

KEI 포커스

Korea Environment Institute Focus

제8권 제13호 통권 제67호

발행일 2020년 7월 31일

발행인 윤제웅

발행처 한국환경정책·평가연구원

주소 30147 세종특별자치시 시청대로370
세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)

Tel 044-415-7777

등록 제2015-000009호(1998년 1월 30일)

© 2020 한국환경정책·평가연구원

온실가스 배출경로에 따른 기후변화 피해비용 분석

채여라 | 기후대기안전연구본부장

김용지 | 기후대기안전연구본부 초빙연구원

김대수 | 기후에너지연구실 연구원

요 약

현 안 우리나라는 2050년까지의 장기 저탄소 발전전략(LEDs) 수립을 위한 5개 검토안을 마련함. 현재 정부는 5개 검토안과 탄소중립 경로를 추가적으로 검토 중이며, 전문가 의견수렴 등 사회적 공론화 과정을 거쳐 최종적으로 올 하반기 UN 제출 예정임.

주요 내용 기후변화 통합평가 모형인 PAGE를 이용해 No Action(RCP8.5), NDC, LEDS(2.0°C), 탄소중립 배출경로(1.5°C)에 따른 기후변화 피해비용을 분석함. 전 세계가 감축 노력을 하지 않는 No Action 시나리오의 경우 2100년 기후변화 피해비용은 GDP의 약 4.3%가 될 것으로 분석됨. 반면 2050년 순배출 0을 달성하는 탄소중립 시나리오의 경우 GDP 대비 1.3%가 될 것으로 분석됨. 또한 대규모 기후변화 피해 발생 확률이 감축 시나리오에서 큰 폭으로 감소하는 것으로 분석됨. No Action 시나리오의 경우 대규모 피해가 발생할 확률이 20%인 반면, 탄소중립 시나리오의 경우 0.0002%로 낮게 나타남.

정책 제언 탄소중립 배출경로의 경우 No Action 대비 피해비용뿐 아니라 대규모 피해확률이 현저히 낮은 것으로 나타남. 장기성을 띠는 온실가스의 특성상 기후변화로 인한 피해비용 최소화를 위해서는 선제적인 감축 노력 및 배출경로 설정이 요구됨.

※ 본 내용은 한국환경정책·평가연구원(KEI)이 수행하고 있는 「기후변화 적응정책과 온실가스 감축정책의 연계·평가 기술개발(환경부, 2020 예정)」에서 개발된 모형을 활용하여 분석된 결과를 담고 있습니다.

I 서론

1 국내외 기후변화 대응 현황

- ◆ 기후변화로 인해 지구 평균기온이 지속적으로 상승함에 따라 이상고온, 한파, 홍수 등 기상이변 발생 빈도가 증가하고 그 피해 규모도 커지고 있음
- ◆ 국제사회는 2015년 기후협약 내 파리협정 체결을 통해 기후위기 대응을 위한 신기후체제를 출범하였으며, 모든 당사국에서 2030년 단기 배출목표(NDC)를 제출하여 이행 중임
 - 파리협정은 지구 온도를 산업화 이전 대비 2°C 이하로 억제하기 위해 모든 당사국에게 2050년 까지의 중장기 배출목표인 '2050년 장기 저탄소 발전전략(LEDs)'을 올해 말까지 제출하도록 요청함
- ◆ IPCC(2018)는 '지구 온난화 1.5°C 특별보고서'를 통해 1.5°C 기온 안정화의 중요성과 이를 위한 전 세계 배출경로 제시
 - 전 세계 과학자들은 기후변화 영향 및 리스크 수준이 당초 목표로 제시한 2.0°C와 1.5°C 사이에 통계적으로 명백한 차이가 존재함을 확인함¹⁾
 - 2100년 1.5°C 기온 안정화는 2°C 대비 기후변화로 인한 리스크를 대폭 감소시킴²⁾
 - 또한, 2100년 1.5°C 이하 억제는 2050년 전 세계 순배출량이 0이 될 때 가능하다는 탄소 중립(Net Zero)³⁾ 배출경로 시나리오를 제시함
- ◆ 현재 미국, EU, 일본, 영국, 캐나다, 독일 등 17개 국가가 각국의 2050 LEDs를 UN에 제출 ('20.7.13 기준')
 - 이들 중 EU, 코스타리카, 포르투갈 등 6개 국가는 2050년 탄소중립 달성을 배출 목표로 제시⁴⁾
 - 전 세계 120개국이 국제동맹 '국가기후목표상향동맹(Climate Ambition Alliance)'에 참여하여 2050년까지 탄소중립 달성을 약속
- ◆ 우리나라는 2019년 각계 100명의 전문가로 구성된 '2050 저탄소 사회 비전 포럼'에서 2017년 배출실적 대비 2050년까지 최대 75%(제1안), 최저 40%(제5안)를 감축하는 5개 감축 시나리오와 함께 장기적 탄소중립 필요성을 제시
 - 정부는 현재 국민 설문조사 및 전문가 토론회 등을 통해 이해관계자 의견 수렴 중이며, 이를 종합하여 2020년 말까지 '2050년 장기 저탄소 발전전략' 최종안을 마련할 계획임

