근법은 기후변화로 인한 물리적인 영향과 물리적 영향의 경제적 가치(가격)를 부문별로 추정하고 이를 합산하여 전체적인 피해비용을 산출하는 방식이다. 반면 통계적 접근법은 기후변화와 관련된 가격의 변화 또는 지출액 등 시장에서 관측된 정보를 바탕으로 기후변화가 후생에 미치는 영향을 추정하는 방식이다.²³⁾ 한편 비연속적 재난과 같이 불확실성이 큰 경우에는 Nordhaus 교수의 연구에서처럼 전문가 조사 방식을 사용하기도 한다(Nordhaus, 1994b).

현재 기후경제통합-지역평가모형에서는 <표 2-8>에 나타난 바와 같이 대부분 사회 전체의 총 피해비용을 지구평균기온의 함수로 나타내는 방식을 사용하고 있다.

23) 기후변화 피해비용 산출에 관한 문헌검토 및 방법론에 관한 더 자세한 내용은 Tol(2009, 2013)을 참고할 수 있다.

예외적으로 FUND와 PAGE 모형에서는 부문별로 피해비용을 개별적으로 산출하고 이를 모두 합산하는 방식을 사용한다. 또한, FUND 모형은 기후변화가 특정 연도의 경제활동에 미치는 영향(level of change)뿐만 아니라 경제성장률에 미치는 영향(rate of change)도 고려하고 있다.

〈표 2-8〉 기후경제통합-지역평가모형 기후변화 피해비용 함수

구분	함수형태	요소구분	세부 요소
RICE	다항함수	1	총 피해비용
FUND	다항함수 등	12	농업, 임업, 수자원, 에너지, 해수면 상승, 생태계, 보건(설사, 심장폐질환, 매개체전염병), 기상재해(태풍, 온대저기압), 질병 및 사망
WITCH	다항함수	1	총 피해비용
MERGE	다항함수	2	시장, 비 시장(nonmarket)
CETA-M	다항함수	1	총 피해비용
GRAPE	지수함수	1	총 피해비용
AIM/Dynamic	없음	-	-
CRED	다항함수	1	총 피해비용
AD-RICE	다항함수	1	총 피해비용
PAGE	다항함수	4	시장, 비시장, 해수면, 비연속적 재난

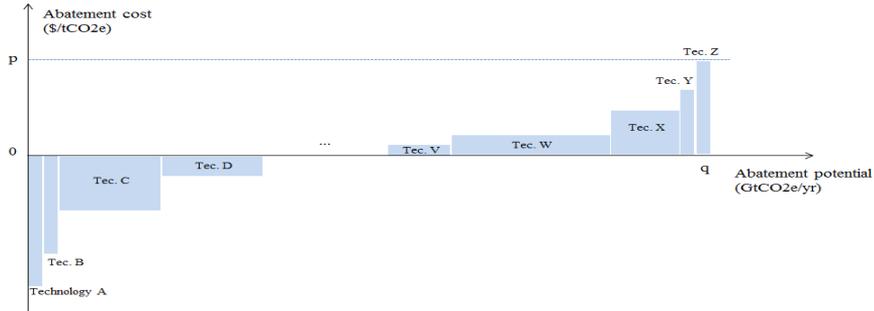
주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 자세한 내용은 다음의 문헌들에서 살펴볼 수 있다. RICE(Nordhaus, 2010), FUND(Anthoff and Tol, 2014a), MERGE(Manne and Richels, 2005), WITCH(Bosello and de Cian, 2014), CETA-M(Peck and Teisberg, 1999), GRAPE(Kurosawa, 2004), AIM/Dynamic(Masui et al., 2006), CRED(Ackerman et al., 2013a), AD-RICE(de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

2) 온실가스 감축비용

최적의 기후변화정책을 수립하기 위해서는 기후변화 피해비용과 더불어 온실가스 감축비용도 고려해야 한다. 경제학 이론에서 최적(optimal) 온실가스 감축량은 한계(marginal) 온실가스 감축비용과 한계 온실가스 피해비용이 일치하도록 하는 수준에서 결정된다(Pearce, 2005).

온실가스 감축비용은 일반적으로 <그림 2-4>와 같이 개별 기술요소들의 감축

잠재량과 단위 비용을 통해 산정한다.



〈그림 2-4〉 온실가스 감축비용곡선

〈그림 2-4〉에서 A, B, …는 감축 기술 요소, q는 총 온실가스 감축량, p는 q에 도달했을 때의 단위감축비용을 나타낸다. 개별 기술요소별로 가로 길이는 감축잠재량을 나타내며 세로 높이는 단위 감축비용을 나타낸다. 〈그림 2-4〉에서 감축비용이 음(-)인 기술들은 에너지 효율개선 등과 같이 사회적으로 보았을 때 비용보다는 기술로 인한 혜택이 더 많은 상황에 해당한다. 전 세계 및 지역별 온실가스 감축비용 곡선의 실제 예는 McKinsey & Company의 보고서를 참고할 수 있다(McKinsey & Company, 2009).

〈그림 2-4〉에서 나타난 바와 같이 온실가스 감축비용은 감축량이 많아질수록 감축비용이 더 높아지는 형태를 보인다. 이러한 사실을 반영하여 기후경제통합-지역평가모형에서는 대체로 식(2-22)와 같이 고차 다항식의 형태로 온실가스 감축비용을 모형화하고 있다.

$$A_t = \gamma_1 \mu_t + \gamma_2 \mu_t^{\gamma_3} \tag{2-22}$$

식(2-22)에서 보듯이 μ 는 온실가스 감축 비율($0 \leq \mu \leq 1$), Λ 는 총생산량 대비 온실가스 감축비용을 의미하며 γ 는 모수로서 일반적으로 $\gamma_2 > 0$ 이고 $\gamma_3 > 1$ 이다.

예외적으로 PAGE 모형에서는 온실가스별로 비선형함수를 이용 감축비용을 산정

하고 이를 합산하는 방식을 사용하고 있으며, WITCH 모형에서는 탄소 포획 및 저장(carbon capture and storage)에 따른 온실가스 감축비용을 산정하고 있다. MERGE 등 에너지 모형에 기초한 모형들에서는 직접적으로 온실가스 감축을 모형화하지 않고 있다.

〈표 2-9〉 기후경제통합-지역평가모형 기후변화 감축비용 합수

구분	합수형태	요소구분	세부 요소
RICE	다항합수	1	총 감축비용
FUND	다항합수	1	총 감축비용
WITCH	선형합수	1	탄소포획 및 저장
MERGE	없음	-	-
CETA-M	없음	-	-
GRAPE	없음	-	-
AIM/Dynamic	없음	-	-
CRED	다항합수	1	총 감축비용
AD-RICE	다항합수	1	총 감축비용
PAGE	비선형합수	4	온실가스별 감축비용

주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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).

3) 기후변화정책수단

기후변화정책수단은 온실가스 감축, 기후변화 적응, 연구투자를 통한 기술개발(에너지 효율개선, 재생가능 에너지 등 저탄소 에너지원 개발 및 보급) 등으로 구분할 수 있다. 현재 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서는 비용편익분석(cost-benefit analysis)을 통해 BAU(Business as usual) 대비 최적의 온실가스 감축량을 산출할 수 있도록 하고 있으나, MERGE, CETA-M, GRAPE, AIM/Dynamic 등 에너지 모형에 기초한 모형들에서는(외부에서 주어진) 목표 감축량을 달성하기

위한 최소의 비용을 찾는 비용효과분석(cost-effective analysis)을 수행하고 있다.

기후변화 적응을 고려한 모형으로는 FUND, PAGE, WITCH, AD-RICE 등이 있으며 에너지 분야 연구투자를 고려한 모형으로는 FUND, WITCH, CRED, AIM/Dynamic 등이 있다. 대부분 모형에서는 투자를 통해 결정되는 저축률이 별도의 정책변수로 사용되고 있으나 저축률을 고정하거나(FUND) 경제성장 과정을 외부 시나리오에 의존한 모형(PAGE)도 있다. 한편 FUND 모형의 경우 산림조성으로 인한 온실가스 흡수도 별도의 정책수단으로 다루고 있다.

〈표 2-10〉 기후경제통합-지역평가모형 정책수단

구분	감축	적응	연구투자	기타
RICE	○	-	-	저축률
FUND	○	○	○	산림조성
WITCH	○	○	○	저축률
MERGE	○	-	-	저축률
CETA-M	○	-	-	저축률
GRAPE	○	-	-	저축률
AIM/Dynamic	○	-	○	저축률
CRED	○	-	○	저축률
AD-RICE	○	○	-	저축률
PAGE	○	○	-	-

주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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).

사. 기타

1) 데이터 및 모수 조정(calibration)

기후경제통합-지역평가모형에서는 지역별로 초기연도 변수 값(initial value)과 경제 및 기후시스템의 변화를 결정하는 함수식(transitional equation)의 모수 값을

외부에서 결정해야 한다. 이때 모형별로 지역구분의 정도(J)와 세부 부문의 수(N)에 따라 데이터 요구량($J \times N$)과 모수 값을 결정하기 위한 조정 과정은 단일 지역을 다루는 기후경제통합평가모형에 비해 많이 늘어난다. 특히 불확실성과 학습효과까지 고려할 경우 수치모형의 해를 찾기 위한 계산 시간(solution time)은 지역구분과 세부 부문 구분의 수가 늘어남에 따라 기하급수적으로 증가하게 된다. 전산장치의 계산능력이 늘어나고는 있지만 이와 같은 차원의 저주(curse of dimensionality)가 존재하기 때문에 대체로 기후경제통합-지역평가모형들은 관심을 가지는 부분은 최대한 상세히 다루지만 기타 부문들에 대해서는 간략히 구현하는 경향이 있다. 물론 (특히 저개발국가의) 데이터 부족 및 낮은 신뢰성 등과 같은 제약으로 인해 모든 지역에 대해 앞서 살펴본 모든 요소를 고려한 수치 모형을 구현하는 것은 사실상 불가능하다.

현재 기후경제통합-지역평가모형에서는 대체로 경제모듈의 경우 세계은행(World Bank), 국제통화기금(International Monetary Fund), 유엔(United Nations)의 데이터 베이스와 미국 퍼듀 대학(Purdue University)의 Global Trade Analysis Project(GTAP) 데이터베이스 등에서 인구 및 사회경제활동에 관한 자료를 얻고 있으며, 국제 에너지 기구(International Energy Agency), 미국 에너지정보국(Energy Information Agency), 이산화탄소정보 분석센터(Carbon Dioxide Information Analysis Center), IPCC 등의 데이터베이스와 스탠퍼드 대학 에너지모델링포럼(Energy Modeling Forum) 자료 등에서 에너지 및 온실가스 자료를 얻고 있다. 기후모듈의 경우에는 영국 해들리센터(Hadley Center), 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration), IPCC 등에서 구축한 데이터베이스를 이용하고 있다. 이때 데이터 베이스별로 지역구분과 표출연도 등이 다르기 때문에 여러 통계기법을 활용하여 데이터를 모형의 지역구분과 시간구분에 따라 조정해야 한다.

또한 구축한 다년간의 지역별 데이터를 바탕으로 모형에서 사용하는 함수식의 모수들을 조정해야 한다. 경우에 따라서는 데이터를 바탕으로 함수식의 형태를 결정해야

한다. 이때 Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change(MAGICC), Energy system Models of Intermediate Complexities(EMICs), Integrated Model to Assess the Global Environment(IMAGE) 등 보다 복잡한 형태의 기후모델에서 산출된 결과를 이용하거나, IPCC 또는 에너지모델링포럼의 시나리오 결과 등을 이용해 모수를 조정하기도 한다.

