

## RCP-SSP 매트릭스를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용 산정

- I. 머리말
- II. 기후변화의 경제적 피해비용 산정 사례
- III. PAGE09 모델을 이용한 기후변화 피해  
비용 산정방법
- IV. 대표농도 경로(RCP) 및 공통사회경제  
경로(SSP) 분석
- V. RCP-SSP 매트릭스를 적용한 기후변화  
피해비용 산정
- VI. 결론 및 정책적 시사점



[www.kei.re.kr](http://www.kei.re.kr)



## 요약

기후변화 및 사회경제 발전경로 시나리오 매트릭스를 적용해 기후변화의 경제적 피해를 산정하였다. 시나리오로는 4개의 대표농도 경로(RCP 8.5, 6.0, 4.5, 2.6)와 3개의 공통사회경제 경로(SSP 1, 2, 3)를 적용하였다. 온도상승이 4℃ 이상으로 예측되는 RCP 8.5 시나리오와 화석연료 위주의 경제구조가 지속되는 SSP 3 시나리오 조합의 경우 2100년의 기후변화 피해비용은 GDP의 약 5.2%를 차지할 것으로 나타났다. RCP 2.6 시나리오와 저탄소기술 개발이 이루어지고 친환경적인 생활양식이 확대되는 SSP 1의 조합에서는 2100년의 피해비용이 GDP의 약 0.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 동일한 RCP 6.0 시나리오에서 SSP 1, 2, 3의 피해비용은 각각 GDP의 약 2.3%, 2.3%, 2.5%로 나타났다. 적응정책의 이행이 빠를수록 피해비용 감소효과가 큰 것으로 분석되었다. 적응정책을 이행할 경우 SSP 2 시나리오 하에서 RCP 6.0은 2100년에 약 26.1%, RCP 4.5는 약 33.8%의 피해비용 저감이 가능하다. 미래 기후변화로 인한 피해비용을 최소화하기 위해서는 온실가스 저감과 함께 지속 가능한 사회경제 경로로의 전환이 필요함을 시사한다.

\* 본 내용은 한국환경정책·평가연구원(KEI)의 기본연구인 「IPCC 신시나리오 체계를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용분석」의 일부를 요약·정리하고, 논의를 심화하여 시사점 및 정책 방향을 제시한 것임을 밝힙니다.

## 집필진

**채여라** 선임연구위원

기후대기연구부

yrchae@kei.re.kr

**이주형** 연구원

기후대기연구부

joohyunglee@kei.re.kr

## I

## 머리말

합리적 시나리오의 개발 및 적용은 기후변화에 대한 합리적 정책 결정에 중요한 역할을 한다. 기후변화 시나리오는 인위적인 온실가스 배출로 발생하는 기후변화의 잠재적 결과를 연구할 목적으로 구성된 다양하고 미래에 실현 가능한 경로를 의미한다.<sup>1)</sup> 시나리오 분석은 미래의 다양한 기후요인과 사회경제적 요인 등에 관해 복잡하고 불확실한 요인 간의 상호작용과 기후정책에 관한 효과를 합리적으로 분석할 수 있다. 기후변화로 인해 다가올 미래와 우리가 바라는 미래의 간극을 분석하고 여러 정책대안을 비교할 수 있어 기후변화의 시나리오 활용은 기후변화와 기후변화 정책을 평가하는 데 중요한 도구가 되고 있다(Vuuren et al., 2011, p.575).

2015년 파리 협정에서 국제사회는 공동의 장기 목표로 “산업화 이전 대비 지구 기온의 상승 폭(2100년 기준)을 2℃보다 훨씬 낮게 유지하고, 더 나아가 온도 상승을 1.5℃ 이하로 제한하기 위하여 노력한다”라고 합의하였다. 또한 파리협정에서는 기후변화의 부정적 영향으로 인한 피해와 손실을 단독 조항으로 규율하며 적응의 중요성을 강조하였다(UN, 2015). 파리협정에서 합의한 온도 상승을 2℃ 이하로 안정화하고 이미 배출된 온실가스로 인한 기후변화 피해를 최소화하기 위한 기후변화 대응 의사결정을 위해서는 불확실한 미래에 관한 다중 시나리오를 기반으로 미래의 피해규모를 파악하는 것이 중요하다. 현재 각국의 NDC(Nationally Determined Contributions)를 반영하고 추가적인 1.5℃ 경로에 대한 연구 및 지구 온도를 2℃ 이하로 낮추기 위해 다양한 배출경로를 찾으려는 연구가 지속적으로 수행 중이다(IPCC, 2014; UNEP, 2016). 미래의 피해규모를 파악하고 기후변화 정책 의사결정을 위해 주요 연구기관에서는 통합모형(IAM: Integrated Assessment Model)을

1) IPCC, “Scenario Process for AR5”, 검색일: 2017.9.4.

이용해 국가 및 전 세계의 기후변화 피해규모를 산출한다. 통합모형을 통해서 산출할 수 있는 탄소의 사회적 비용과 미래의 국가 피해규모 추정은 국가 기후변화 정책 수립에 기초가 되며, 동시에 신기후체제에서 기후변화 관련 국제협상을 수행하는 데 근거가 될 수 있다(Helm, 2005, p.6).

2017년 10월 미국 트럼프 행정부는 『국가 청정발전계획의 영향평가규제(2017)』를 위한 이산화탄소의 사회적 비용에 기존보다 높은 할인율을 적용하고 피해범위를 미국 내로 한정함으로써 2015년 이산화탄소의 사회적 비용을 36달러에서 5달러로 변경하였다(EPA, 2017, p.44). 이에 따라 미국의 에너지계획, 신규 발전소 건설 계획 및 전환 등 국가 의사결정에 대한 비용편익은 기존에 비해 현저히 낮게 적용될 것으로 예상된다. 트럼프 정부의 기후변화 정책 기초를 반영하기 위해 동일 방법론과 모형을 사용하였으나 할인율과 피해범위가 조정됨으로써 향후 미국의 저탄소 기술 및 사업은 비용편익 분석에 있어 매우 불리할 것으로 예상된다.

이와 같이 장기간에 걸친 미래 기후변화의 피해비용 산정은 큰 불확실성과 논란의 여지를 내포한다. 기후변화의 피해비용은 본질적으로 사회경제 경로, 기후 시스템의 변화 등의 상호작용에 따라 달라진다. 그럼에도 불구하고 현재 가용한 정보를 바탕으로 다양한 미래상에 대한 기후변화의 피해규모를 합리적으로 산정하는 것은 기후변화 관련 의사결정에 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구의 목적은 IPCC 신시나리오 체제를 적용한 기후(RCP: Representative Concentration Pathways) 및 사회경제(SSP: Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오에 대한 우리나라 기후변화의 피해비용을 분석함으로써 정책방향을 제시하는 것이다. 본고는 IPCC에서 제공하는 4가지 RCP시나리오와 3가지 사회경제 경로의 SSP시나리오 매트릭스를 적용하여 기후변화 피해비용을 산정하였다. 피해비용을 산정하기 위해 전 지구적 통합모형인 PAGE(Policy Analysis of Greenhouse Effect) 모델을 활용하였고, 시나리오별로 예상되는 다양한 미래 상황에 대해 기후변화 피해비용을 분석하고 정책적 시사점을 제시하였다.