1) 최소 2/3 이상의 기후 모델이 격자점 규모에서 기온 변화에 대한 동일한 차이를 보여준다는 것을 의미함(IPCC, 2018).

2) 예를 들어, 1.5°C 기온 안정화 시 해수면 상승 관련 노출 인구는 최대 1천만 명 감소함(IPCC, 2018).

3) 탄소중립(Net Zero)은 총배출량에서 흡수량을 제외한 순배출이 0이 되는 상태를 의미함.

4) UNFCCC, "Communication of long-term strategies", 검색일: 2020.7.13.

2 기후변화 피해비용 분석 현황

- ◆ 해외의 경우 온실가스 배출경로에 따른 기후변화 피해비용이 정책 결정 시 주요 근거자료로 광범위하게 사용되는 반면, 국내의 경우 관련 연구가 제한적
 - 미국 정부는 정책 의사결정 과정에 탄소의 사회적 비용을 반영하기 위해 DICE, PAGE 등의 기후경제통합 모형을 활용하여 2050년 기준 기후변화 피해비용이 GDP의 약 0.75%~1%가 될 것으로 예측함(EPRI, 2014)
 - OECD(2015)는 AD-DICE 모형을 활용하여 기후변화로 인한 2060년 전 세계 GDP의 1%~2.4% 피해를 예측함

표 1. 기후변화 피해비용 주요 연구결과

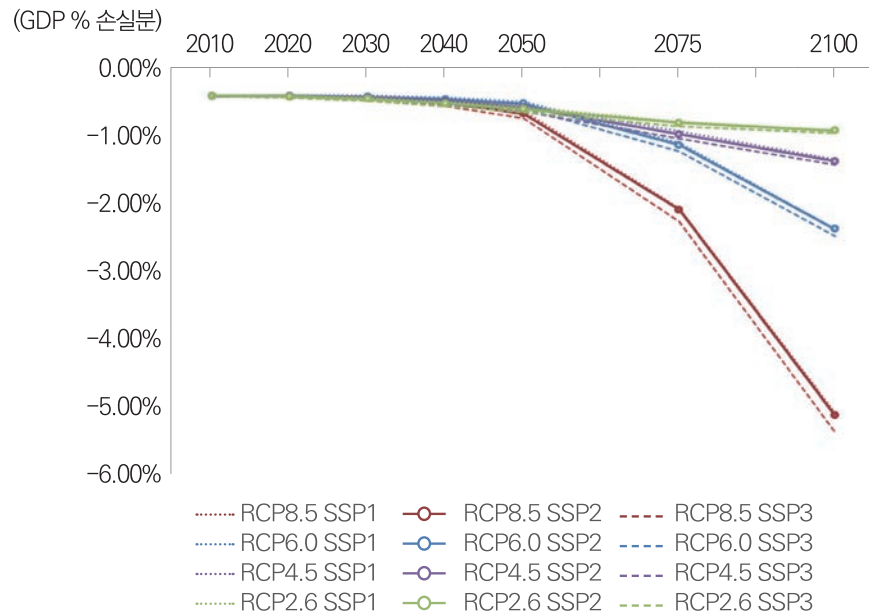
연구	모형	분류	시나리오	기후변화 피해비용
OECD(2015)	AD-DICE/ ENV-Linkage	상·하향식 모형	RCP8.5 수정된 SSP2	GDP 기준 (2060년) 1%~2.4%
EPRI(2014)	DICE	하향식 모형	USG2 ⁵⁾	GDP 기준 (2050년) 약 1%
			USG5 ⁵⁾	GDP 기준 (2050년) 약 0.75%
	PAGE09	하향식 모형	USG2	GDP 기준 (2050년) 약 1%
			USG5	GDP 기준 (2050년) 약 0.75%

자료: OECD(2015), EPRI(2014).