〈표 2-11〉 기후경제통합-지역평가모형 기초 자료원

구분	인구	경제	에너지/온실가스	기후
RICE	UN	World Bank, IMF	EIA, CDIAC, EMF, IPCC	IPCC, MAGICC
FUND	EMF	EMF	US EPA, EMF	Various sources
WITCH	IMAGE	World Bank	Various sources	RICE
MERGE				
CETA-M	EMF	EMF	EMF	EMF
GRAPE				
AIM/Dynamic		GTAP	GTAP, IEA	
CRED	RICE	RICE, McKinsey	RICE	RICE, MAGICC
AD-RICE	RICE	RICE	RICE	RICE, EMICs
PAGE	IPCC	IPCC	IPCC	IPCC

주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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). 본래 문헌에서 자료원을 명확하게 제시하지 않은 경우 공란으로 두었다.

2) 알고리즘(solution algorithm)과 소프트웨어

일반적으로 기후경제통합-지역평가모형은 복잡한 비선형(nonlinear) 함수들로 구성되어 있기 때문에 이론적인 해(analytical solution)가 존재하지 않는다. 따라서 해를 구하기 위해서는 비선형함수들을 수치적으로 풀 수 있는 알고리즘과 효율적인 전산 소프트웨어가 필요하다.

기후경제통합-지역모형들을 풀기 위한 알고리즘은 협력게임(cooperative game)과 비협력게임(non-cooperative game)에 따라 달라진다. 협력게임은 의사결정자들이 공동의 문제를 해결하기 위해 상호 협력하는 것을 가정하는 것으로 비선형 프로그래밍(nonlinear programming)과 Negishi 가중치를 이용한 연산가능일반균형 기법(Rutherford, 1999) 등으로 계산할 수 있다. 비협력게임의 경우 Nash 균형 알고리즘 등 게임이론 기법을 사용할 수 있다.

기후경제통합-지역평가모형을 수치적으로 풀기 위한 전산 소프트웨어로는 대부분 GAMS(Rosenthal, 2015) 프로그램을 사용하고 있으나 일부 모형에서는 Visual Studio나 @RISK 등을 사용하고 있다. 더 복잡한 형태의 모형을 계산할 경우 Matlab 프로그램 사용하기도 한다(Hwang et al., 2013b).²⁴⁾

〈표 2-12〉 기후경제통합-지역평가모형 알고리즘 및 소프트웨어

구분	협력게임	비협력게임	소프트웨어
RICE	Negishi procedure	Nash Equilibrium	GAMS
FUND	Nonlinear programming	Nash Equilibrium	Visual Studio
WITCH	-	Nash Equilibrium	GAMS
MERGE	Negishi procedure	-	GAMS
CETA-M	Negishi procedure	-	GAMS
GRAPE	Nonlinear programming	-	GAMS
AIM/Dynamic	Negishi procedure	-	GAMS
CRED	Nonlinear programming	-	GAMS
AD-RICE	Negishi procedure	-	GAMS
PAGE	-	-	@RISK

주: 모형별로 발표된 최신 버전을 기준으로 작성한 것이며 더 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).

24) Matlab 프로그램에 대해서는 다음 웹페이지에서 관련 정보를 찾아볼 수 있다.
<http://kr.mathworks.com/products/matlab/>

제3장 기후변화 대응전략에 따른 기후변화 정책: RICE 응용

1. GAMS 버전 RICE 모형

이번 장은 향후 구축하게 될 기후경제통합-지역평가모형을 활용해 알 수 있는 내용을 간략하게 살펴보는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 국내에서 독자적인 기후경제통합-지역평가모형을 구축해야 할 필요성을 확인할 수 있을 것이다. 또한, 이번 장에서 구축한 모형은 향후 구축할 기후경제통합-지역평가모형의 기초모형으로 활용할 수 있다.

제2장에서 살펴본 10개 모형 중 RICE 모형은 William Nordhaus 교수가 개발한 전 세계 단일지역 모형인 DICE 모형(Nordhaus, 1994a)을 지역별로 세분한 모형이라고 할 수 있다. RICE 모형은 예일 대학교 Nordhaus 교수와 Zili Yang 교수가 1996년에 처음 개발한 이래 여러 차례 개정 작업을 거쳐 현재는 2010년 버전이 사용되고 있다(Nordhaus and Yang, 1996; Nordhaus, 2010). RICE 모형은 교토의 정서 등으로 기후변화에 관한 대중의 관심이 커지던 초기에 개발된 것으로 비교적 단순하고 확장성이 좋아서 이후에 개발된 많은 기후경제통합-지역평가모형들의 기초모형이 되어 왔다.

2010년 버전 RICE 모형은 마이크로소프트 Excel 형태로 배포되고 있는데, 연구자의 관심에 따라 모형을 다양하게 확장하기 위해서는 GAMS와 같은 전문 소프트웨어 버전이 유용하다. GAMS 프로그램은 확장성이 뛰어날 뿐 아니라 프로그램에서 제공하는 전문적인 Solver를 활용할 수 있기 때문에 안정적이고 정확한 결과를 산출할 수 있다. 제2장에서 살펴보았듯이 많은 기후경제통합-지역평가모형들도 GAMS 소프트웨어를 활용할 수 있도록 프로그래밍되어 있다. 이에 이번 장에서는

RICE 모형을 GAMS 소프트웨어로 구축하였다. 구축한 GAMS 소프트웨어의 결과는 보고된 원래 모형의 구축 결과(Nordhaus, 2010)와 비교하여 그 정확성을 확인하였다.

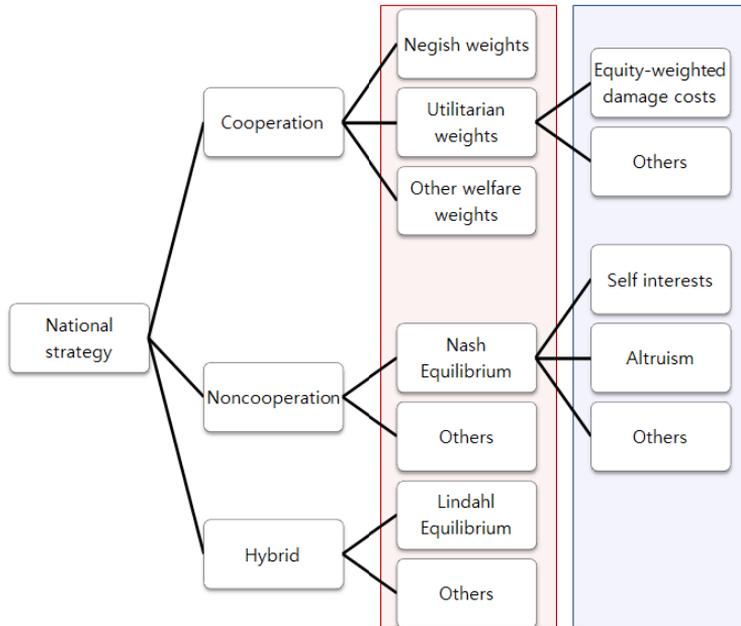
3절에서는 구축한 RICE 모형을 활용해 국가별 대응전략에 따른 최적 기후변화 정책을 살펴보았다. 이에 앞서 먼저 2절에서 기후변화 대응전략을 유형화하였다. 관련하여 Anthoff 교수와 Tol 교수는 FUND 모형을 활용해 이번 장에서와 유사한 연구를 진행한 바 있으며, 다른 모형을 활용한 연구도 필요함을 제기한 바 있다 (Anthoff and Tol, 2010).

이번 장의 분석을 위해 지역구분, 함수식, 모수 값 등 대부분은 RICE 2010 모형에서 사용하는 것을 그대로 사용했으며 연구 목적에 따라 기후변화 대응전략에 따른 결과 값을 비교하기 위해서는 시나리오별로 RICE 모형의 사회후생함수를 수정하여 적용하였다. RICE 모형의 기본적인 특징과 함수식 등은 제2장에서 기술한 바와 같으며, 더 자세한 내용은 Nordhaus(2010)를 참고할 수 있다.

2. 기후변화 대응전략 유형

가. 유형분류

개별국가가 취할 수 있는 기후변화 대응전략은 <그림 3-1>과 같이 유형화할 수 있다. 아래의 분류는 기존 연구(Yang, 2008; Anthoff and Tol, 2010)에서 제시한 것들에 기초한 것으로 제3절에서는 이에 따른 모형의 산출 결과를 일부 제시할 것이다. 단, 기후변화 대응전략에 대해 아직 정형화된 분류방식이 존재하는 것은 아니기 때문에 아래의 분류는 여러 가능한 방식 중 하나라고 이해해야 한다.



주: 붉은색 음영은 Yang(2008)의 분석 내용에 기초한 분류이고 푸른색 음영은 Anthoff and Tol(2010)의 분석 내용에 기초한 것임.

〈그림 3-1〉 기후변화 대응전략 유형

〈그림 3-1〉에서 나타난 바와 같이 기후변화에 관한 국가별 전략은 크게 협력전략, 비협력전략, 하이브리드 방식으로 구분할 수 있다. 협력전략은 기후변화 문제를 해결하기 위해 여러 국가가 공동으로 노력하는 것을 의미한다. 반대로 비협력전략은 기후변화 문제를 개별국가 수준에서만 다루어가는 것을 의미한다. 하이브리드 방식은 특정 국가들이 하나의 연합(coalition)을 형성하여 협력하고 연합에 속하지 않은 국가들과는 비협력적인 방식으로 대응해가는 것을 의미한다.

나. 협력전략

협력전략에서는 개별국가의 사회후생함수와 함께 전 세계 공동의 사회후생함수가 존재함을 가정한다. 이때 전 세계 사회후생함수는 개별국가의 사회후생을 인수

(argument)로 하는 함수형태로 나타낼 수 있다. 전 세계 사회후생함수를 산출하기 위해 국가별로 다양한 가중치를 적용할 수 있는데, 어떠한 가중치를 적용하더라도 경제적 의미에서의 효율성은 달성할 수 있다. 그러나 가중치를 적용하는 방식에 따라 형평성 문제가 제기되기 때문에 협력에 참여하지 않는 나라가 발생할 수도 있다는 점에서 가중치를 선정하는 것은 중요한 문제이다.

제2장에서 살펴보았듯이 현재 기후경제통합-지역평가모형에서 주로 활용하고 있는 것은 공리주의 가중치와 Negishi 가중치이다. 공리주의 가중치는 국가별로 가중치를 모두 동일하게 적용하는 방식이고 Negishi 가중치는 자본의 잠재가격 (shadow price)의 역수를 가중치로 적용하는 방식이다. 두 방식 모두 장·단점이 있어 현재 기후경제통합-지역평가모형에서는 대체로 연구자의 관점에 따라 두 가지 방식 중 하나를 선택하여 사용하고 있다.²⁵⁾

공리주의 가중치는 국가별로 가중치를 동일하게 적용한다는 점에서 일견 공정하게 여겨질 수 있다. 그러나 이 경우 전 세계 사회후생, 곧 개별국가 사회후생의 합을 최대화하는 과정에서 고소득 국가의 빠른 자본 감소와 저소득 국가의 빠른 자본 증가가 발생할 수 있다. 이는 제2장에서 살펴보았듯이 효용함수의 특성상 단위 소득이 유발하는 효용이 가난한 국가들에서 더 높기 때문이다. 다시 말해 저소득 국가의 소득이 한 단위 높아지는 것이 고소득 국가의 소득이 한 단위 높아지는 것보다 전 세계 총 사회후생을 증가시키는데 상대적으로 더 크게 이바지하기 때문이다.

Negishi 가중치는 개별국가들이 자신들의 예산한계 내에서 최적의 선택을 하도록 한다는 측면에서 경제학에서 말하는 Walras 균형에 도달하게 하는 유일한 가중치이다(Negishi, 1960). 이러한 점에서 Negishi 가중치는 현재의 경제적 여건을 반영한 경제적 균형점에 도달하도록 한다는 장점을 갖고 있다.²⁶⁾ 그러나 기후변화 문제에

25) 기후변화 문제와 관련하여 Negishi 가중치에 대한 이론적 검토는 Stanton(2011), Abbott and Fenichel(2014) 등을 참고할 수 있다.