# I

## 기후변화의 경제적 피해비용 산정 사례

미래의 기후변화로 인한 경제적 피해분석 연구들은 주로 지역별 혹은 세계적 피해규모를 국민총생산(GDP) 분율로 산정한다.<sup>2)</sup> 기후변화 시나리오를 적용해 통합모형에서 산출되는 장기적인 기후변화 피해비용을 산정하고, 적응과 감축 정책의 옵션을 설정함으로써 비용의 차이와 편익 분석을 시도한다. 분석에 사용된 모형으로는 PAGE,<sup>3)</sup> DICE,<sup>4)</sup> FUND,<sup>5)</sup> ENV-Linkage,<sup>6)</sup> AD-WITCH,<sup>7)</sup> SEAGLAS<sup>8)</sup> 등이 있다.

채여라 외(2012)는 우리나라의 기후변화 피해비용을 2100년 GDP의 약 2.85%(BAU 시나리오), 0.59%(2℃ 시나리오)로 분석하였다. ADB(2014)는 남아시아 6개국에서 시나리오별로 GDP의 8.8%(BAU 시나리오), GDP의 2.5%(C-C 시나리오), ADB(2013)는 태평양 지역의 섬나라에 대해 국가별로 2100년 GDP의 약 3.6~10.9%(FUND 모형, SRES 시나리오별)과 GDP의 약 2.9%~12.7%(PAGE 모형, SRES 시나리오 및 450ppm 시나리오)로 피해비용을 산정하였다. 앞서 ADB(2013)는 동남아 4개국의 2100년 기후변화 피해금액을 GDP의 6.7%(SRES A2 시나리오), GDP의 3.4%(S450 시나리오), GDP의 4.6%(S550 시나리오)로 산정했다. Hsiang et al. (2017)은 미국 지역에 대해 RCP 시나리오(8.5, 4.5, 2.6)를 사용해 지역별 피해비용의 변화를 분석하였고, 그 결과 RCP 8.5에서 21세기 후반이 되면

2) ADB(2009, 2013, 2014); Agrawala et al.(2011); Hsiang et al.(2017); OECD(2015).

3) 채여라(2012); ADB(2009, 2013, 2014).

4) Agrawala et al.(2011); IWG(2010, 2016); OECD(2015).

5) ADB(2013); IWG(2010, 2016).

6) OECD(2015).

7) Agrawala et al.(2011).

8) Hsiang et al.(2017).

피해비용이 지역별로 1.0~3.0% 발생할 수 있으며, 기후변화로 인해 지역별 불균형이 심화될 가능성이 있다고 한다. Burke et al.(2015)은 전 세계의 경제 생산력이 온도 상승과 선형적으로 발생한다는 기존의 문헌들과는 다르게 온도 상승에 따라 경제피해는 비선형적으로 발생한다는 증거를 제시했다. 분석에 따르면 기후변화로 인해 RCP 8.5-SSP 5 매트릭스 시나리오에서 2100년에 전 세계 국가의 5%가 소득이 감소하며, RCP 8.5-SSP 3 매트릭스는 43%의 국가가 소득이 줄어든 것으로 분석되었다.

기후변화의 피해비용 산정은 적응정책 혹은 감축정책의 유무에 대한 효과를 분석하는 데 활용된다. 채여라 외(2012)는 적응정책의 실행 시기를 조정하여 비용편익을 분석하였다. 분석 결과, 적응의 시기가 빠를수록 편익이 더 높은 것으로 나타났다. OECD(2015)의 경우 두 가지 모형을 사용해 전 지구적/지역별 피해비용과 적응효과, 감축효과를 분석했다. 모형의 'Flow Adaptation' 적응정책을 이용할 경우 2100년에 전 세계 피해비용이 GDP의 약 5.8%였던 것에 비해 적응이 없는 시나리오에서는 11.1%로 나타나 6.5% 이상의 GDP 손실이 발생하였으며, 'Full Adaptation' 시나리오에서는 GDP 분율 1.2%의 편익이 발생 가능한 것으로 분석하였다. ADB(2009, 2013, 2014)의 경우 주로 적응의 목표(해수면 상승 제한, 온도 상승 제한, 적응정책 목표연도) 설정을 통해서 기후변화 시나리오별 적응정책의 목표별 적응비용과 피해비용을 분석해 비용편익 분석을 시도하였다. Agrawala et al.(2011)의 경우 AD-DICE와 AD-WITCH 모형을 통해 기후변화 무적응, 적응정책만 시행, 감축정책만 시행, 적응과 감축정책을 모두 시행할 경우의 전 세계 GDP % 손실을 분석하여 정책별 효과와 통합정책의 효과를 분석하였다. 적응만 수행(비용최적화 시나리오)할 경우 각 모형에서 2%, 1.8%가량의 GDP 손실이 나타났으며, 2100년 목표의 550ppm 온실가스농도 안정화 시나리오를 설정한 감축정책만 수행할 경우 각각 GDP 분율 약 2%의 피해가 발생했다. 적응과 감축정책을 모두 수행할 경우 두 모형 모두에서 2100년 1.2%가량의 GDP 손실이 발생하여, 기후변화 피해비용 저감을 위해 온실가스 감축과 적응정책을 통합적으로 수행할 시 피해비용이 줄어드는 것으로 분석했다.

기후변화의 주원인이 되는 이산화탄소의 사회적 비용에 대한 연구는 정책적 비용 산정을 위해 이루어지고 있다. 미국 정부의 경우 3가지 통합모형(DICE, FUND, PAGE)을 활용하여 규제법안 발의 시 경제적 영향 평가를 위한 사회적 탄소비용을 정기적으로 평가하였다(IWG, 2010, 2016; EPA, 2017). 할인율에 따라 2050년까지의 탄소비용을 제시하며, 2050년의 이산화탄소 1톤당 비용을 26달러, 59달러, 95달러(할인율 각 2.5%, 3%, 5%)로 산정하였다(IWG, 2016). 반면,

EPA(2017)는 최근 『청정발전계획(2017)』 법안을 위한 비용평가 검토서에서 할인율과 산정규모를 변경하여 2050년의 이산화탄소 1톤당 비용을 10달러, 2달러(할인율 각 3%, 7%)로 제시하고 있다. Wong et al.(2016)은 PAGE09 모형을 이용하여 말레이시아의 탄소세 비용에 적합한 사회적 비용을 산정하였다. 그 결과 2050년 1톤당 비용은  $225.1 \pm 3.8$  달러(SRES A1B 시나리오),  $100.9 \pm 3.2$  달러(Low-Emission 시나리오)로 산정되었다.