- ◆ 우리나라 기후변화 피해비용 연구로는 ADB(2013), OECD(2015), 채여라 외(2017) 등이 있음

5) 미 정부에서 사회적 탄소비용 계산을 위해 산정한 사회경제 및 배출 통합 시나리오로, USG2는 고탄소 저성장사회 시나리오이며 USG5는 저탄소사회 시나리오임.

그림 1. 우리나라 기후변화 피해비용 분석 사례



자료: 채여라 외(2017).

II 온실가스 배출경로

1 No Action 시나리오

- ◆ 현재의 에너지 소비 패턴 및 규제 수준이 추가적인 정책 도입 없이 미래에도 유지된다는 전제 하의 배출경로 시나리오
 - IPCC(2014)에서 제시한 RCP8.5 시나리오

2 NDC(Nationally Determined Contributions) 시나리오

- ◆ 파리협정에 따라 각국이 UN에 제출한 2030년 배출 목표를 기반으로 한 시나리오
- ◆ (전 세계) EC(2018)에서 2030년까지의 전 세계 배출목표 추세를 2100년까지 연장한 배출경로 시나리오 준용
- ◆ (우리나라) '2030 온실가스 감축 로드맵 수정안'(관계부처 합동, 2018)에서 제시한 2030년 국가 배출목표 달성 후 감축추세 연장

3 LEDS (Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategy) 시나리오

- ◆ LEDS의 목표인 산업화 이전 대비 2℃ 이하 억제를 기반으로 한 배출 시나리오
 - LEDS를 기 제출한 일부 국가(미국, EU, 일본 등)는 실제 배출목표 반영
- ◆ (전 세계) IPCC(2018) 1.5℃ 특별보고서의 2.0℃ 시나리오
- ◆ (우리나라) 2050 저탄소 사회 비전 포럼(2020)에서 제시한 2050 배출목표 검토안 중 제1안(2017년 대비 75% 감축)⁶⁾ 달성 후 감축추세 연장

6) 최대감축 1안은 2060년, 제4안 2090년 탄소중립. 제5안의 경우 2℃ 시나리오가 충족되지 않음.

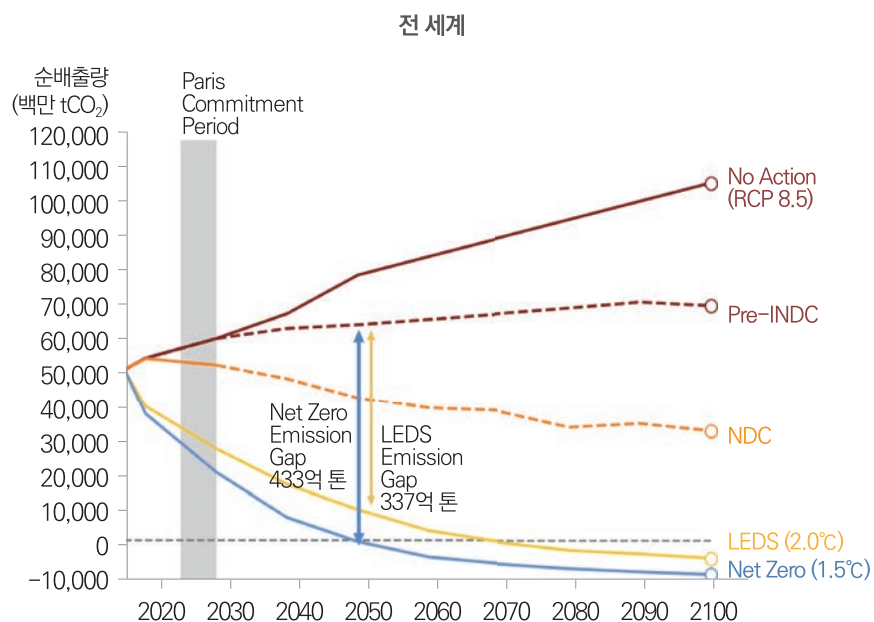
4 탄소중립 (Net Zero) 시나리오

- ◆ 산업화 이전 대비 1.5°C 이하 억제를 기반으로 한 배출 시나리오
- ◆ (전 세계) IPCC(2018) 1.5°C 특별 보고서의 1.5°C 시나리오
- ◆ (우리나라) 2030년 NDC에서 2050년 순배출 0을 달성하는 시나리오