26) Negishi 가중치 방식에서는 한계효용의 역수를 가중치로 적용한다. 일반적으로 경제학에서 사용되고 있는 CRRR 효용함수 등 HARA 계열의 효용함수에서는 소득이 높을수록 한계효용이 낮기 때문에

적용할 경우 3절에서 살펴보겠지만, 저개발 국가의 의무감축량이 상대적으로 높아진다는 문제점을 갖고 있다. 현재 대기 중에 존재하는 온실가스 대부분은 역사적으로 고소득 국가들에서 배출한 것이라는 점에서 Negishi 가중치를 적용하기 위해서는 형평성을 유지할 방안(예를 들어 적절한 보상 또는 기술이전)도 고려해야 할 것이다.

한편 제2장에서 살펴보았듯이 개별국가의 기후변화 피해비용을 산정할 때 해당 국가의 소득수준을 반영해야 한다는 논리도 제기할 수 있다. 이는 같은 금액의 손실이라도 가난한 자에게 주어지는 손실이 부유한 자에게 주어지는 손실보다 더 큰 후생의 감소를 가져올 수 있기 때문이다. 이러한 방식은 현재 FUND와 PAGE 모형에서 형평성을 고려하는 방식으로 사용되고 있다.

다. 비협력전략과 하이브리드 방식

협력전략이 암묵적으로 합리적이고 절대적인 의사결정자(현실적으로는 UN과 같은 의사결정기구)가 존재하여 전 세계의 사회후생을 최대화하기 위한 온실가스 감축량을 정하고 이를 개별국가에 배분한다고 가정하는 데 반해, 비협력전략은 개별 국가의 온실가스 감축량은 개별국가가 자신들의 사회후생을 최대화하는 방식으로 독자적으로 결정한다고 가정한다. 국제 기후변화협상을 어떻게 바라보느냐에 따라 두 가지 전략 모두 의미 있는 설명이 될 수 있지만, 국제 기후변화협상이 실패할 경우 개별국가들은 비협력전략으로 선회할 가능성이 크다는 점에서 비협력전략이 내포한 뜻을 살펴보는 것도 필요한 일이다.

비협력전략에서는 일반적으로 모든 나라가 자신의 사회후생을 최대화할 수 있도록 독자적으로 정책수단을 선택한다고 가정한다. 구체적으로 개별국가들은 다른 모든 나라가 이러한 전략을 따라 선택한다고 가정한 상태에서 자신들의 사회후생을 최대

Negishi 가중치 방식에서는 고소득 국가일수록 높은 가중치를 적용받는다. 또한, 이 과정에서 Negishi 방식에서는 모든 국가의 탄소의 사회적 비용이 동일해진다.

화할 수 있도록 정책수단을 선택한다. 이때 모든 국가가 다른 선택을 할 유인이 사라지는 지점에 도달하면 경제학에서는 이러한 균형점을 내시(Nash) 균형점이라고 한다.

물론 비협력전략에서도 개별국가가 다른 국가들의 사회후생을 대하는 태도를 반영할 수 있는데 이 역시 사회후생함수의 변형을 통해 가능하다. 예를 들어 특정 국가는 자국의 이익만을 고려하기도 하고, 특정 국가는 자국의 선택이 다른 국가들에 미치는 영향을 자국의 사회후생함수에 포함하기도 한다.²⁷⁾ 이렇듯 비협력전략도 개별국가가 취하는 태도에 따라 다양한 형태로 분류될 수 있다.

국제 기후변화협상 과정에서도 나타나듯이 개별국가들이 협력전략과 비협력전략 중 하나를 택하여 행동하는 것은 아니다. 일부 국가들은 서로 연합하여 협력하고 해당 연합에 속하지 않은 국가들과는 비협력적으로 경쟁할 수도 있다. 이러한 경우 연합이 존재하기 위해서는 연합에 속하는 국가들이 연합에서 탈퇴하려는 동기가 없어야 하며, 연합에 속하지 않은 국가들은 연합에 속하려는 유인이 없어야 한다. 이러한 균형점을 경제학에서는 린달(Lindahl) 균형이라고 한다(Yang, 2008).

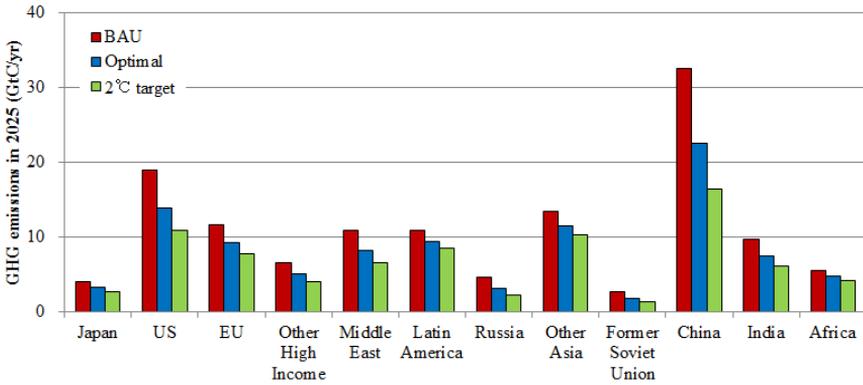
3. 분석 결과

이하에서는 협력게임을 중심으로 RICE 모형 응용결과를 살펴보았다. 비협력게임에서의 국가별 전략에 따른 최적 기후변화정책에 관한 연구는 게임이론을 활용한 다른 접근법이 필요하기 때문에 연구 목적상 향후 연구를 위해 남겨두기로 한다. 관련하여 FUND 모형을 활용한 비협력게임 연구의 예는 Anthoff and Tol(2010)을 참고할 수 있다.

<그림 3-2>는 2025년의 국가(지역)별 BAU 온실가스 배출량, 최적(optimal)

27) 예를 들어 필리핀에서 자연재해로 큰 피해가 있을 경우 한국인을 포함하여 여러 나라 사람들이 기부를 하거나 자원봉사를 한다. 이는 다른 나라에 미치는 피해가 개인의 효용에도 영향을 미칠 수 있다는 점을 간접적으로 보여주는 증거라 할 수 있다.

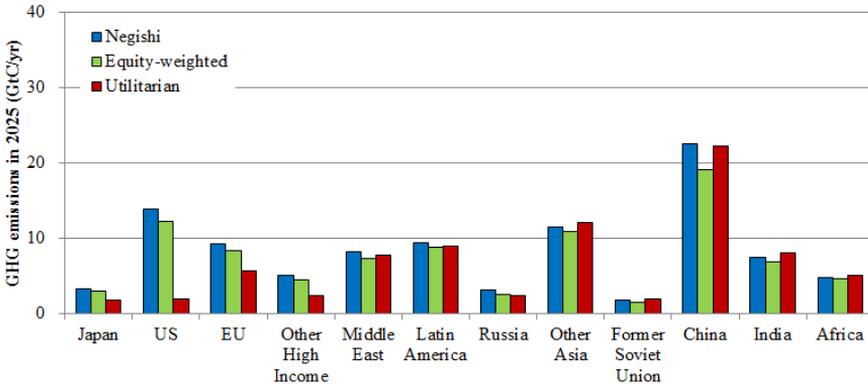
배출량, 2°C 목표(2°C target) 배출량 등을 나타낸 것이다.



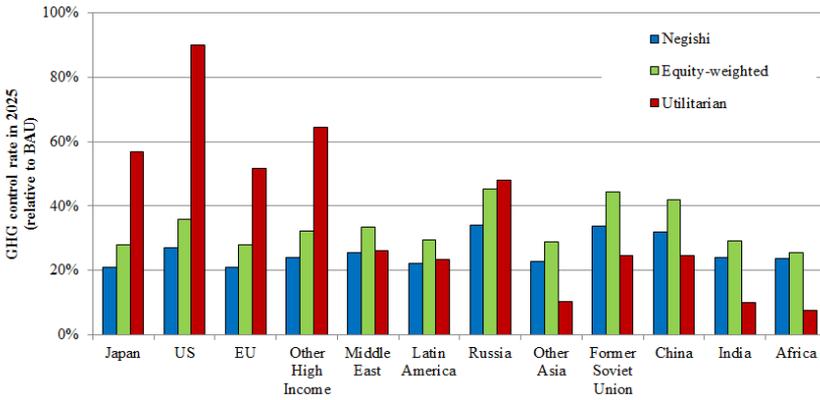
〈그림 3-2〉 2025년 온실가스 배출량(Negishi 가중치 적용)

BAU 배출량은 향후 온실가스 감축이 없을 때의 배출량을 의미하며, 최적 배출량은 온실가스 배출로 인한 외부효과를 온전히 내부화하였을 때의 최적 온실가스 배출량을 의미한다. 2°C 목표 배출량은 현재 국제기후변화협상이 목표로 하는 지구평균기온 상승 2°C 이내 억제를 달성하기 위한 온실가스 배출량을 의미한다. 참고로 이번 장의 분석에서는 Negishi 가중치를 적용한 최적 배출량 시나리오를 기본 시나리오로 정했기 때문에 공리주의 가중치(utilitarian) 시나리오를 제외하면 이후 제시되는 모든 시나리오에서는 지역별 사회후생함수 합산을 위해 Negishi 가중치를 적용하였다.

지역별 온실가스 감축량은 <그림 3-4>에서 나타난 바와 같이 사회후생함수의 선택에 따라 달라진다. 공리주의 방식을 적용할 경우 미국, 유럽연합, 일본 등 고소득 국가들의 온실가스 감축량이 큰 폭으로 증가하지만(2025년의 경우 BAU 대비 50% 이상), Negishi 가중치를 적용할 경우 고소득 국가들의 감축량은 줄고 저소득 국가들의 온실가스 감축량은 상대적으로 증가한다. 한편 저소득 국가에서 발생하는 기후 변화 피해비용에 대해 가중치를 부여할 경우에는(equity-weighted) 경제적 효율성만을 고려할 경우(Negishi)보다 모든 나라에서 온실가스 감축량이 5~10%p 증가한다.



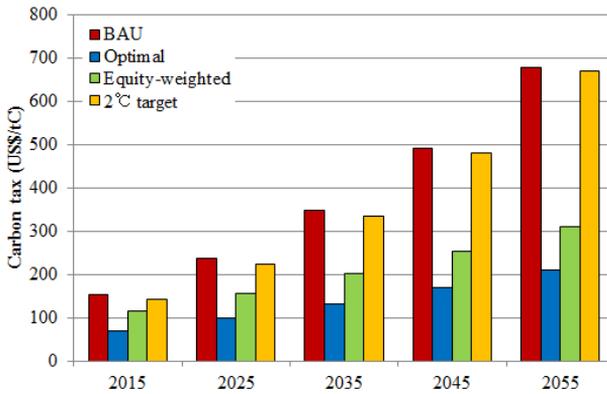
〈그림 3-3〉 2025년 온실가스 배출량(다양한 방식)



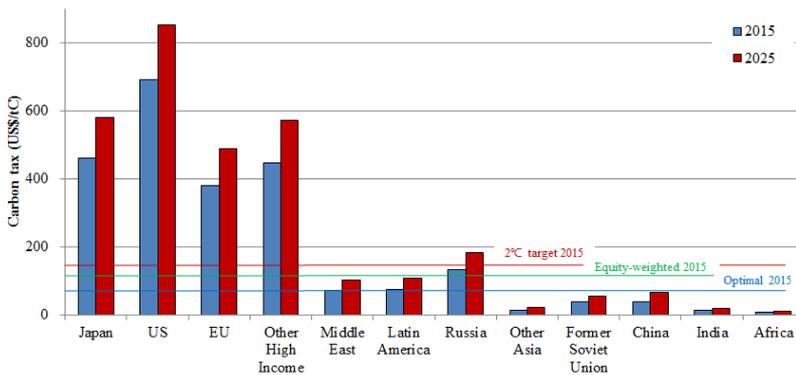
〈그림 3-4〉 2025년 온실가스 감축률(BAU 대비)

탄소세 역시 〈그림 3-5〉에서 나타난 바와 같이 사회후생함수의 선택에 따라 달라진다. Negishi 가중치를 사용한 경우 이론적으로 모든 지역에 대해 탄소의 사회적 비용은 같다. 가난한 지역의 기후변화 피해에 대해 가중치를 적용할 경우와 2°C 목표 달성을 가정할 경우 각각 탄소세는 경제적 효율성만을 가정한 경우의 탄소세에 비해 더 높아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 〈그림 3-6〉에서는 아무런 조치도 취하지 않는 BAU 시나리오보다 정책 시나리오들에서는 1톤의 탄소가 유발하는

사회적 비용(탄소의 사회적 비용)이 더 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 구체적으로 최적 시나리오의 경우 BAU 시나리오보다 탄소의 사회적 비용이 2~3배 정도 낮다. 공리주의 가중치를 적용할 때는 온실가스 감축률과 마찬가지로 선진국들이 부담해야 할 탄소세가 상당히 높아진다.