표 1. 기후변화의 경제학적 피해비용 분석 연구 비교

저자	분석연도 평균 피해비용	시나리오	분석대상	모형
채여라 외 (2012)	· 2050년: GDP 약 0.6% · 2100년: GDP 약 3%	· HBAU, MBAU, LBAU 시나리오 · 2℃ 시나리오	한국	PAGE2002 PAGE09
ADB (2014)	· 2050년: GDP 1.8% · 2100년: GDP 8.8%	· BAU 시나리오	남아시아 6개국	PAGE09
	· 2050년: GDP 1.3% · 2100년: GDP 2.5%	· 코펜하겐-칸쿤 시나리오		
ADB (2013)	· 2050년: GDP 2.7~3.5% · 2100년: GDP 3.6~10.9%	· SRES(B1, A1B, A2)	태평양 지역	FUND3.6
	· 2050년: GDP 2.2~2.8% · 2100년: GDP 2.9~12.7%	· SRES(A1FI, A1B) 450ppm 시나리오		PAGE09
ADB (2009)	· 2100년: GDP 6.7%	· A2 시나리오	동남아시아 4개국	PAGE2002
	· 2100년: GDP 3.4%	· S450 시나리오		
	· 2100년: GDP 4.6%	· S550 시나리오		
Agrawala et al.(2011)	· 2100년: GDP 4%	· 보정된 시나리오 (SRES B1근접)	전 세계	AD-WITCH
	· 2100년: GDP 5%			AD-DICE
Hope (2011)	· 2050년: 1조 달러 미만 · 2100년: 5조 달러 이상	· SRES A1B · 2016R 시나리오	전 세계	PAGE09
IWG(2010)	· 2050년: 44.9\$/CO <sub>2</sub> t (할인율 3% 적용)	· EMF-22(5개 시나리오)	미국	DICE PAGE09 FUND3.5
IWG(2016)	· 2050년: 69\$/CO <sub>2</sub> t (할인율 3% 적용)	· EMF-22(5개 시나리오)	미국	DICE PAGE09 FUND3.5
Burke et al. (2015)	· 2100년: 전 세계 경제적 산출물의 약 23%	· RCP 8.5-SSP 5 · RCP 8.5-SSP 3	전 세계	-
OECD (2015)	· 2060년: GDP 0.44% (범위값: -0.15~0.98%)	· No-damage · Full damage	한국	ENV-Linkage AD-DICE
	· 2060년: GDP 2~10% · 2100년: GDP 최대 12%		전 세계	
Hsiang et al.(2017)	· 21세기 후반: 1.0~3.0%	· RCP 8.5 · RCP 4.5 · RCP 2.6	미국 지역별	SEAGLAS

자료: 채여라 외(2017).



## III

PAGE09 모델을 이용한 기후변화  
피해비용 산정방법

PAGE09 모델은 완화 및 적응정책의 비용과 기후변화의 영향을 산정하는 통합평가모델(IAM)로서 정책결정자들이 기후변화 정책의 비용과 편익을 이해하는 데 도움을 주기 위해 고안되었다(Hope, 2011, p.1). IPCC 제3차 평가보고서의 과학적 지식에 근거해서 발전한 PAGE 모델은 IPCC 제4차 보고서에서 추가로 검토한 과학적 사실과 경제성에 관한 정보를 고려하여 PAGE09 모델로 업데이트하였다. 지금까지 PAGE 모델은 스턴보고서<sup>9)</sup>, 미국 정부 탄소의 사회적 비용<sup>10)</sup>, 아시아 지역의 기후변화 피해비용 연구<sup>11)</sup>, 우리나라 기후변화의 경제학적 분석<sup>12)</sup>, 말레이시아의 탄소세 연구<sup>13)</sup> 등 기후변화의 경제학적 분석과 탄소의 사회적 비용 산정에 통용되었다.

PAGE 모델은 복합적이고 전문적인 과학모델 및 경제모델의 결과값을 이용한 간단한 수식을 사용하여 기후변화의 영향과 피해비용을 모의(Simulate)하며, 그 과정에서 기후변화에 내재한 불확실성(Uncertainty)을 고려한다(Hope, 2011). 전 지구를 대상으로 하며, 세계를 8개의 지역으로 나누어 4가지 부문(해수면, 경제적, 비경제적, 대규모 재해(Discontinuities))에 대해 2200년까지의 피해를 모의한다(Hope, 2011).

9) Stern(2007).

10) IWG(2010, 2016); EPA(2017).

11) ADB(2009, 2013, 2014).

12) 채여라 외(2012).

13) Wong et al.(2016).



표 2. PAGE09 모델 지역 구분

PAGE 모델 지역		PAGE 모델 지역		본 연구 지역 조정	
EU	The European Union	CA	China and Northeast Asia	CA+IA	China, Northeast Asia, India, Southeast Asia
US	USA	IA	India and Southeast Asia		
OT	Other OECD Countries	AF	Africa and Middle East	KO	South Korea
EE	Former USSR and Eastern Europe	LA	Latin America		

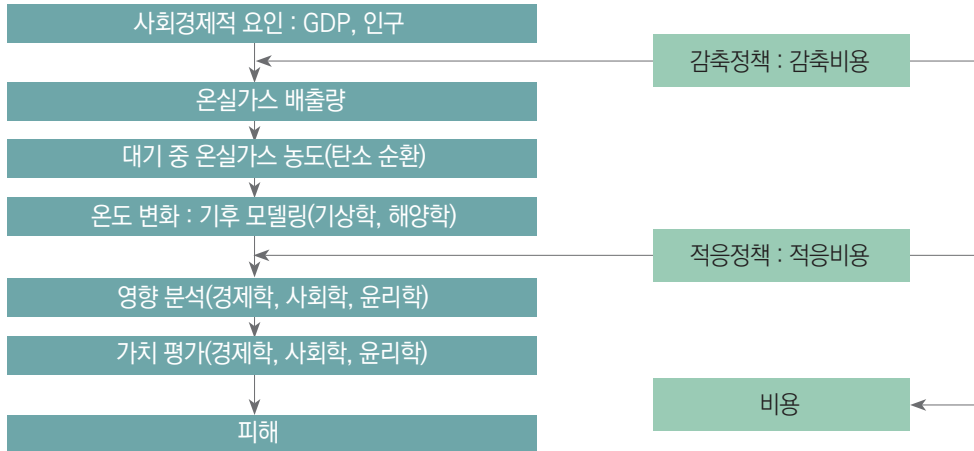
자료: Hope(2011)를 바탕으로 재구성.