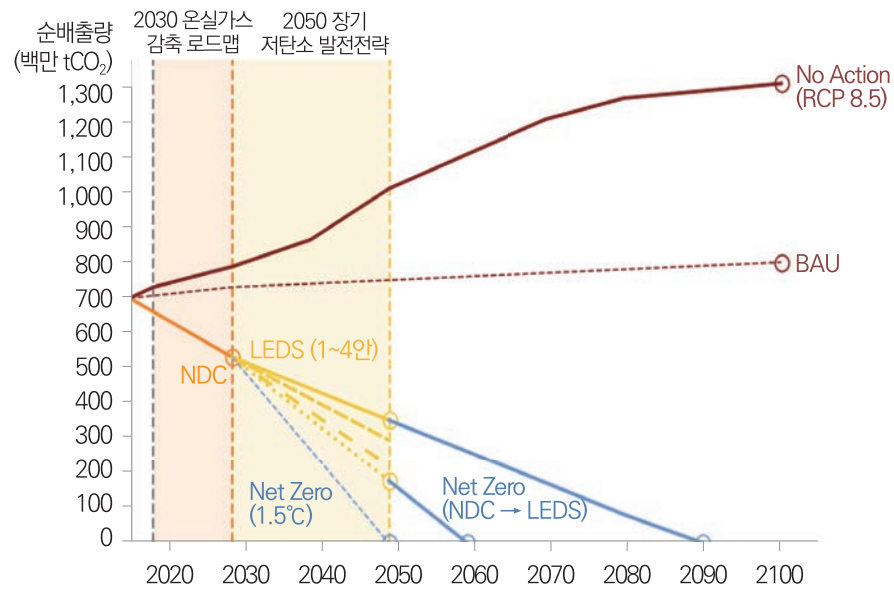
표 2. 전 세계와 우리나라 온실가스 배출 시나리오

구분	전 세계	우리나라
No Action	RCP8.5	
감축 시나리오		
NDC	각국의 2030년 배출목표 추세 연장 (EC, 2018)	UN에 제출한 2030년 배출목표
LEDs	IPCC(2018) 2.0℃	2050 저탄소 사회 비전 포럼(2020)의 배출목표 검토안(제1안)
탄소중립(Net Zero)	IPCC(2018) 1.5℃	2030년 배출목표(NDC)에서 2050년 탄소중립 달성 경로

그림 2. 전 세계와 우리나라 온실가스 배출경로 시나리오



우리나라



자료: EC(2018), IPCC(2018), 2050 저탄소 사회 비전 포럼(2020)을 바탕으로 저자 작성.

III 우리나라 기후변화 피해비용: 무대응과 대응

1 분석 개요

- ◆ 전 세계 온실가스 배출경로에 따른 우리나라 기후변화 피해비용을 분석
 - 분석 도구로는 PAGE(Policy Analysis for the Greenhouse Effect) 모형을 사용
 - 총 4개의 배출경로 시나리오에 대한 피해비용 분석
 - No Action 시나리오
 - NDC 시나리오
 - LEDS 시나리오
 - 탄소중립 시나리오
- * 배출경로에 의한 차이를 비교하기 위해 사회경제 시나리오는 SSP2를 동일하게 적용(채여라 외, 2016)⁷⁾