〈그림 3-5〉 탄소세(Negishi 가중치 적용)

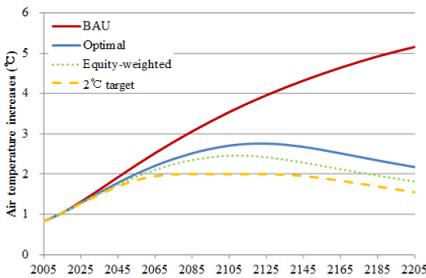


주: 가로 실선은 Negishi 가중치 적용 시 2015년의 탄소세를 시나리오별로 나타낸 것임.

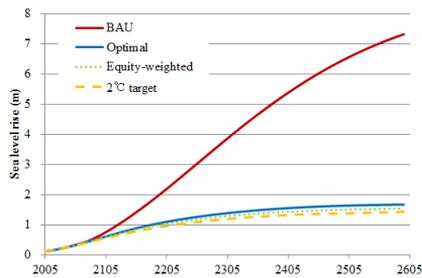
〈그림 3-6〉 탄소세(공리주의 가중치 적용)

지구평균기온을 비교해 보면 BAU 시나리오에서는 2100년대 초반 지구평균기온이 3.5℃ 상승하고 이후 시간이 갈수록 더 높아지지만, 정책 시나리오들에서는 기후변화정책의 효과로 2100년대 초반 지구평균기온이 2~3℃까지 상승한 이후 점차 낮아진다. 2℃ 목표 시나리오에서는 지구평균기온 상승이 2070년 전후에 2℃에 도달하지만 이후 80여 년간 강화된 정책 노력으로 2℃에서 그대로 유지된다.

해수면 상승의 경우 모든 시나리오에서 2080년 전후까지 해수면이 약 50cm 상승하고 이후에도 지속해서 높아지지만, 해수면이 상승하는 속도는 정책시나리오들에서 크게 낮음을 확인할 수 있다.²⁸⁾ 최고 해수면 상승 높이는 정책시나리오들에서 대체로 1.6m 전후로 전망된다.



〈그림 3-7〉 지구평균기온

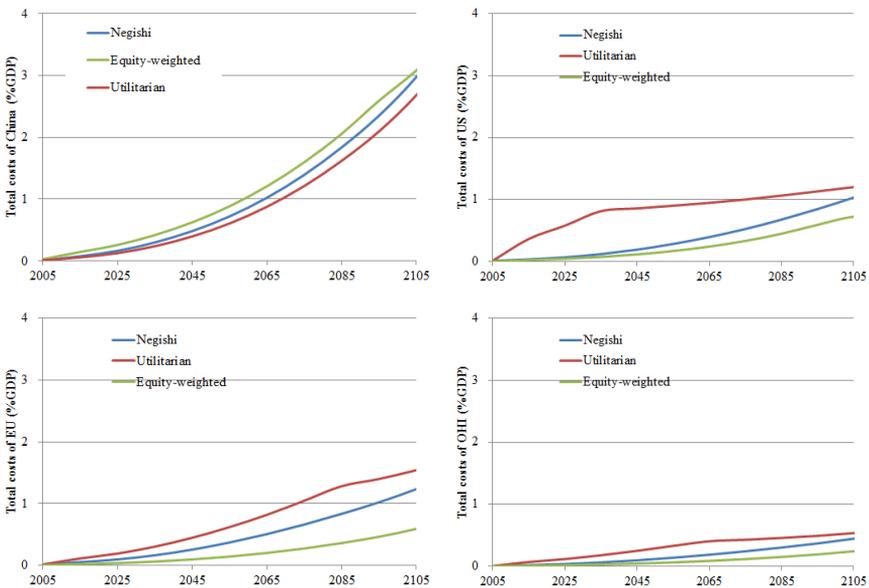


〈그림 3-8〉 해수면 상승

기후경제통합-지역평가모형에서는 경제활동과 기후시스템 변화에 따른 국가(지역)별 기후변화 관련 비용(감축비용, 피해비용 등)의 변화도 살펴볼 수 있다. 〈그림 3-9〉는 이 중 기후변화 총비용(감축비용과 피해비용의 합)을 미국, 중국, 유럽, 기타 고소득 국가군(OHI) 등에 대해 나타낸 것이다. 참고로 한국은 RICE 모형에서 기타 고소득 국가군에 포함되어 있다.

28) 지구평균기온과 달리 해수면 상승이 지속적으로 높아지는 것은 반응시간의 차이 때문이다.

<그림 3-9>에서 확인할 수 있는 바와 같이 기후변화 관련 비용은 국가(지역)별로 큰 차이를 보인다. <그림 3-9>에서 제시한 지역 중에는 중국의 기후변화 관련 비용이 가장 클 것으로 전망되며(2105년의 경우 GDP의 2.5~3%), 기타 고소득국가군에서 비용이 가장 낮을 것으로 전망된다(2105년의 경우 GDP의 0.5% 이내). 미국과 유럽은 중간 정도로 2105년의 경우 GDP의 0.5~1.5% 정도 비용이 발생하는 것으로 전망된다. 개별국가별로도 소요비용은 전략에 따라 편차가 있는데 중국의 경우 형평성 가중치 고려해 피해비용을 합산하는 방식의 경우 총비용이 더 높아지지만, 고소득 국가들은 반대로 형평성을 고려한 가중치를 적용한 경우 총비용이 낮아진다. 사회 후생함수를 합산하는 방식과 관련해서도 고소득 국가들에서는 Negishi 가중치를 적용할 경우보다 공리주의 가중치를 적용할 경우 총비용이 크게 높았으며, 중국은 반대로 공리주의 가중치를 적용할 때 총비용이 가장 낮았다. 이는 앞서 2절에서 살펴본 이론적 측면과 잘 부합하는 결과들이다.



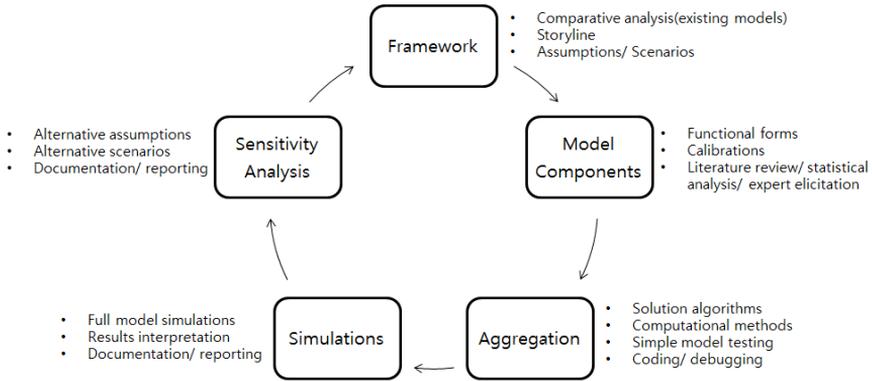
<그림 3-9> 국가(지역)별 기후변화 총비용

이번 장의 분석에서 한국은 기타 고소득 국가군에 속해있다. 그러나 기타 고소득 국가군에는 한국 이외에도 다양한 국가들이 포함되어 있어서 기타 고소득 국가군의 결과를 한국에 그대로 적용하는 것에는 한계가 있다. 반면 미국이나 중국 등의 경우에는 앞서 살펴본 내용이 개별 국가의 특성을 독자적으로 반영한 결과이기 때문에 해당 국가의 정책을 수립하는 데 중요한 참고자료로 활용할 수 있을 것이다. 또한, 지면의 한계로 이번 보고서에서 다 담지는 못했지만, 기후경제통합-지역평가 모형에서는 국가별 경제성장 경로, 에너지원별 구성, R&D 투자, 기후변화 적응 투자 등 다양한 요소들을 살펴볼 수 있다. 이들은 국가 기후변화정책의 중요한 요소들이라는 점에서 한국을 독립적인 국가로 표현한 독자적인 기후경제통합-지역평가모형의 유용성은 더욱 크다고 할 수 있다.

제4장 국내 기후경제통합-지역평가모형 개발을 위한 기본 틀

1. 기후경제통합-지역평가모형 개발과정

제1장에서 살펴보았듯이 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 과정은 <그림 4-1>과 같은 다섯 개의 과정이 필요하다. 이번 연구는 <그림 4-1>에서 첫 번째 과정에 해당하는 것으로서 기존 모형에 대한 비교분석과 향후 모형 개발을 위한 기본 틀을 제시하는 것을 목적으로 하였다.



주: 편의를 위해 그림 <1-1>을 다시 나타냄.

<그림 4-1> 기후경제통합-지역평가모형 개발과정

두 번째 과정은 첫 번째 과정에서 구축한 기본 틀 위에 개별 구성 요소별로 살을 붙이는 과정이다. 예를 들어 경제모듈에서는 사회후생함수, 생산함수, 자본축적과 경제성장 관계식 형태 등을 결정하고 함수식의 모수를 추정하는 과정이 포함된다. 이와 관련하여 기후경제통합-지역평가모형에서 가장 중요한 것은 국가별 기후변화

피해비용, 온실가스 감축비용, 기후변화 적응사업의 편익 등에 관한 함수식을 결정하는 것이다. 기후변화로 인한 피해는 경제와 자연 생태계 전반에 걸쳐 일어나기 때문에 이를 추정하는 것은 상당한 노력과 시간을 요구한다. 관련된 시장 자료가 충분히 있으면 통계분석 기법을 활용하여 피해비용 함수나 온실가스 감축비용 함수를 추정할 수 있으나 그렇지 않으면 메타분석(meta analysis) 등 문헌 검토나 전문가 조사 등을 통한 간접적인 방법을 사용해야 한다. 이 과정에서는 계량경제학(econometrics)을 비롯한 통계 방법론에 대한 이해, 가치평가(valuation), 생태경제학(ecological economics) 등에 대한 이해가 요구된다.

세 번째 과정은 두 번째 과정에서 구축한 개별 요소들을 하나의 모형으로 연결시키는 과정이다. 이때 중요한 것은 종합 모형이 정확한 값을 빠르고 안정적으로 산출할 수 있도록 계산 알고리즘(solution algorithm)을 작성하고 모형과 알고리즘에 적합한 수치 계산 소프트웨어를 선정하는 것이다. 제2장에서 살펴보았지만, 일반적으로 기후경제통합평가모형에서는 GAMS 또는 MATLAB을 수치 계산 소프트웨어로 사용하고 있다. 이때 변수별로 적절한 경계 값(boundary)을 설정하는 것은 수치 계산의 안정성을 확보하는 데 도움이 될 수 있다. 또한, 기후경제통합-지역평가모형은 일반 경제모형에 비해 큰 모형이기 때문에 전체 모형을 한꺼번에 구축하기보다는 단순한 형태의 모형(simple or toy model)으로 사전 테스트를 거친 후 모형의 세부 부분을 종합하는 것이 효율적이다. 이 과정에서는 계산경제학(computational economics)과 운용관리(operation research) 방법론에 대한 이해 및 수치 계산 프로그램에 대한 이해 등이 필요하다.