PAGE 모델은 결괏값을 확률분포로 산출하기 위해 라틴 하이퍼큐브 샘플링(LHS: Latin Hypercube Sampling)을 이용하여 계산한다(Hope, 2011, p.1).<sup>14)</sup> 2개의 기후변화 시나리오 정책에 대해 완화 및 적응정책의 두 결괏값 차이를 시뮬레이션의 단일수행(Single Run)으로 계산하여, 서로 다른 완화 및 적응정책의 증가하는 비용과 편익을 산출한다(Hope, 2011, p.1). 모델의 결과는 8개로 분할된 전 세계의 복사강제력 변화, 지역별 온도변화, 기후변화로 인한 피해비용, 적응비용, 온실가스 감축비용 등이 있다. 분석 대상연도에 대한 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, Linear Gas(SF<sub>6</sub>, HFCs, PFCs)와 황산화물, 기타 에어로졸의 초과농도에서 발생하는 실제 지역의 온도변화를 산업화 이전의 온도와 비교하여 평가한다. PAGE 모델의 모든 결괏값은 확률분포와 효용의 변화로서 표현되기 때문에 기후변화에 내포된 리스크를 고려한다. 최종적으로 기후변화로 인한 피해비용의 순현재가치(NPV: Net Present Value)를 계산하며, 순현재가치를 통해 BAU 입력값에 대비해 설정한 두 가지 정책의 총 효과(Total Effects)와 정책적 대안을 선택함으로써 이루어지는 순편익(Net Benefit)이 산출된다(Hope, 2011).

PAGE 모델의 구조는 <그림 1>과 같다. 우선 입력값은 GDP와 인구의 연평균 성장률을 사용한다. 온실가스 배출량은 기준연도의 값 100을 기준으로 한 비율로 2200년까지의 배출 증감률을 사용한다. 입력값을 통해 계산하여 대기 중 온실가스농도와 온도변화, 영향분석, 가치분석을 수행하며, 최종적으로 기후변화로 인한 경제학적 피해를 산출한다. 정책 시나리오별 감축비용과 적응비용을 분석·비교하여 최종 정책적 비용을 산출하는 구조이다.

14) 라틴 하이퍼큐브 샘플링은 통제된 랜덤 샘플링을 생산하기 위해서 널리 통용되는 샘플링 방법으로서 기본 아이디어는 확률밀도함수(PDF: Probability Density Function)에 근접한 샘플링 포인트 분포를 생산하는 방식이다(Mackay et al., 1979).

그림 1. PAGE 모델의 구조



자료: 채여라 외(2017); Chae et al.(2007)에서 재인용.

표 3. PAGE09 모델의 주요 모델링 범위

주요 내용	모델링 범위
주요 온실가스	· CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, PFCs, HFCs, SF <sub>6</sub>
온실효과	· 온실가스 축적량에 따른 복사강제력
황산화물 냉각효과	· 직접효과(Direct Effect) · 간접효과(Indirect Effect)
분석지역 온도변화	· 8개 지역의 온실가스로 인한 효과 및 황산화물 냉각효과의 차이 · 에어로졸 및 오존 등 기타 가스에서 발생하는 복사강제력에 의한 변화 · 해양으로 전파되는 잔여열로 서서히 발생하는 변화
기후변화로 인한 비선형적 피해 추정	· 한계온도(Tolerable Temperature) 초과 시 온도변화에 대한 다항함수로 피해액 산정 · 피해비용은 시간에 따라 변하는 이자율(Time-Varying Discount Rate)을 사용하여 합산
지역 경제발전	· 각 지역의 피해액을 경제/비경제적(환경, 사회) 부분에 대해 연도별 GDP의 비율로 손실 표현 <sup>15)</sup>
적응효과	· 적응정책에 투자(예: 방파제 건설 등) · 한계온도를 높여 피해 강도를 감소
대규모 재해	· 온도가 임계점을 넘어가면 온도 상승과 비례해 빈도가 증가

자료: 채여라 외(2017); Hope(2011)에서 재인용.

15) 경제적 영향이란 온도상승으로 인해 직접적이고 정량화가 가능한 시장의 영향을 의미하며, 그 예로 해수면상승으로 인한 홍수피해와 토양유실의 자본비용이 있다. 비경제적 영향은 생물다양성 유실처럼 금액으로 환산하기 어렵고, 직접적인 시장 가치로 할당될 수 없는 부분의 피해를 일컫는다.

PAGE 모델의 입력 변수로 우리나라의 상황과 특성을 반영한 피해함수 및 감축비용 곡선을 입력함으로써 우리나라의 기후변화 정책에 대한 비용편익 분석이 가능하다(채여라 외, 2011, p.540). PAGE09 모델의 모델링 범위는 <표 3>과 같다.

PAGE 모델은 기후변화의 피해비용 산정 시 분석대상 지역의 해당연도 온도가 한계점 이상을 넘어감에 따라 적응 이전의 경제적, 비경제적 영향의 다항함수(Polynomial Function)로 계산한다(Hope, 2011). 이로 인해 해당 지역의 온도가 상승할수록 피해가 증가하는 것으로 계산되며, 피해비용은 GDP의 비율(%)로 표현한다. 취약성의 정도에 따른 지역적 가중(Equity Weight)을 포함하며, 이 값이 이익의 소비율로 할인되어 현재부터 2200년까지의 순현재비용(NPV)으로 표현된 누적피해금액이 산출된다(Hope, 2011).