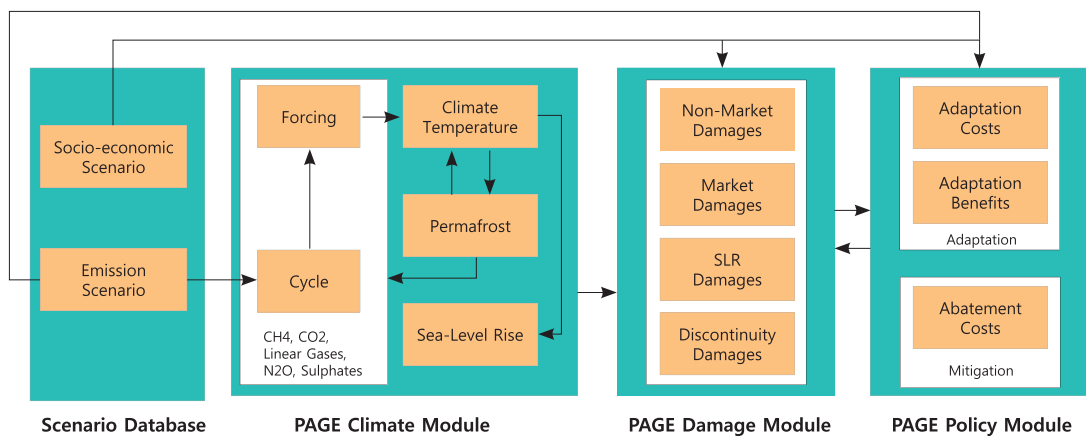
2 PAGE 기후변화 통합평가 모형

- ◆ 개요
 - 영국 케임브리지 대학교에서 개발된 모형으로 지구 온난화 문제를 다루기 위한 의사결정용 컴퓨터 시뮬레이션 모델
 - Stern(2006), ADB(2013), EPA(2017) 등에서 기후변화의 피해비용 및 이산화탄소의 사회적 비용 산정에 활용
 - 최근 빙하권 영향 등이 업데이트 됨(Yumashev et al., 2019)
- ◆ 모형 구조
 - 기후 모듈, 기후변화피해 모듈, 기후정책 모듈로 구분(그림 3 참조)
 - 기후 모듈은 CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFCs, PFCs와 SO_x 등 온실가스로부터 비롯되는 기온 및 해수면 변화 산정

7) SSP2(The Shared Socio-economic Pathway 2)는 중도성장의 사회경제 시나리오로 현재의 추세들을 유지하는 미래상을 전제로 함.

- 기후변화피해 모듈은 기온 상승에 의한 비경제적 피해, 경제적 피해, 해수면 상승 피해, 대규모 재해로 인한 피해비용 산정
- 기후정책 모듈은 감축 및 적응 비용 산정

그림 3. PAGE 모형 구조



자료: Moore et al.(2018) 자료를 바탕으로 저자 재구성.

◆ 피해비용 산정 방식

- 경제적 피해는 Burke et al.(2015)을 기반으로 한 피해 함수를 통하여 산정
- 경제적 피해 함수는 연평균 기온, 보정온도, Burke et al.(2015)의 회귀분석 계수를 바탕으로 산정

수식 1. 경제적 피해 함수

$$\text{기후변화 피해(GDP \%)} = \beta_1 (T_{t,r} - T_{0,r}) + \beta_2 ((T_{t,r} - T_{cal})^2 - (T_{0,r} - T_{cal})^2)$$

β_1, β_2 : Burke et al.(2015)의 회귀분석 계수

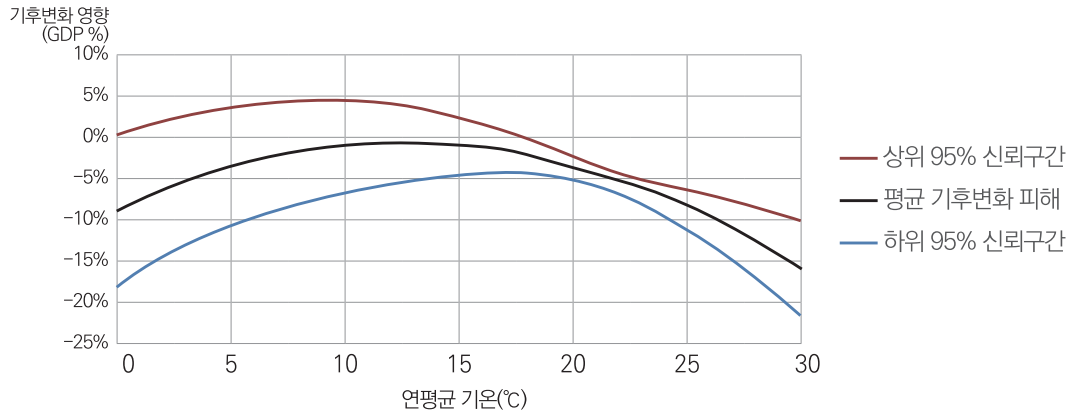
$T_{t,r}$: t년도 r지역의 연평균 기온

$T_{0,r}$: PAGE 기본년도 r지역의 연평균 기온

T_{cal} : 보정온도 (21℃)

자료: Yumashev(2019).