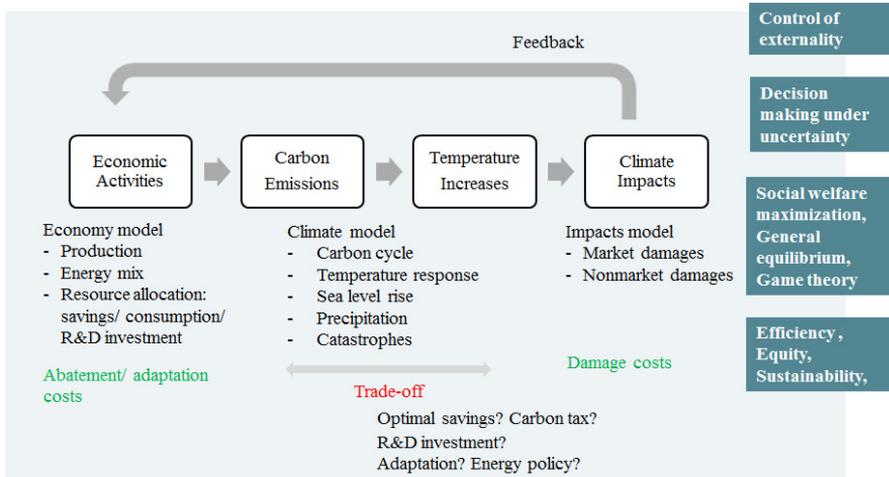
네 번째 과정은 세 번째 과정에서 구축한 전체 모형을 실행시키고 결과를 도출하는 단계이다. 모형에서 산출한 결과에 대한 해석과 문서화 과정 역시 포함한다. 결과 해석 시에는 주요 변수별로 경제학 및 기후과학 이론에 따라 기대되는 값과 모형에서 산출된 값을 정성적으로 비교하고 두 값이 큰 차이를 보일 경우 원인을 추론하는 과정도 거쳐야 한다. 또한, 다른 수치모형들에서 도출된 연구 결과와의 비교도 필수적이다.

다섯 번째 과정은 네 번째 과정에서 도출된 결과가 모형에서 사용한 주요 가정들에 대해 얼마나 민감한지를 살펴보는 단계이다. 첫 번째 과정에서 설정한 시나리오 외에 별도의 시나리오를 구성하여 모형을 실행시켜 보는 것도 포함될 수 있다. 이 과정에서도 네 번째 과정에서의 마찬가지로 결과 해석 및 문서화 과정이 요구된다. 다섯 번째 과정을 거친 후 개발자는 개별 과정에서 경험한 것을 바탕으로 필요하면 첫 번째 과정에서 정한 모형의 틀을 수정할 수도 있다.

이처럼 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 과정은 많은 시간과 자원이 소요되는 과정이기 때문에 단계별로 진행하는 것이 효과적이다. 실제로 DICE, FUND, WITCH, CRED 등 현재 사용되고 있는 대부분의 모형들도 수년에 걸친 연구를 통해 개발된 것들이다.

2. 모형개발 기본방향

기본적으로 기후경제통합-지역평가모형이 다루고자 하는 바는 온실가스 배출이라는 외부효과를 어떻게 내부화하여 국가 경제 및 시민의 후생을 극대화하는가에 있다. 따라서 국내에서 개발할 기후경제통합-지역평가모형의 기본 틀은 <그림 4-2>와 같은 이야기 구조를 기초로 해야 한다. <그림 4-2>는 <그림 2-1>을 확장한 것으로 개별 요소들에 대한 기본적인 설명은 제2장을 참고할 수 있다.



〈그림 4-2〉 모형개발 기본방향

제2장에서 살펴보았듯이 대부분의 기후경제통합-지역평가모형들이 <그림 4-2>와 같은 구조로 되어 있지만, 개별 모델에 어떠한 요소를 고려하고, 어떠한 가정을 사용하고, 지역을 어떻게 구분하고, 모수조정과 수치계산은 어떻게 하는지 등은 연구자 또는 연구그룹 더 나아가 사회의 가치판단에 따라 달라진다. 기후경제통합-지역평가모형에 반영된 가치판단이 합리적인 한 이러한 연구 분위기는 기후변화 정책을 수립하는 데도 유용한 것이다. 기후변화정책이라는 것은 기후변화라는 과학적 사실에 근거하지만, 시민의 행동과 국가의 선택이 관련되는 한 제3장에서 살펴보았듯이 사회의 가치판단에 따라 최적의 기후변화정책이 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 이유에서 최적의 기후변화정책은 사회의 다양한 가치판단을 반영하는 여러 모형의 결과들을 종합적으로 고려한 후에 결정되어야 한다.

관련하여 최근 기후변화 경제학에서는 과학적 사실의 불확실성을 충분히 고려한 상태에서 기후변화정책을 수립해야 한다는 주장이 점점 더 설득력을 얻어가고 있다 (Stern, 2007; Weitzman, 2009; Nordhaus, 2010; Tol, 2014). 앞으로는 이에 더해 다양한 사회적인 가치판단을 충분히 고려한 상태에서 기후변화정책을 수립해야

한다는 점 역시 강조되어야 할 것이다.

아직 국내에서는 기후변화정책과 관련하여 <그림 4-2>와 같은 이야기 구조를 포함하면서 한국사회의 가치판단을 반영할 수 있는 기본적인 도구가 존재하지 않았다. 이러한 점에서 향후 개발할 기후경제통합-지역평가모형은 한국의 상황과 가치판단을 최대한 반영할 수 있는 형태로 개발되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 한국을 개별 국가로 포함하는 모형을 개발하고, 기후변화 피해비용 함수와 할인율 등 핵심적인 요소들에 대해 한국의 특성과 가치체계를 잘 반영할 수 있도록 모형을 설계해야 할 것이다.

3. 모듈별 세부방향

제2장에서 살펴보았듯이 기후경제통합-지역평가모형은 크게 경제모듈, 기후모듈, 기후영향 및 정책모듈로 구성되어 있다. 따라서 향후 개발할 기후경제통합-지역평가모형에서는 개별 모듈에서 어떠한 요소를 반영하고 어떠한 가정을 사용할지, 모수는 어떻게 조정해야 할지 등을 결정해야 한다. 이때 기존에 개발된 모형들이 고려하지 않은 부분을 반영할 수 있다면 학문적 측면과 정책적 측면에서 모두 의미 있는 모형이 될 것이다.

<표 4-1>은 향후 개발할 기후경제통합-지역평가모형의 모듈별로 세부방향을 나타낸 것이다. 모든 요소를 다 살펴보는 것은 불가능하며 또한, 모형을 실제로 개발하는 과정에서 이들을 선택하는 것이 더 효율적일 수 있기 때문에 아래에서는 몇 가지 요소만 제시하였다. 자료의 가용성 및 모형의 수치적 안정성 등이 기후경제통합-지역평가모형에 반영할 요소를 선택하는 데 중요한 고려 요소인데 이는 대부분 실제로 모형을 개발하는 과정에서 확인할 수 있기 때문이다.

〈표 4-1〉 기후경제통합-지역평가모형 요소별 세부방향(안)

구분	요소	내용	비고(참고자료 등)
사회후생함수	형평성	가난한 자에게 미치는 영향 우선 고려	제2장에서 일반화한 Tol 사회후생함수
	선호체계	시간/공간에 따라 감소하는 할인율 등	Arrow et al. (2013) 참고
	불확실성	과학적, 사회경제적 불확실성 고려	기대효용이론
	지속 가능성	현재대뿐 아니라 미래세대의 필요도 반영	제2장에서 일반화한 Chichilnisky 사회후생함수
	비시장재화	비시장재화에 미치는 기후변화 영향 고려	Sternier/Persson의 CES 효용함수
경제모듈	경제성장	외부효과를 반영한 신고전주의 경제성장 이론	RICE 모형
	생산함수	에너지 재화 포함	WITCH 모형
기후모듈	탄소순환	3박스 모형	RICE 모형
	기온상승	2박스 모형	RICE 모형
	해수면 상승	4가지 유형	RICE 모형
	강수량	강수량 변동 고려	IPCC 보고서
정책 및 영향모듈	피해비용	세부 부문별 피해비용 산출	FUND 모형
	감축비용	상향식(Bottom-up) 자료 활용	CRED 모형
	적응	적응 고려	AD-RICE 모형
	에너지 정책	연구개발투자 등을 통한 에너지 효율향상, 재생가능 에너지 보급	WITCH 모형
비협력게임		Lindahl 균형	Yang(2008) 참고

가. 경제모듈

경제모듈에서는 아직까지 전 세계적으로 비시장 피해비용을 명시적으로 고려한 기후경제통합-지역평가모형이 없는 상태이다. 기후변화 피해비용과 관련하여 이 분야에서 가장 권위 있는 Richard Tol 교수가 개발한 FUND 모형에서도 피해비용 함수를 부문별로 자세히 구분하고는 있지만 비시장 피해비용에 대한 명시적인 고려는

부족하다. 이와 관련하여 비록 아이디어 수준이기는 하지만 CES 함수를 이용해 비시장 재화를 사회효용함수에 명시적으로 포함한 Sterner 교수와 Persson 교수의 연구는 참고할 만하다(Sterner and Persson, 2008). 국내에서 개발할 기후경제통합-지역평가모형에서는 이들의 연구를 실질적으로 적용해 보는 것도 고려할 수 있다. 다만 이를 위해서는 자연자본 및 생태계서비스 등에 관한 실증 연구가 뒷받침되어야 하기 때문에 비시장 피해를 명시적으로 고려해 기후경제통합-지역평가모형을 개발하는 것은 장기적인 목표가 될 것이다.

생산함수는 에너지정책을 반영할 수 있도록 설계하는 것이 이상적이다. 다만 이때 에너지원을 어느 정도까지 세분할 수 있는지는 자료의 가용성 문제와 모형의 수치적 안정성 문제 등을 고려해 결정해야 한다. 이를 위해서는 CES 함수를 이용해 다양한 에너지원을 고려하고 있는 WITCH 모형을 참고할 수 있다.

기후경제통합-지역평가모형에서 사회의 가치체계를 가장 잘 나타내는 요소는 사회후생함수이다. 할인율(시간선호도), 위험선호도, 불평등선호도, 지속 가능성 고려 등의 요소들이 사회후생함수에 포함되기 때문이다. 개별 요소들에 대한 사회적 가치체계는 적절한 방법론을 바탕으로 실제로 시민들을 대상으로 추정하는 것이 가장 선호된다. 다만 이러한 요소들은 정책수립에서 상당히 중요한 의미가 있기 때문에 정교한 연구 설계가 필요하다.²⁹⁾

할인율과 관련해서는 최근 시간에 따라 감소하는 효용 할인율을 적용하는 것이 이론적인 측면에서 뒷받침되고 있기 때문에 이를 고려할 수 있을 것이다(Arrow et al., 2013). 더불어 시간 할인율뿐 아니라 공간 할인율에 관한 연구도 흥미로운 주제일 수 있다. 예를 들어 지역별 가중치를 적용할 때 사람들이 해당 지역에 대해 할인하는 정도에 따라 최적의 기후변화정책은 달라질 수 있다. 그러나 아직 학계에서도 이에 관한 구체적인 연구가 진행되지 않고 있어 이에 대한 이론 및 경험적 연구를

29) 예를 들어 할인율, 위험에 대한 태도 등은 기후변화 문제뿐 아니라 모든 공공정책에 적용되는 요소이다.

수행하고 이를 바탕으로 기후경제통합-지역평가모형에 반영할 수 있다면 큰 기여가 될 것이다.

나. 기후모듈

기후경제통합-지역평가모형에서 기후모듈은 필수적인 요소이지만 모형의 목적을 고려할 때 일반순환모형(GCM) 등 기후과학에서 사용하는 수준의 대규모 모형을 기후경제통합-지역평가모형에 반영할 필요는 없다. 기후경제통합-지역평가모형에서는 기온, 해수면, 강수량 등 중요한 기후 요소들을 선택하고 이들을 최대한 기후과학 모형의 산출 결과에 근접하도록 조정하는 작업이 중요하다.