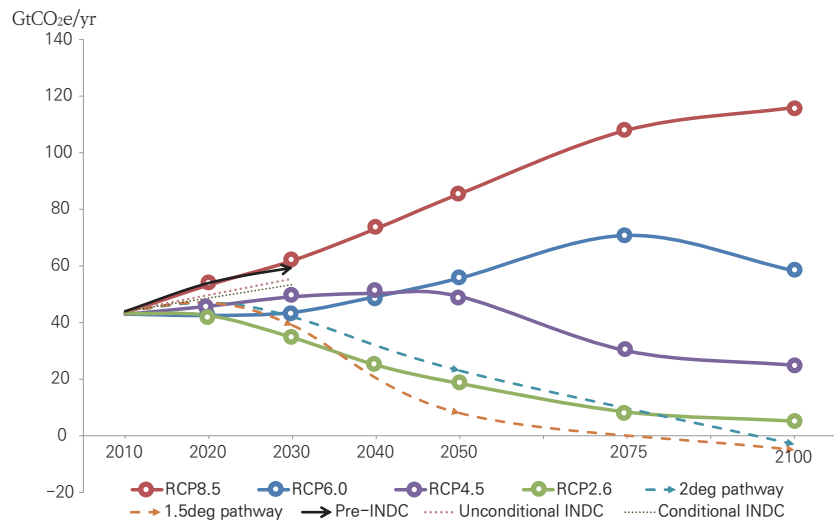


# IV 대표농도 경로(RCP) 및 공통사회경제 경로(SSP) 분석

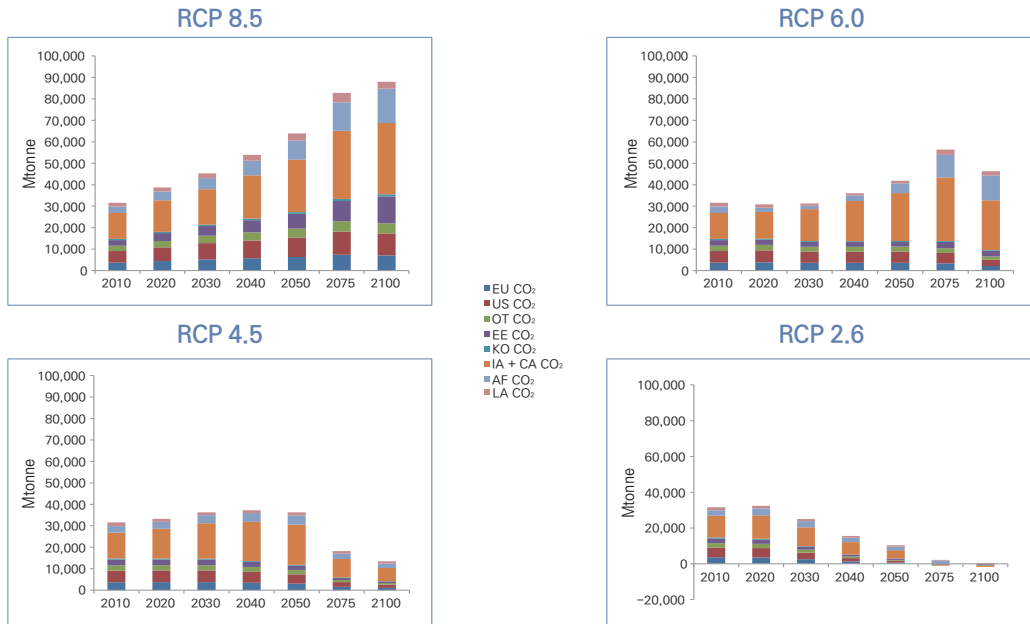
## 1. 대표농도 경로

본 연구는 다중의 RCP-SSP 시나리오 매트릭스의 사회에 대한 기후변화 피해비용을 분석하였다. <그림 2>는 각 RCP 시나리오별 전 세계의 온실가스 배출 추세와 현재 논의되고 있는 2°C, 1.5°C 온도 상승 제한을 위한 경로의 배출량 추세이다(UNEP, 2016). <그림 3>은 PAGE 모델을 통해 8개의 지역별 CO<sub>2</sub> 배출량 추세를 시나리오별로 나타내었다. 우리나라의 경우 OECD 배출량 추세를 반영하였다.

그림 2. 시나리오별 전 세계 온실가스 배출량 추세



자료: 채여라 외(2017).

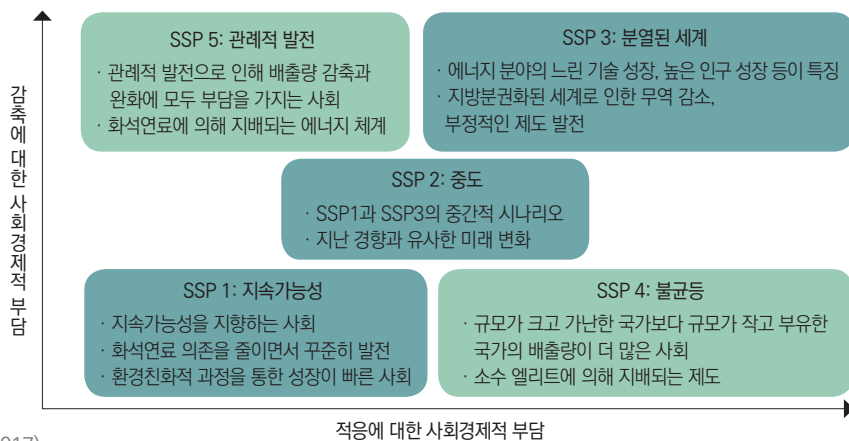
그림 3. RCP 시나리오별 전 세계 CO<sub>2</sub>배출량 추세

자료: 채여라 외(2017).

## 2. 공통사회경제 경로

우리나라 사회경제 시나리오별, 사회경제 요소별 스토리라인은 <그림 4>와 같다.

그림 4. 공통사회경제 경로별 스토리라인



자료: 채여라 외(2017).

위의 스토리라인을 바탕으로 정량화된 우리나라의 연평균 경제성장률(GDP)과 인구증가율을 사회경제 변수로 사용하였다(채여라 외, 2016). 사용한 입력값은 <표 4>와 같다. 2008년과 2009년의 인구와 GDP의 값은 통계청에서 제공하는 실제 통계를 사용하였다.

표 4. 우리나라의 공통사회경제 경로 변수

		2010	2020	2030	2040	2050	2075	2100
GDP (조 원)	SSP 1	1,153	1,808	2,629	3,504	4,354	5,410	6,005
	SSP 2	1,153	1,618	2,132	2,625	3,061	3,548	3,794
	SSP 3	1,153	1,386	1,572	1,698	1,774	1,823	1,835
인구 (백만 명)	SSP 1	50.516	51.830	52.656	52.791	51.822	44.552	39.927
	SSP 2	50.516	51.462	51.342	50.320	47.993	36.855	28.312
	SSP 3	50.516	51.627	50.660	48.628	45.089	31.042	20.527
CO <sub>2</sub> (Mt CO <sub>2</sub> -eq)	SSP 1	568.5	587.3	605.7	598.3	557.2	446.7	355.8
	SSP 2	568.5	640.4	667.3	667.3	632.6	510.7	398.0
	SSP 3	568.5	690.3	757.0	804.8	833.8	625.7	446.2

자료: 채여라 외(2016, 2017)에서 재구성.



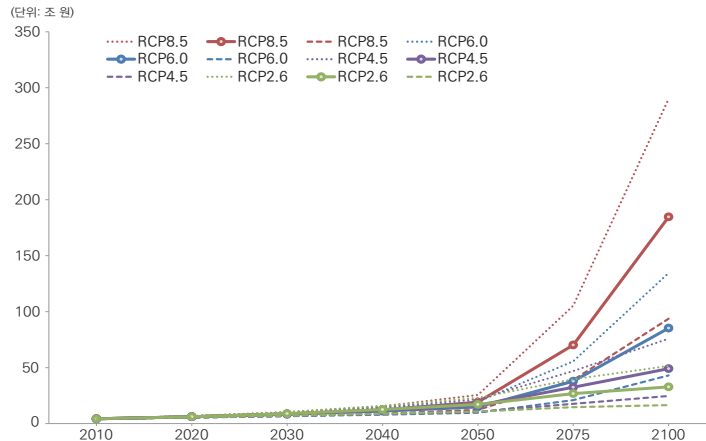
## RCP-SSP 매트릭스를 적용한 기후변화 피해비용 산정

PAGE 모델을 이용해 RCP-SSP 시나리오 매트릭스별 기후변화 피해비용을 산정하였다. PAGE 모델은 임계온도 이상의 온도변화에 대한 다항식으로 기후변화 피해를 계산한다. 기후변화로 인한 피해비용은 <그림 5>에 나타난 바와 같이 미래에 더 집중되어 발생하는 것으로 나타난다. 온도 상승이 2℃ 이하에 머무르는 2050년까지의 피해규모는 시나리오별로 크게 나타나지 않는다. 온도 상승이 가속화되는 2050년 이후 피해비용의 차이가 컸다.