그림 4. PAGE 모형 경제적 피해 함수



자료: Yumashev(2019) 자료를 바탕으로 저자 재구성.

- 비경제적 피해, 해수면 상승 피해는 다항함수 형태의 영향 함수를 통하여 산정
- 영향함수는 온도당 초기편익, 보정온도, 다항지수, 소득지수 등을 고려하여 정의됨

수식 2. 비경제적 · 해수면 상승 피해 함수

비경제적 기후변화 피해(GDP %)

$$= [(Impact + InitBen \times T_{cal}) \times \left(\frac{T_{t,r}}{T_{cal}} \right)^2 - T_{t,r} \times InitBen] \times \left(\frac{GDP_{t,r}}{GDP_{0,EU}} \right)^{ipow}$$

Impact: 보정온도에서의 영향 (0.6%)

InitBen: 온도상승초기 편익 (0.08%/1°C)

$T_{t,r}$: r지역의 t년 산업화 이후 온도변화

T_{cal} : 보정온도 (3°C)

$GDP_{t,r}$: r지역의 t년도 감축/적응 비용과 저축량을 제외한 1인당 GDP

$GDP_{0,EU}$: EU의 기본년도 1인당 GDP

ipow: 소득지수 (0)

해수면 상승 기후변화 피해(GDP %)

$$= [(Impact + InitBen \times SLR_{cal}) \times \left(\frac{SLR_{t,r}}{SLR_{cal}} \right)^2 - SLR_{t,r} \times InitBen] \times \left(\frac{GDP_{t,r}}{GDP_{0,EU}} \right)^{ipow}$$

Impact: 보정 해수면 상승에서의 영향 (1%)

InitBen: 해수면상승초기 편익 (0%)

SLR_{t,r}: r지역의 t년 해수면상승

SLR_{cal}: 보정해수면상승 (0.5m)

GDP_{t,r}: r지역의 t년도 감축/적응 비용과 저축량을 제외한 1인당 GDP

GDP_{0,EU}: EU의 기본년도 1인당 GDP

ipow: 소득지수 (-0.3)

자료: Hope(2011).

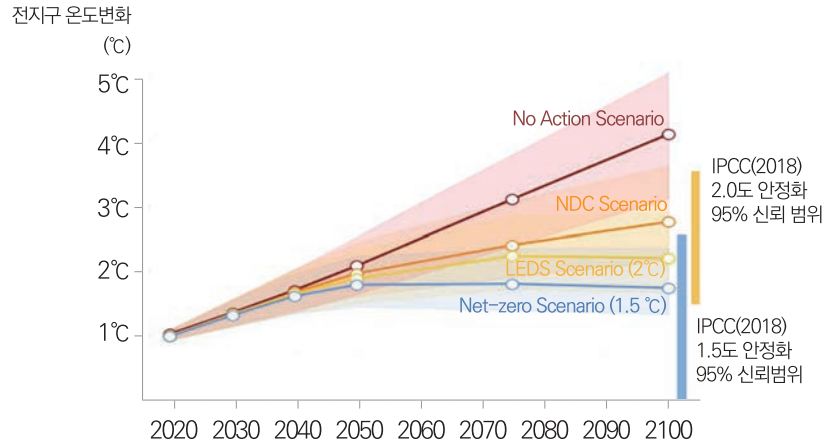
- ◆ 대규모 재해는 1°C 상승 시 발생 확률이 10%씩 증가하며 대규모 재해 발생 시 피해를 평균 GDP의 3%로 가정