제2장에서 살펴본바와 같이 이와 관련하여 현재 가장 발달한 모형은 RICE 모형이다. RICE 모형에서는 탄소순환(3개 층), 기온변화(2개 층), 해수면 상승(4개 요소)을 모형에 포함하고 있다. 여기에 빠진 것으로서 기후변화와 관련하여 중요한 것은 강수량과 비연속적인 사건(해양대순환 붕괴 등) 등이 있다.³⁰⁾ 그러나 아직 해당 요소를 기후경제통합-지역평가모형에 반영할 만큼 명확한 함수 관계가 과학적으로 밝혀지지 않고 있어서 이들 요소를 반영하는 것은 장기적인 목표가 될 수 있다.³¹⁾

마지막으로 현재 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서 기후요소들은 지구 평균값을 산출하고 있다. 이때 지구평균기온이 지역별로 미치는 영향은 지역별 피해비용함수를 통해 반영된다. 예외적으로 FUND 모형에서는 다소 임시적인 방식으로 (ad-hoc) 지역별 기온전망을 산출하고 있는데 앞으로는 기후경제통합-지역평가모형에서 지역별 기후요소들을 산출할 수 있도록 하는 더욱 합리적인 방법을 고려하는 것이 필요할 것이다.

30) 물론 RICE, PAGE 모형 등에서는 비연속적 재난이 일부 단순한 형태로 모형에 반영되어 있지만 아직까지 근거는 약한 편이다(Nordhaus, 2013).

31) 과제 자문위원 권원태 박사와의 의견교환.

다. 기후영향 및 정책모듈

기후영향은 최대한 상세히 표현하는 것이 부문별 기후변화정책을 수립하는 데 있어서 유용하다. 따라서 국내에서 개발할 기후경제통합-지역평가모형에서는 FUND 모형에서와 같이 상향식 방식으로 부문별 피해비용을 산출한 후 이를 합산하는 방식을 사용하는 것이 적절하다. 그러나 이를 위해서는 부문별(농업, 임업, 수자원, 에너지, 생태계, 보건 등)로 기후변화 피해비용 함수를 산출해야 하기 때문에 상당한 시간과 노력이 요구될 수 있다. 한국을 제외한 다른 국가들에 대해서는 FUND 모형이나 IPCC 보고서 등에서 제시한 값을 참고할 수 있다.

온실가스 감축 비용과 관련해서도 여러 가지 다양한 감축요소를 명시적으로 모형에 표현하는 것이 이상적이다. 이와 관련하여 현재 기후경제통합-지역평가모형 중 가장 상세한 분석을 제공하고 있는 모형은 WITCH 모형이다. 한편 CRED 모형에서 처럼 McKinsey & Company의 감축비용 분석 결과도 참고할 수 있을 것이다.

기후경제통합-지역평가모형을 구축할 때 정책모듈에서 중요한 것은 온실가스 감축, 기후변화 적응, 연구개발 투자 등이다. 아직 이들을 모두 반영하고 있는 기후경제통합-지역평가모형은 없는 상태인데, 이는 개별 모형마다 연구목적이 다르기 때문이다. 또한, 그동안 기후변화정책에서 온실가스 감축보다 기후변화 적응과 연구개발 투자가 상대적으로 관심을 덜 받은 것도 하나의 이유이다. 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 구축할 경우 이들 세 가지 요소를 모두 반영할 수 있도록 하는 것이 이상적이다. 기후변화 적응과 연구개발 투자의 경우 아직 기후경제통합-지역평가모형에 널리 적용되는 방식은 없기 때문에 이에 대해 더 세밀하게 접근할 수 있다면 중요한 기여가 될 수 있을 것이다.

마지막으로 기후변화 전략과 관련하여 게임이론을 바탕으로 한 기후변화협상 모형을 개발하는 것도 필요하다. 이를 위해서는 모형을 수치적으로 계산하는 과정이 달라지기 때문에 또 다른 트랙으로 연구를 진행하는 것이 필요하다.

4. 기타 고려사항

현재 기후경제통합평가모형에서는 대체로 불확실성을 명시적으로 고려하기보다는 학술적으로 응용하는 과정에서 다루고 있다. 최근 스텐보고서(Stern, 2007)와 Weitzman 교수의 이론 연구(Weitzman, 2009) 이후 불확실성에 관한 관심이 더욱 커지고 있기 때문에 국내에서 개발할 모형에서는 불확실성을 명시적으로 고려할 필요가 있다. 관련하여 기본모형은 불확실성을 고려하지 않는 버전(deterministic)으로 작성하고 추후 기본모형의 확장으로서 불확실성을 고려한 모형(uncertainty)과 불확실성에 대한 학습을 고려한 모형(learning) 등으로 단계별로 진행하는 것이 효율적일 것이다.

아직은 불확실성을 고려한 기후경제통합평가모형 연구들에서도 대부분 과학적 사실에 대한 불확실성만을 고려해 왔는데, 경기변동이론(business cycle) 등을 활용한 경제적 불확실성 분석, 인구구조 변화 등 사회경제적인 요소에 대한 불확실성 분석 등도 고려할 수 있다면 더욱 유용한 모형이 될 것이다.

모형을 구축하는 데 있어 필요한 자료원은 제2장에서 제시한 여러 자료원을 모두 활용할 수 있을 것이다. 국내 자료의 경우 한국은행, 통계청, 환경부, 산업통상자원부 등 관계부처와 산하 연구원에서 발간하는 통계자료 및 학계의 연구결과 등을 통해 자료를 수집해야 할 것이다. 구체적인 자료원은 모형을 직접 개발하는 과정에서 선택할 수 있다.

수치모형의 결과를 산출하는 방식과 관련해서는 크게 두 가지 접근법을 고려할 수 있는데 첫 번째는 협력게임 방식이고 두 번째는 비협력게임 방식이다. 첫 번째의 경우 비선형프로그래밍(nonlinear programming) 기법을 사용하거나 다이내믹 프로그래밍(dynamic programming) 기법을 활용할 수 있다. 특히 불확실성이나 학습을 포함해 모형을 확장할 경우에는 다이내믹 프로그래밍 기법의 활용이 필요한데, 이를 위한 알고리즘에 대해서는 Hwang(2014)을 참고할 수 있다. 또한, CGE

프로그래밍에서 사용하는 MCP(Mixed complementary problem) 기법을 활용할 수도 있다(Böhringer et al, 2007). 비협력게임 방식을 위해서는 게임이론의 기법들을 활용할 수 있다.

수치계산을 위한 소프트웨어로는 GAMS나 MATLAB을 활용할 수 있다. 관련하여 제3장에서 구축한 기초모형이 GAMS로 되어 있기 때문에 GAMS를 활용하는 방안이 가장 효율적일 수 있으나 향후 다이내믹 프로그래밍 기법을 활용해야 할 경우에는 MATLAB을 사용하는 것이 유용하다(Hwang, 2014).

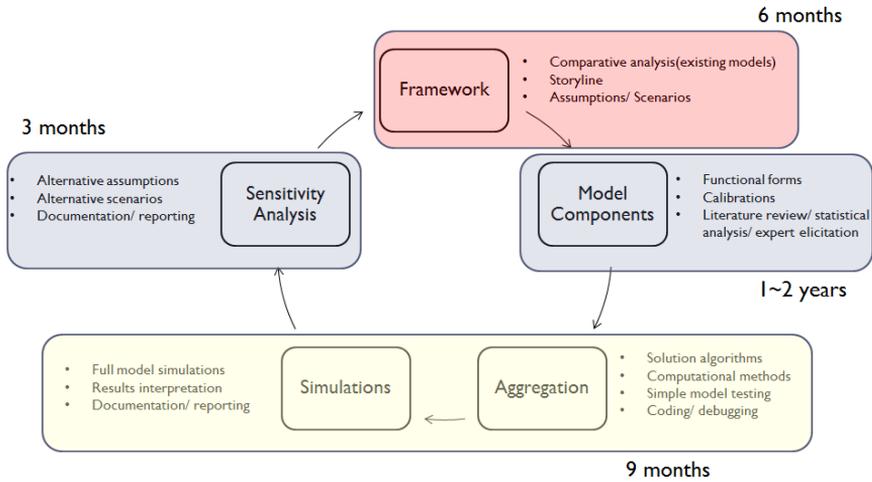
5. 관련 연구와의 협력 및 향후 모형 개발일정(안)

기후경제통합-지역평가모형을 구축하기 위해서는 관련 연구와의 협력이 중요하다. 기후경제통합-지역평가모형이 포함하고 있는 내용이 다양하고 방대한 지식을 요구하기 때문이다. 이와 관련하여 본격적으로 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기에 앞서 현재 국내에서 진행 중인 연구들과 협력하는 방안을 고려할 필요가 있다.

먼저 환경부에서는 현재 중장기 과제로서 「한국형 상·하향식 온실가스 통합 감축 시스템 개발」 과제와 「기후변화 적응 통합모형 개발」 과제를 수행하고 있다. 각각의 연구결과들은 국내 온실가스 감축비용과 적응정책 비용 등 기후정책 모듈에서 사용할 수 있는 중요한 정보들을 제공할 것으로 기대된다. 또한, 환경부는 2010년부터 3개년 과제로 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석」(채여라 외, 2010~2012)을 수행한 바 있다. 해당 과제의 연구결과는 국내 기후변화 피해비용을 산출하는 데 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 한편 한국환경정책·평가연구원에서는 2016년부터 환경가치평가에 관한 종합 연구를 수행할 계획이다. 해당 연구의 결과는 비시장 가치를 명시적으로 모형에 고려하는 데 중요한 자료로 사용할 수 있을 것이다. 기상청에서는 현재 IPCC 6차 평가보고서 작성을 위한 전 세계 기후모형 비교 프로젝트인 CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)에 참여할 전

지구 모형을 개발하고 있다. 향후 기상청 전 지구 모형의 결과들은 기후경제통합-지역 평가모형의 기후모듈 모수들을 조정하는 데 활용할 수 있을 것이다.

실제로 모형을 개발하는 과정에서는 구체적인 일정이 달라질 수 있겠지만, 이상적인 경우에서의 모형개발 일정을 제시해보면 <그림 4-3>과 같다. 다섯 가지 과정을 모두 고려할 때 2~3년의 시간이 필요할 것으로 전망되며 가장 긴 시간을 요하는 것은 두 번째 과정으로 1~2년의 시간이 소요될 것으로 예상된다. 참고로 DICE 등 다른 모형들도 유사한 일정을 통해 개발되어 왔다.



<그림 4-3> 기후경제통합-지역평가모형 개발일정(안)

제5장 맺음말

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

그러나 대부분의 기후경제통합-지역평가모형에서 한국은 독립된 국가로 다루어지기보다는 기타 국가군에 포함되고 있어 모형의 결과를 국내 정책에 적용하는 데 한계가 있다. 한국의 경제규모와 온실가스 배출규모 등을 고려할 때 기후경제통합-지역평가모형에서 한국을 독립된 국가로 다루는 것은 국제 기후변화정책에서도 의미 있는 일이라고 할 수 있다.

이번 연구에서는 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 첫 번째 과정으로서 기존 모형에 대한 비교 분석 및 기초연구를 수행하였다. 비교분석에서는 기후경제통합-지역평가모형에서 사용하고 있는 사회후생함수를 비롯한 여러 요소를 유형화하고 개별 유형들은 이론을 바탕으로 일반화하였다. 또한, RICE 모형을 응용하여 지역(국가)별 기후변화 대응전략에 따른 최적 기후변화정책을 실증적으로 살펴보았다. 이러한 내용은 국가별로 취하는 선택과 전략에 따라 기후시스템이 변화하고 이에 따라 최적의 기후변화정책이 큰 폭으로 달라질 수 있음을 잘 보여준다. 이는 기후경제통합-지역평가모형의 필요성을 더욱 뚜렷하게 보여준다고 할 수 있다.

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. 이와 관련하여 이번 연구에서는 비교분석 및 실증 연구를 바탕으로 향후 국내에서 기후경제통합-지역평가모형을 개발하기 위한 틀과 잠정적인 일정을 제시하였다. 실증 연구에서 사용한 수치모형은 게임이론을 활용한 국제 기후 변화협상모형을 개발하는 데 사용할 수 있으며, 더 나아가 한국을 독립된 지역으로 포함하는 모형을 구축하는 데 있어 기초 모형으로 활용될 수 있다.