RCP 8.5의 경우 2050년 이후 온도가 2℃ 이상 상승하며 피해비용이 급격히 증가한다. 이에 따라 경제적 피해는 2100년 SSP 1에서 연간 피해비용이 290조 원(GDP의 약 4.94%) 정도에 이를 것으로 산정되었다. SSP 2의 경우는 약 185조 원(GDP의 약 4.98%), SSP 3의 경우 약 94조 원(GDP의 약 5.22%) 정도의 연간 피해비용이 발생하는 것으로 산정되었다. RCP 6.0의 SSP 1의 매트릭스에서는 134조 원의 피해가 발생해 GDP 대비 약 2.29%의 피해가 발생할 것으로 추정되며, SSP 2는 약 85조 원(GDP의 약 2.30%), SSP 3은 약 43조 원(GDP의 약 2.40%)의 연간 피해비용이 발생할 것으로 분석되었다. RCP 4.5의 경우 2100년 연간 피해비용이 SSP 1, 2, 3별로 각 76조, 49조, 25조 정도(각 GDP의 1.29%, 1.32%, 1.37%)가 발생할 수 있는 것으로 산정되었다. 현재 전 세계의 목표인 2℃ 이하 온도 상승 제한의 시나리오인 RCP 2.6의 경우 2100년 SSP 1에서 52조 원(GDP의 0.88%), SSP 2에서 33조 원(GDP의 0.88%), SSP 3에서 17조 원(GDP의 0.92%)의 손실이 발생하는 것으로 분석되었다.

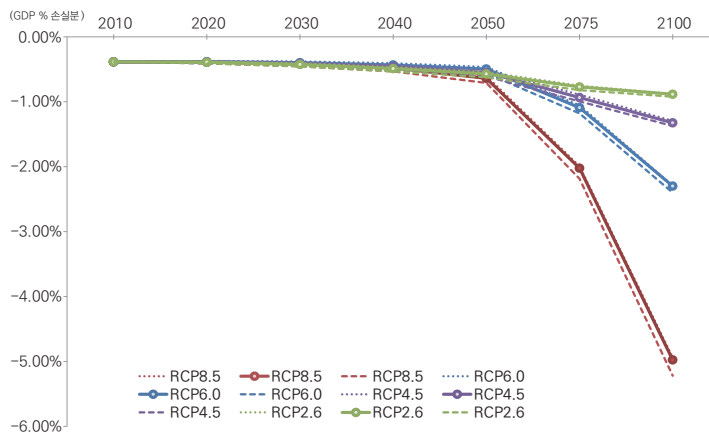


그림 5. 시나리오 매트릭스별 우리나라 기후변화 분석연도별 피해비용(조 원)



자료: 채여라 외(2017).

그림 6. 시나리오 매트릭스별 우리나라 기후변화 분석연도별 피해비용(GDP % 손실분)



자료: 채여라 외(2017).

2100년 우리나라의 기후변화 피해비용의 차이가 RCP와 SSP 조합에 따라 어떻게 발생하는지 분석하고자 RCP하의 SSP 간 피해비용 분포 분석과 동일 SSP하의 RCP 간 피해비용 분포 분석을 수행하였다.

시나리오별 우리나라의 2100년 피해비용의 변화를 분석하였으며, 우리나라 외 다른 지역은 전 지구적 시나리오별 가정을 적용하였다(IIASA SSP DB). 동일한 SSP 1 가정 시 RCP 8.5와 RCP 2.6의 2100년 피해비용 평균값은 약 5.6배의 차이를 보였으며, 이는 금액으로 약 238조

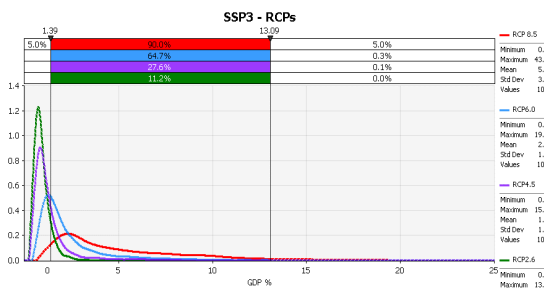
원의 차이다. RCP 8.5의 경우 RCP 6.0, 4.5, 2.6에 비해 피해비용도 많지만 불확실성의 범위가 크게 나타났다. 특히 피해비용이 많이 발생할 확률이 상대적으로 높다. RCP 8.5에서는 약 5%의 확률로 GDP 대비 약 12.49% 이상의 피해가 발생할 수 있지만 2.6에서는 발생 확률이 거의 없는 피해규모인 것으로 분석되었다. RCP 8.5에서 GDP 대비 1.31% 이상의 손실이 발생할 확률은 95%이지만, 6.0에서 64.8%, 4.5에서 27.6%, 2.6에서 12.0%의 확률인 것으로 나타났다.

SSP 2에서 RCP 8.5와 RCP 2.6의 피해비용 평균값은 약 5.6배의 차이를 보였으며, 이는 금액으로 약 151조 원의 차이(약 4.1%p GDP)로 분석되었다. RCP 8.5에서 49조 원 이상의 평균 피해비용이 발생할 확률은 95%인 반면, 2.6에서는 12% 정도의 확률로 분석되어 약 8배가량 높았다. SSP 3에서 RCP 8.5와 2.6의 피해비용 평균값은 약 5.7배의 차이를 보였으며, 금액으로는 약 77조 원의 차이(약 4.3%p GDP)가 있다. RCP 8.5에서 25조 원 이상의 연간 피해비용이 발생할 확률은 95%로서 2.6의 11.2%보다 약 8.5배가량 높은 것으로 나타났다.

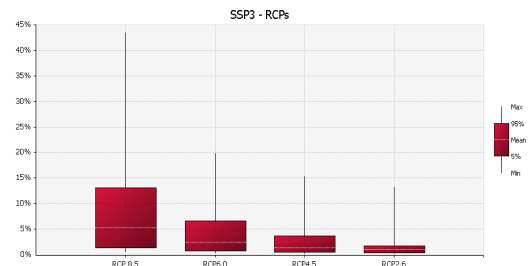
동일한 SSP 시나리오 가정 시 RCP 시나리오의 전환에 따라 그 효과로서 RCP 8.5, 2.6 간에 약 82%, RCP 6.0, 2.6 간에 약 61%, RCP 4.5, 2.6 간에 약 0.33%의 피해비용 저감효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

그림 7. SSP 3-RCP 시나리오별 2100년 피해비용 비교

SSP 3의 RCP 시나리오별 기후변화 피해비용의 확률밀도함수



SSP 3의 RCP 시나리오별 기후변화 피해비용 분포



(단위: GDP % 손실분)

SSP 3	Min	Mean	Max	Std Dev	5%	95%
RCP 8.5	0.61%	5.22%	43.47%	3.95%	1.39%	13.09%
RCP 6.0	0.39%	2.39%	19.84%	1.99%	0.77%	6.60%
RCP 4.5	0.22%	1.37%	15.23%	1.31%	0.48%	3.64%
RCP 2.6	0.21%	0.92%	13.22%	0.58%	0.40%	1.73%

자료: 채여라 외(2017).