3 PAGE 모형 기후변화 피해비용 분석 결과

◆ 기온변화

- PAGE 모델링 결과 No Action 시나리오에서는 기온이 2050년 2.1°C, 2100년 4.1°C 상승하지만, 탄소중립 시나리오에서는 2050년 1.8°C, 2100년 1.7°C로 억제됨(그림 5 참조)

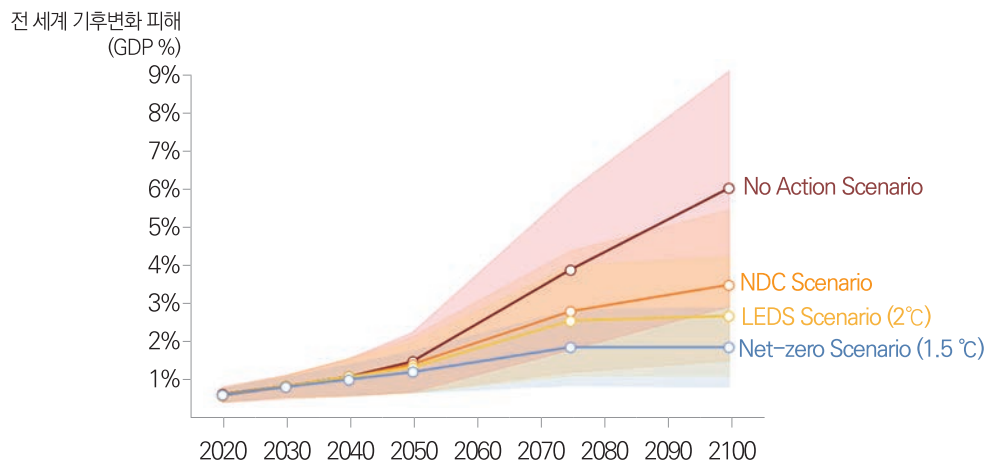
그림 5. 시나리오별 지구 온도 변화



자료: PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

- ◆ NDC 시나리오의 2100년 온도 상승은 약 2.7°C로 파리협정을 통해 합의된 제한 온도(2°C)를 충족하지 못할 확률이 높음
 - 파리협정 이행을 위해서 현재 제출된 NDC에 의거한 감축 외 추가적 감축 노력 필요
- ◆ 전 세계 기후변화 피해비용⁸⁾
 - No Action 시나리오의 경우 2100년 전 세계 기후변화 피해비용은 GDP의 6.0%로 분석되며, 탄소중립의 경우 1.9%로 나타남(그림 6, 표 3 참조)
 - 기후변화 피해비용은 2°C 이상의 온도 상승 이후 급격히 증가하며 전 세계적으로 추가적 감축 노력을 하지 않을 경우 2050년 이후 피해가 가속화됨

그림 6. 전 세계 기후변화 피해비용



자료: PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

8) 적응에 의한 기후변화 피해비용 감축은 포함하지 않음.

표 3. 시나리오별 전 세계 기후변화 피해비용

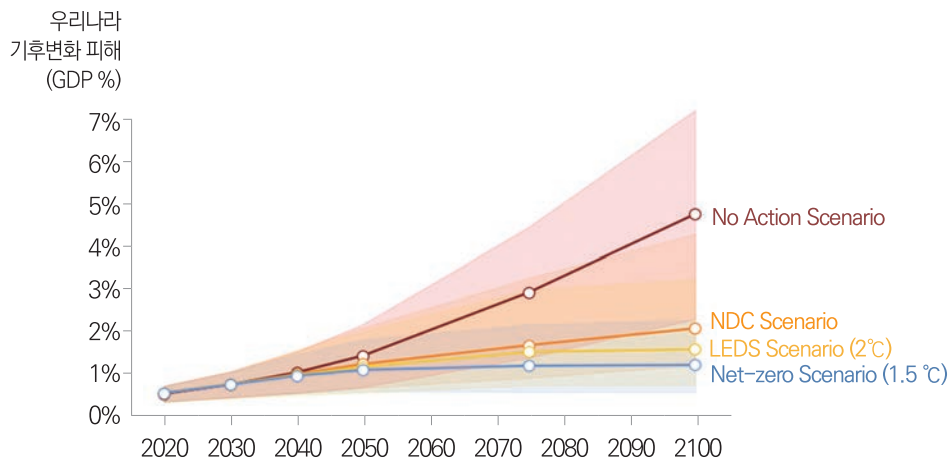
단위: GDP % 손실분(15%~85% 신뢰구간)