참고문헌

<국문 자료>

- 강성원 외. 2014. 「중장기 환경전망 및 대응전략-KEI 통합환경모형 연구」. 한국환경정책·평가연구원.
- 김용건 외. 2014. 「온실가스 감축정책 평가를 위한 환경경제모형 개발·운용」. 한국환경정책·평가연구원.
- 채여라 외. 2010. 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석(Ⅰ)」. 환경부.
- _____. 2011. 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석(Ⅱ)」. 환경부.
- _____. 2012. 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석(Ⅲ)」. 환경부.

<영문 자료>

- Abbott, J. K. and Fenichel, E. P. 2014. "Following the Golden Rule: Negishi Welfare Weights without Apology." Unpublished Manuscript.
- Ackerman, F., Stanton, E. A. and Bueno, R. 2013a. "CRED: A New Model of Climate and Development." *Ecological Economics*, 85: 166-176.
- _____. 2013b. "Epstein-Zin utility in DICE: Is Risk Aversion Irrelevant to Climate Policy?" *Environmental and Resource Economics*, 56: 73-84.
- Anthoff, D., Hepburn, C., and Tol, R. S. J. 2009. "Equity Weighting and the Marginal Damage Costs of Climate Change." *Ecological Economics*, 68: 836-849.
- Anthoff, D. and Tol, R. S. J. 2010. "On International Equity Weights and National Decision Making on Climate Change." *Journal of Environmental Economics and Management*, 60(1): 14-20.
- _____. 2014a. "The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), Technical Description, Version 3.9." available at <http://www.fund-model.org/>.

- _____. 2014b. "Climate Policy under Fat-tailed Risk: An Application of FUND." *Annals of Operations Research*, 220(1): 223-237.
- Arrow, K. J. 1954. *Social Choice and Individual Values*. New York: Wiley.
- Arrow, K. J. et al. 2013. "How should Benefits and Costs be Discounted in an Intergenerational Context? ." University of Sussex Working Paper No. 56-2013.
- Asheim, G. B. and Mitra, T. 2010. "Sustainability and Discounted Utilitarianism in Models of Economic growth." *Mathematical Social Science*, 59: 148-169.
- Baker, M. B. and Roe, G. H. 2009. "The Shape of Things to Come: Why is Climate Change so Predictable? ." *Journal of Climate*, 22: 4574-4589.
- Bartz, S. and Kelly, D. 2008. "Economic Growth and the Environment: Theory and Facts." *Resource and Energy Economics*, 30: 115-149.
- Bikhchandani, S., Hirshleifer, J. and Riley, J. G. 2013. 2nd eds. *The Analytics of Uncertainty and Information*. New York: Cambridge University Press.
- Böhringer, C., Lschel, A., Rutherford, T. F. 2007. "Decomposing the Integrated Assessment of Climate Change." Unpublished Manuscript.
- Bosello, F. and De Cain, E. 2014. "Documentation on the Development of Damage Functions and Adaptation in the WITCH Model." CMCC Research Papers Issue RP0228.
- Bosetti, V., Massetti, E. and Tavoni, M. 2007. "The WITCH Model: Structure, Baseline, Solutions." FEEM Research Paper NOTA DI LAVORO 10. 2007.
- Botzen, W. J. W. and van der Bergh, J. C. J. M. 2014. "Specifications of Social Welfare in Economic Studies of Climate Policy: Overview of Criteria and Related Policy Insights." *Environmental and Resource Economics*, 58: 1-33.
- Cass, D. 1965. "Optimum Growth in an Aggregative Model of Capital Accumulation." *Review of Economic Studies*, 32: 233-240.
- Chae, Y. 2006. *Estimating Climate Change Damage Using PAGE model*. Korea Environment Institute.

- Chichilnisky, G., Heal, G. and Beltratti, A. 1995. "The Green Golden Rule." *Economics Letters*, 49: 175-179.
- Chichilnisky, G. 1996. "An Axiomatic Approach to Sustainable Development." *Social Choice and Welfare*, 13(2): 231-257.
- _____. 1997. "What is Sustainable Development? ." *Land Economics*, 73(4): 467-491.
- _____. 2009. "Avoiding Extinction: Equal Treatment of the Present and the Future." *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 3: 1-25.
- Clarke, L. et al. 2014. "Assessing Transformation Pathways." *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp.413-510, Edenhofer, O. et al. eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Clarkson, R. and Deyes, K. 2002. "Estimating the Social Cost of Carbon Emissions." Government Economic Service Working Paper 140. HM Treasury.
- Cline, W. R. 1992. *The Economics of Global Warming*. Institute for International Economics.
- de Bruin, K. C., Dellink, R. B. and Tol, R. S. J. 2009. "AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model." *Climatic Change*, 95(1-2): 63-81.
- de Bruin, K. C. 2014. "Calibration of the AD-RICE 2012 model." Unpublished manuscript.
- Diamond, P. A. 1965. "National Debt in a Neoclassical Growth Model." *American Economic Review*, 55: 1126-1150.
- Dietz, S. and Asheim, G. B. 2012. "Climate Policy under Sustainable Discounted Utilitarianism." *Journal of Environmental Economics and Management*, 63: 321-335.

- Eeckhoudt, L., Gollier, C. and Schlesinger, H. 2005. *Economic and Financial Decisions under Risk*. Princeton: Princeton University Press.
- Ellsberg, D. 1961. "Risk, Ambiguity, and the Savage Axioms." *Quarterly Journal of Economics*, 75: 643-669.
- Epstein, L. G. and Zin, S. E. 1989. "Substitution, Risk Aversion, and the Temporal Behavior of Consumption and Asset Returns: A Theoretical Framework." *Econometrica*, 57(4): 937-969.
- Epstein, L. G. and Zin, S. E. 1991. "Substitution, Risk Aversion, and the Temporal Behavior of Consumption and Asset Returns: An Empirical Analysis." *Journal of Political Economy*, 99(2): 263-286.
- Fankhauser, S., Tol, R. S. J. and Pearce, D. W. 1997. "The Aggregation of Climate Change Damages: A Welfare Theoretic Approach." *Environmental and Resource Economics*, 10: 249-266.
- Finus, M., Ierland, E., and van and Dellink, R. 2003. "Stability of Climate Coalitions in a Cartel Formation Game." FEEM Working Paper 61, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Helm, D.(eds). 2005. *Climate-Change Policy*, New York: Oxford University Press.
- Hope, C., Anderson, J. and Wenman, P. 1993. "Policy Analysis of the Greenhouse Effect: An Application of the PAGE model." *Energy Policy*, 21(3): 327-338.
- Hope, C. 2011. "The PAGE09 Integrated Assessment Model: A Technical Description." University of Cambridge Working Paper Series 4/2011.
- _____. 2013. "Critical Issues for the Calculation of the Social Cost of CO₂: Why the Estimates from PAGE 09 are Higher than those from PAGE 2002." *Climatic Change*, 117(3): 531-543.
- Hwang, I. C. 2014. "A Recursive Method for Solving A Climate-economy Model: Value Function Iterations with Logarithmic Approximations." MPRA Working Paper No. 54752.

- Hwang, I. C., Reynes, F. and Tol, R. S. J. 2013a. "Climate Policy under Fat-tailed Risk: An Application of DICE." *Environmental and Resource Economics*, 56(4): 415-436.
- Hwang, I. C., Tol, R. S. J. and Hofkes, M. W. 2013b. "Active Learning about Climate Change." University of Sussex Working Paper No. 65-2013.
- _____. 2016. "Fat-tailed Risk about Climate Change and Climate Policy." *Energy Policy*, 89: 25-35.
- Inada, K. 1964. "Some Structural Characteristics of Turnpike Theorems." *Review of Economic Studies*, 31(January): 43-58.
- IPCC. 2014. *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, 151 pp.
- IWGSCC. 2010. *Technical Support Document: Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis-Under Executive Order 12866*. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government.
- _____. 2013. *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.
- Kahneman, D. and Tversky, A. 1979. "Prospect theory: An analysis of decision under risk." *Econometrica*, 47(2): 263-291.
- Kelly, D. L. and Kolstad, C. D. 1999a. "Integrated Assessment Models for Climate Change Control." In Folmer, H. and Tietenberg, T. eds. 1999. *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- _____. 1999b. "Bayesian Learning, Growth, and Pollution." *Journal of Economic Dynamics and Control* 23: 491-518.

- Kim, Y. G. 2004. *A Game-theoretic Analysis on Negotiation Mechanisms for Climate Change Mitigation*, Korea Environment Institute.
- Klibanoff, P., Marinacci, M. and Mukerji, S. 2005. "A Smooth Model of Decision Making under Ambiguity." *Econometrica*, 73(6): 1849-1892.
- Knight, C. G. and Jager, J. 2009. "Integrated Regional Assessment." In Knight, C. G. and Jager, J. eds. 2009. *Integrated Regional Assessment of Global Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Koopmans, T. C. 1965. "On the Concept of Optimal Economic Growth." In *The Economic Approach to Development Planning*. Amsterdam: Elsevier.
- Kurosawa, A. 2004. "Carbon Concentration Target and Technological Choice." *Energy Economics*, 26: 675-684.
- Lucas, R. E. 1988. "On the Mechanics of Economic Development." *American Economic Review*, 80: 92-96.
- Maier-Reimer, E. and Hasselmann, K. 1987. "Transport and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: An Inorganic Ocean Circulation Carbon Cycle Model." *Climate Dynamics*, 2: 63-90.
- Mankiw, N., Romer, G. and Weil, D. N. 1992. "A Contribution to the Empirics of Economic growth." *Quarterly Journal of Economics*, 107: 407-437.
- Manne, A. S., Mendelsohn, R. and Richels, R. 1995. "A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies." *Energy Policy*, 23(1): 17-34.
- Manne, A. S. and Richels, R. 2005. "MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change." In Loulou, R. et al. eds. 2005. *Energy and Environment*. Springer US.
- Marten, A. L. 2011. "Transient Temperature Response Modeling in IAMs: The Effects of over Simplification on the SCC." *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 5: 1-23.

- Masui, T. et al. 2006. "Assessment of CO₂ Reductions and Economic Impacts Considering Energy-saving Investments." *The Energy Journal*, 27(Special issue): 175-190.
- McKinsey and Company. 2009. "Pathways to low-carbon economy." Available at <http://www.mckinsey.com/>
- Mendelsohn, R. O., Nordhaus, W. D. and Shaw, D. 1994. "The Impact of Climate Change on Agriculture: A Ricardian Analysis." *American Economic Review*, 84: 753-771.
- Millner, A., Dietz, S. and Heal, G. 2013. "Scientific Ambiguity and Climate Policy." *Environmental and Resource Economics*, 55: 21-46.
- Negishi, T. 1960. "Welfare Economics and Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy." *Metroeconomica*, 12(2-3): 92-97.
- Nordhaus, W. D. 1991. "To Slow or Not to Slow: The Economics of the Greenhouse Effect." *Economic Journal* 101(407): 920-937.
- _____. 1994a. *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge: MIT Press.
- _____. 1994b. "Expert Opinion on Climate Change." *American Scientist* 82(1): 45-51.
- _____. 2008. *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*. New Haven and London: Yale University Press.
- _____. 2010. "Economic Aspects of Global Warming in a Post Copenhagen Environment." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(26): 11721-11726.
- _____. 2013. *The Climate Casino*. New Haven: Yale University Press.
- Nordhaus, W. D. and Yang, Z. 1996. "A Regional Dynamic General-equilibrium Model of Alternative Climate-change Strategies." *American Economic Review* 86(4): 741-765.