RCP 8.5 시나리오에서 적응하지 않은 경우와 2010년 당장 적응을 시작했을 경우의 피해비용 차이를 분석하였다. 적응정책 때문에 2050년의 피해비용은 약 58%(약 11조 원), 2100년에는 약 17%(약 32조 원)의 감소효과가 발생하는 것으로 분석되었다. RCP 6.0 시나리오에서 적응을 시행할 경우 2050년에 약 64%가량(약 10조 원), 2100년에 약 26.11% 가량(약 22조 원)의 피해비용을 저감할 수 있는 것으로 분석되었다. RCP 4.5 시나리오에서는 2050년 약 62%(약 10조 원), 2100년 약 33%(약 16조 원)가량 피해비용 저감효과가 발생하는 것으로 나타났다. RCP-SSP 매트릭스별 기후변화 피해비용은 <표 5>와 같다.

표 5. RCP-SSP 매트릭스별 기후변화 피해비용

(단위: 조 원(GDP % 손실분))

2010	SSP 1				SSP 2				SSP 3			
	무적응		적응		무적응		적응		무적응		적응	
	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
RCP 8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	12 (-0.71)	94 (-5.22)	5 (-0.29)	77 (-4.31)
RCP 6.0	-	-	-	-	15 (-0.49)	85 (-2.30)	5 (-0.18)	63 (-1.70)	10 (-0.56)	43 (-2.40)	3 (-0.20)	32 (-1.76)
RCP 4.5	22 (-0.51)	76 (-1.29)	8 (-0.20)	50 (-0.86)	16 (-0.55)	49 (-1.32)	6 (-0.21)	33 (-0.88)	-	-	-	-
RCP 2.6	23 (-0.54)	52 (-0.88)	9 (-0.21)	29 (-0.50)	-	-	-	-	-	-	-	-

주: 1) 피해비용(조 원)은 소수점 자리에서 반올림하여 나타냄.

2) PAGE09 모델링 결과(10,000번 시뮬레이션).

자료: 채여라 외(2017).

# V

## 결론 및 정책적 시사점

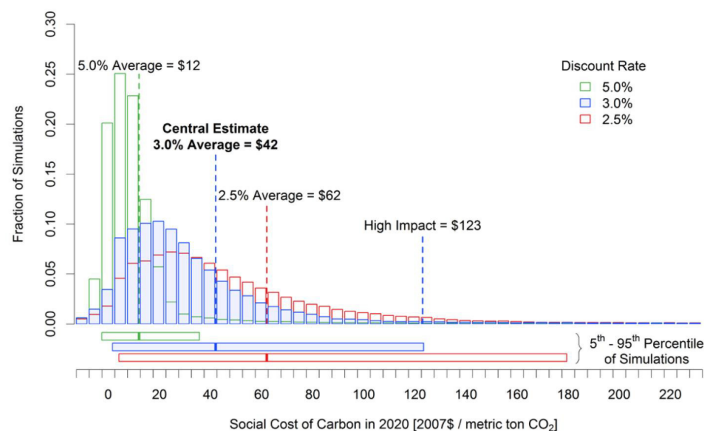
본고는 다양한 미래상에 대한 우리나라의 기후변화로 인한 피해규모를 파악하기 위해 RCP-SSP 시나리오 매트릭스를 적용해 기후변화 피해를 경제적으로 산정하였다. 화석연료 위주의 경제 구조를 지속하며 기술 이전 등이 이루어지지 않고 자국의 경제발전이 우선시되는 SSP 3 시나리오와 가장 높은 배출량을 가정하는 RCP 8.5 시나리오 조합의 경우 2100년 기후변화로 인한 피해비용은 GDP의 약 5.22%를 차지할 것으로 나타났고, 연간 피해비용은 94조 원으로 분석되었다. 저탄소기술 개발이 이루어지고 친환경적인 생활양식이 확대되며 선진국-개도국 간의 기술이전도 활발히 일어나는 사회경제 경로인 SSP 1 시나리오와 RCP 2.6 시나리오의 경우 2100년 피해비용은 GDP 0.9%이며, 피해비용은 약 52조 원으로 나타났다.

기후변화로 인한 피해비용의 차이는 기후 시나리오뿐 아니라 사회경제 경로의 영향을 받는 것으로 나타났다. 2100년 RCP 6.0 시나리오와 RCP 4.5 시나리오의 피해비용 차이는 약 26%이다. 동일한 SSP 2 시나리오하의 RCP 6.0과 RCP 4.5의 피해비용 차이는 36조 원이며, 같은 RCP 6.0에서 SSP 2와 SSP 3 간 피해금액 차이는 42조 원으로 분석되었다. 사회경제 경로는 온실가스의 배출량 및 저감량을 결정할 뿐 아니라 생활양식, 사회 구조, 거버넌스 등 다방면에 걸쳐 적응 역량에 영향을 미친다. 친환경적 토지 이용, 저탄소기술의 개발 및 확산, 산업구조 개편 등은 추가 온실가스 감축 노력 없이 사회경제 경로의 전환만으로도 상당량의 온실가스 배출 저감이 가능하다. 사회경제 경로는 기후변화 적응을 위해서도 매우 중요하다. 지속 가능한 토지이용, 도시계획, 경제개발 및 구조 등은 기후변화로 인한 영향 규모를 결정하는 중요한 인자이다.

기후변화로 인한 피해를 저감하기 위해서는 적응이 필수적이다. RCP 6.0-SSP 2 시나리오의 경우 적응정책 이행 시 피해비용의 약 26.1%, RCP 4.5-SSP 2의 경우 약 33.8%의 피해비용을 저감할 수 있는 것으로 분석하였다. 적응을 시작하는 시기가 빠를수록 피해비용 저감 효과가 큰 것으로 나타났다. RCP 6.0-SSP 2 시나리오의 경우 적응을 당장 시작할 경우 26.1%, 2030년 시작할 경우 25.8%, 2050년 시작할 경우 24.8%의 피해비용이 감소할 것으로 분석하였다. 현재 국가 및 지자체 차원의 적응정책이 수립 및 시행 중이다. 향후 기후변화로 인한 영향이 심화하기 전 부문별, 지역별 우선순위에 의한 적응정책의 신속한 이행이 중요하다.

이처럼 통합평가 모형을 이용한 하향식 기후변화의 경제적 피해 분석 연구는 기후변화 정책 분석을 위해 다각적으로 활용할 수 있다. <그림 8>과 같이 현재는 탄소의 사회적 비용 산정과 관련하여 많은 불확실성이 존재한다. 우리나라는 현재 국가 차원에서 통용되는 기후변화의 피해비용에 근거한 사회적 비용을 산정하지 않고 있다. 국가 에너지 기본계획, 최근 논란이 되는 에너지 전환계획, 노후 석탄발전소 폐지 등 국가계획 수립 시 비용편익 분석에 일괄적으로 적용할 수 있는 이산화탄소의 사회적 비용 분석이 필요하다. 최근 미국 사례에서 볼 수 있듯이 기후변화 피해비용 및 이에 근거한 사회적 비용은 할인율, 시나리오 가정, 피해 함수 등에 매우 민감하나 정부의 정책기조를 반영한 피해비용을 산정해 일관성 있는 기후변화 관련 의사 결정을 하는 것은 매우 중요하다. 현재 우리나라는 온실가스 저감 및 기후변화 피해 저감 관련 사업의 경우 탄소의 거래비용을 적용하는 등 개별적인 비용편익 분석이 이루어지고 있다.

그림 8. 이산화탄소의 사회적 비용 분포



자료: IWG(2016), p.5.

표 6. 통합모형별 이산화탄소의 사회적 비용(2020년)

(단위: 2011 US달러)

할인율					5.0%				3.0%				2.5%			
통계	평균	분산	왜도	첨도	평균	분산	왜도	첨도	평균	분산	왜도	첨도				
DICE	12	26	2	15	38	409	3	24	57	1,097	3	30				
PAGE	21	1,481	5	32	68	13,712	4	22	97	26,878	4	23				
FUND	3	41	5	179	19	1,452	-42	8,727	33	6,154	-73	14,931				

자료: 채여라 외(2017); IWG(2016), p.28에서 재인용.

국제사회는 기후변화로 인한 부정적 영향을 줄이기 위해서는 기존에 논의되던 2℃ 안정화로는 충분하지 않다는 과학적 연구결과에 근거해 온도상승을 2℃ 이하로 안정화하기로 파리협정에서 합의하였다(UN, 2015, p.3). 파리협정 이행을 위해서는 기존의 최소 배출 시나리오인 RCP 2.6-SSP 1 조합도 충분하지 않은 것으로 나타났으며, 파리협정 이행을 위해서는 2100년까지 2000년 배출량(40GtCO<sub>2</sub>) 대비 약 110%의 감축(-3~-5GtCO<sub>2</sub>)이 필요하다. 그러나 현재 각 국가가 제출한 자발적 국가감축목표(INDC: Intended Nationally Determined Contribution)를 종합하면 2℃ 안정화 달성도 어려운 상황이다. 기후변화로 인한 피해비용 저감을 위해서는 각국의 더욱 적극적인 추가 감축노력이 요구된다. 우리나라는 현재 2030년 37% 감축을 목표로 하고 있고 2050년까지의 저탄소 전략을 구상 중이다(환경부 보도자료, 2015.6.3). 궁극적으로 기후변화에 안전한 기후 안전사회로 전환하기 위해서는 단기적으로 온실가스 감축 잠재량을 산정하고 저감계획을 마련하는 것도 중요하지만, 장기적으로 지속 가능한 사회경제발전 경로로의 전환이 중요하다. 체계적인 구조개편 없이 기술적 옵션만으로 파리협정을 이행할 경우 막대한 경제적 부담을 초래할 것으로 예상된다.

## 참고문헌

### 국내문헌

- 채여라 외(2011), 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II)」, 국립환경과학원.
- 채여라 외(2012), 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석(III) - 정책결정자를 위한 요약보고서 (국·영문) 발간」, 국립환경과학원.
- 채여라 외(2016), 「저탄소 기후변화 적응 사회를 위한 사회·경제 변화 시나리오 개발」, 국립환경과학원.
- 채여라, 이주형, C. Hope(2017), 「IPCC 신시나리오 체계를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용 분석」, 한국환경정책·평가연구원

### 국외문헌

- Asian Development Bank: ADB(2009), *The Economics of Climate Change in Southeast Asia: A Regional Review*.
- ADB(2013), *The Economics of Climate Change in the Pacific*.
- ADB(2014), *Assessing the Cost of Climate Change and Adaptation in South Asia*.
- Agrawala, S. et al.(2011), "Plan or React? Analysis of Adaptation Costs and Benefits Using Integrated Assessment Models", *Climate Change Economics*, 2(3), pp.175-208.
- Burke, M., M. S. Hsiang, and E. Miguel(2015), "Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production", *Nature*, 527, pp.235-239.
- Helm, D.(2005), *Climate-Change Policy*, Oxford University Press.
- Hsiang, M. S. et al.(2017), "Estimating Economic Damage from Climate Change in the United States", *Science*, 356, pp.1362-1369.
- Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC(2014), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change - Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Mackay M., R. Beckman, and W. Conover(1979), "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code", *Technometrics*, 21(2), pp.239-245.
- OECD(2015), *The Economic Consequences of Climate Change*.
- Stern, N.(2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press.



- United Nations Environment Programme: UNEP(2016), *The Emissions Gap Report 2016*.
- Vuuren, D. P. et al.(2011), "The Use of Scenarios as the Basis for Combined Assessment of Climate Change Mitigation and Adaptation", *Global Environmental Change*, 21, pp.575-591.
- Wong, K. Y., J. H. Chuah, and C. Hope(2016), "Carbon Taxation in Malaysia: Insights from the Enhanced PAGE09 Integrated Assessment Model", *Carbon Management*, 7, pp.301-312.

## 온라인 자료

- Environmental Protection Agency: EPA(2017), "Regulatory Impact Analysis for the Review of the Clean Power Plan: Proposal", [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/ria\\_proposed-cpp-repeal\\_2017-10.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-10/documents/ria_proposed-cpp-repeal_2017-10.pdf), 검색일: 2017.10.12.
- Hope. C.(2011), "The PAGE09 Integrated Assessment Model: A Technical Description", [https://www.jbs.cam.ac.uk/fileadmin/user\\_upload/research/workingpapers/wp1104.pdf](https://www.jbs.cam.ac.uk/fileadmin/user_upload/research/workingpapers/wp1104.pdf), 검색일: 2017.3.10.
- IPCC, "Scenario Process for AR5", [http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5\\_scenario\\_process/index.html](http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/index.html), 검색일: 2017.9.4.
- Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government: IWG(2010), "Technical Support Document: - Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis - Under Executive Order 12866 -", [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/scc\\_tsd\\_2010.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/scc_tsd_2010.pdf), 검색일: 2017.9.1.
- IWG(2016), "Technical Support Document: - Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis - Under Executive Order 12866 -", [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc\\_co2\\_tsd\\_august\\_2016.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf), 검색일: 2017.7.14.
- IIASA, "RCPDatabase", <https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>, 검색일: 2017.4.10.
- IIASA, "SSP Database", <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>, 검색일: 2017.4.10.
- UN(2015), "PARISAgreement", <https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2016/CN.735.2016-Eng.pdf>, 검색일: 2017.7.12.

# 환경포럼



30147 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)  
TEL 044-415-7777 FAX 044-415-7799 [www.kei.re.kr](http://www.kei.re.kr)