- Nordhaus, W. D. and Boyer, J. 2000. *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. Cambridge: MIT Press.
- Pearce, D. 2005. "The Social Cost of Carbon." In Helm, D.(eds) 2005. *Climate-change Policy*, New York: Oxford University Press.
- Peck, S. C. and Teisberg, T. J. 1996. "International CO₂ Emissions Targets and Timetables: An Analysis of the AOSIS Proposal." *Environmental Modeling and Assessment*, 1: 219-227.
- _____. 1999. "CO₂ Concentration Limits, The Costs and Benefits of Control, and the Potential for International Agreement." In Carraro, C. eds. 1999. *International Environmental Agreements on Climate Change*. Springer Netherlands.
- Quggin, J. 1982. "A theory of Anticipated Utility." *Journal of Economic Behavior and Organization*, 3: 323-343.
- Ramsey, F. P. 1928. "A Mathematical Theory of Saving." *The Economic Journal*, 38(152): 543-559.
- Rawls, J. 1974. "Some Reasons for the Maximin Criterion." *The American Economic Review*, 64(2): 141-146.
- Roemer, J. E. 2011. "The Ethics of Intertemporal Distribution in a Warming Planet." *Environmental and Resource Economics*, 48: 363-390.
- Romer, D. 2006. 3rd ed. *Advanced Macroeconomics*. New York: McGraw-Hill Irwin.
- Romer, P. M. 1990. "Endogenous Technological Change." *Journal of Political Economy*, 98: S71-S102.
- Rosenthal, R. E. 2015. "GAMS-A user's Guide." Available at www.gams.com/
- Rutherford, T. F. 1999. "Sequential Joint Maximization." In Weyant, J. eds. 1999. *Energy and Environmental Policy Modeling*. Norwell: Kluewer Academic Publishers.
- Savage, L. J. 1951. "The Theory of Statistical Decision." *Journal of the American Statistical Association*, 46(253): 55-67.

- Solow, R. M. 1956. "A Contribution to the Theory of Economic Growth." *Quarterly Journal of Economics*, 70: 65-94.
- Stanton, E. A., Ackerman, F. and Kartha, S. 2008. "Inside the Integrated Assessment Models: Four Issues in Climate Economics." Stockholm Environment Institute Working Paper WP-US-0801.
- Stanton, E. A. 2011. "Negishi Welfare Weights in Integrated Assessment Models: The Mathematics of Global Inequality." *Climatic Change*, 107: 417-432.
- Stern, N. H. 2006. *Stern Review: The Economics of Climate Change*. London: HM Treasury.
- Sterner, T. and Persson, U. M. 2008. "An even Sterner Review: Introducing Relative Prices into the Discounting Debate." *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(1): 61-76.
- Tol, R. S. J. 1997. "On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions: An Application of FUND." *Environmental Modeling and Assessment*, 2: 151-163.
- _____. 1999. "Time Discounting and Optimal Emission Reduction: An Application of FUND." *Climatic Change*, 41: 351-362.
- _____. 2001. "Equitable Cost-benefit Analysis of Climate Change Policies." *Ecological Economics*, 36: 71-85.
- _____. 2002a. "Estimates of the Damage Costs of Climate Change. Part 1: Benchmark Estimates." *Environmental and Resource Economics*, 21: 47-73.
- _____. 2002b. "Estimates of the Damage Costs of Climate Change. Part 2: Dynamic Estimates." *Environmental and Resource Economics*, 21: 135-160.
- _____. 2009. "The Economic Effects of Climate Change." *The Journal of Economic Perspectives*, 23: 29-51.
- _____. 2013. "Targets for Global Climate Policy: An Overview." *Journal of Economic Dynamics and Control*, 37: 911-928.

- _____. 2014. *Climate Economics*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Varian, H. R. 2010. 8th eds. *Intermediate Microeconomics*. New York: Norton and Company.
- Von Neumann, J. and Morgenstern, O., 1944. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press.
- Weitzman, M. 2009. "On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change." *Review of Economics and Statistics*, 91(1): 1-19.
- Weitzman, M. L. 2012. "GHG Targets as Insurance Against Catastrophic Climate Damages." *Journal of Public Economic Theory*, 14(2): 221-244.
- Weyant, J. P. et al. 1996. "Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results," pp.367-439 in Bruce, J. P. et al. eds. 1996. *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.
- _____. 2013. "Introduction to the EMF28 Study on Scenarios for Transforming the European Energy System." *Climate Change Economics*, 4(Supp01), 1302001.
- Wong, K. Y. 2012. *Evaluating Climate Change Taxation for Economic and Environmental Policy Purposes in Malaysia: Insights from the Enhanced PAGE 09 Integrated Assessment Model*. Ph. D. thesis, University of Cambridge.
- World Bank. 2015. World Development Indicators. Available at <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>.
- Yang, Z. 2008. *Strategic Bargaining and Cooperation in Greenhouse Gas Mitigations*. Cambridge: The MIT Press.

Abstract

Regional Integrated Assessment Models of Climate and the Economy: Comparative Analysis and a Framework for a New Model

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 place 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, including social welfare function, economic module, climate module, and policy module. The focus is 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. The current paper suggests a framework for the development of a new RIAM (or potential extensions of the current RIAMs).

As an application, this paper examines the effect of social welfare functions on cooperative solutions of the RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy) model. It is found that optimal solutions such as carbon taxes and emissions control rates are very sensitive to the assumptions on social welfare functions of RIAMs. Depending on social welfare functions winners and losers of climate negotiation change their positions. This signifies the importance of considering as many RIAMs as possible for climate negotiation.

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.

This paper is a good starting point for the development of a new RIAM. For instance, a game-theoretic model of climate change negotiation is a promising application. 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, Integrated Assessment, Regional Assessment Model, Climate Policy, RICE

■
연구진 약력

황인창

네덜란드 VU University Amsterdam 경제학 박사

한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)

E-mail: ichwang@kei.re.kr

주요 논문 및 보고서

「MAED 모형을 이용한 서울시 에너지 수요 전망」 (2015, 한국환경정책학회)

「Climate Policy under Fat-tailed Risk: An Application of DICE」 (2013, EAERE*)

* European Association of Environmental and Resource Economists

| KEI Working Paper 목록 | 2013~2015

- 2015년
- 2015-01 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선방안 연구(김윤승)
 - 2015-02 이슈스캐닝(Horizon Scanning)기법 활용을 통한 물환경관리 부문 이머징 이슈 발굴 연구(한혜진)
 - 2015-03 기후경제통합-지역평가모형(Regional Integrated Assessment Model of Climate and the Economy) 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구(황인창)
 - 2015-04 기후변화로 인한 고온환경 근로자의 작업역량 저하 추정과 공간적 군집 파악 (김동헌)
 - 2015-05 환경영향평가 설명회·공청회 운영현황 분석(조공장)
 - 2015-06 도로 및 철도 사업의 토양분야 환경영향평가 사례 연구(신경희)
 - 2015-07 빅데이터를 활용한 환경보건서비스에 관한 기초연구(간순영, 윤성지)
 - 2015-08 자원순환분야 지속가능발전목표(SDGs) 이행 기반 마련을 위한 기초연구(임혜숙)
 - 2015-09 내륙습지에 대한 환경영향평가 개선방안 연구 I - 환경부 전국내륙습지 조사 지침(2011)의 적용을 중심으로(방상원)
 - 2015-10 자원순환성 평가제도 대상 확대를 위한 기초연구(이소라)
 - 2015-11 환경소음 빅데이터의 정책 활용성 제고 방안(박영민)
 - 2015-12 인과지도(Causal Loop)를 활용, 미래 물수급관리 정책 지원을 위한 기초연구 (류재나)
 - 2015-13 생물안전 법제 기초연구(홍현정)
 - 2015-14 지방자치단체 환경영향평가 조례 운영현황 및 효율화 방안(선효성)
 - 2015-15 개발사업의 비점오염 영향평가방법 개발을 위한 기초연구(이진희)
 - 2015-16 환경영향평가제도에서의 생태계보전협력금 활용 개선방안(이상범)
 - 2015-17 환경가치 증장기 연구수요 조사(곽소윤)
 - 2015-18 세종특별자치시의 대기질 관리 기획 연구(심창섭)
 - 2015-19 2015 국민환경의식조사 연구(곽소윤)
- 2014년
- 2014-01 국내 지하수의 자원·환경적 가치 확립을 위한 기초연구(현윤정)
 - 2014-02 층간소음의 건강영향에 대한 기초연구(박영민)
 - 2014-03 소음원 종류에 따른 3차원 소음예측모델 적용방안 마련(선효성)
 - 2014-04 개발사업 입지 및 계획기준의 조사·분석에 관한 연구(주용준)
 - 2014-05 기후변화 취약 근로 직종 파악을 위한 기초 연구(김동헌)
 - 2014-06 불확실성을 고려한 수질오염총량관리 안전율 산정 기초연구(정선희)
 - 2014-07 기후변화 적응을 위한 공간계획 수립 시 도시/환경/방재분야 공간정보 연계·활용방안 연구(김태현)
 - 2014-08 기후변화를 반영한 내수침수 리스크 평가 방법론 고찰(류재나)
 - 2014-09 SEA 사후관리를 위한 해외 사례연구(조한나)

- 2014-10 농어촌 관련 정책 및 계획에서의 기후변화 적응 고려 방안(임영신)
- 2014-11 소음·진동 사후관리를 위한 기초연구(선효성)
- 2014-12 2014 국민환경의식조사 연구(이미숙)

- 2013년**
- 2013-01 토양자원 유실 최소화를 위한 국내외 환경영향평가 사례 연구(신경희)
 - 2013-02 PM-2.5 환경영향평가 방안 연구(이영수)
 - 2013-03 지자체 적응대책 수립지원을 위한 기후변화 시나리오 자료 활용 방안(정휘철)
 - 2013-04 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련(이명진)
 - 2013-05 비전통가스 개발의 환경영향평가 가이드라인 마련을 위한 기초연구(조한나)
 - 2013-06 모니터링을 통한 친환경 계획기법의 적절성 검증 기초연구 - 도시공간에서의 stepping stone을 중심으로(최희선)
 - 2013-07 국가와 지자체의 기후변화 적응대책 실효성 제고를 위한 연계강화 방안(임영신)
 - 2013-08 KEI 환경정보체계 발전방안(전성우)
 - 2013-09 도시하천 유역의 환경평가 방법 마련을 위한 기초 연구(홍현정)
 - 2013-10 제조업 환경비용의 국제비교(조일현)
 - 2013-11 바이오가스의 신재생연료 의무혼합제도에 관한 해외사례 분석(조지혜)
 - 2013-12 자연경관심의제도의 현황분석 및 제도 개선방안(주용준)
 - 2013-13 층간소음 관리를 위한 기초연구(박영민)
 - 2013-14 지속가능성 관점에서의 산업구조 변화 분석(이미숙)
 - 2013-15 KEI 중국환경 중장기 연구계획 수립을 위한 기획연구(추장민)
 - 2013-16 기후변화 적응관련 취약계층 지원대책 현황조사 및 분석 연구(신지영)
 - 2013-17 한국 ODA사업의 환경평가 모니터링 현황과 해외사례 비교 연구 - 사업 종료 후 모니터링 사례를 중심으로(김태형)
 - 2013-18 국내 전략환경평가의 사회·경제성 부문 기능 확립을 위한 기초연구(이상윤)
 - 2013-19 환경영향평가시의 시설별 유해대기오염물질 배출량 산정을 위한 기초연구 (주현수)
 - 2013-20 지형장애물 분석을 통한 환경현황자료 작성방안(김지영)
 - 2013-21 상수원보호구역 상·하류의 수변지역 관리방안 연구 - 잠실상수원 보호구역과 팔당상수원 보호구역 구간 중심으로(김태윤)
 - 2013-22 2013 국민환경의식조사 연구(이미숙)

※ KEI 설립 이후 현재까지의 보고서 원문은 KEI 홈페이지(www.kei.re.kr)에서 보실 수 있습니다.

KEI Working Paper 2015-03

기후경제통합 - 지역평가모형 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구



한국환경정책·평가연구원

Korea Environment Institute

30147 세종특별자치시 시청대로 370

세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)

Tel 044.415.7777 Fax 044.415.7799

<http://www.kei.re.kr>



9 780124 639446
ISBN 978-89-9464-044-6