시나리오	2030	2050	2075	2100
No Action	0.87(0.58~1.15)	1.5(0.73~2.26)	3.86(1.81~5.91)	5.95(2.92~8.97)
NDC	0.85(0.54~1.15)	1.43(0.71~2.15)	2.79(1.23~4.35)	3.47(1.53~5.40)
LEDs (2°C 안정화)	0.87(0.59~1.15)	1.35(0.70~2.00)	2.55(1.14~3.97)	2.67(1.14~4.20)
탄소중립 (1.5°C)	0.87(0.6~1.1)	1.23(0.71~1.76)	1.87(0.90~2.83)	1.87(0.86~2.89)

자료: PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

◆ 우리나라 기후변화 피해비용⁹⁾

- No Action 시나리오에 의하면 2100년 우리나라 기후변화 피해비용은 GDP의 약 4.3%이며, 탄소중립 시나리오의 경우 1.3%로 나타남(그림 7, 표 4 참조)

그림 7. 우리나라 기후변화 피해비용

자료: PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

9) 적응에 의한 기후변화 피해비용 감소 효과는 포함하지 않음.

표 4. 시나리오별 우리나라 기후변화 피해비용

단위: GDP % 손실분(15%~85% 신뢰구간)

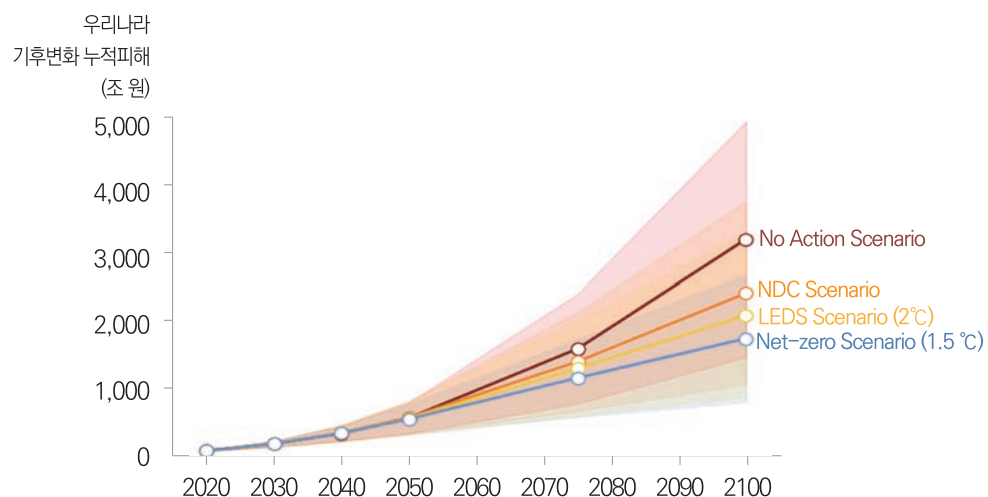
시나리오	2030	2050	2075	2100
No Action	0.60(0.36~0.84)	1.13(0.51~1.18)	2.46(1.82~3.88)	4.25(1.82~6.69)
NDC	0.61(0.35~0.87)	1.13(0.51~1.75)	1.79(0.7~2.88)	2.48(0.95~3.92)
LEDs (2℃ 안정화)	0.61(0.39~1.27)	1.05(0.44~1.67)	1.56(0.57~2.55)	1.73(0.63~2.85)
탄소중립 (1.5℃)	0.63(0.37~0.86)	0.99(0.46~1.51)	1.18(0.45~1.91)	1.26(0.45~2.06)

자료: PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

◆ 우리나라 기후변화 누적 피해비용

- 2020~2100년 기후변화 누적 피해비용은 No Action 시나리오의 경우 3,128조 원에 이를 것으로 나타남¹⁰⁾ (그림 8 참조)
- LEDS 시나리오의 경우 기후변화 피해비용은 2,008조 원으로 감소
- 탄소중립 이행 시 기후변화 피해비용은 1,667조 원으로 감소(No Action 기후변화 피해의 46% 감소)

그림 8. 우리나라 기후변화 누적 피해비용

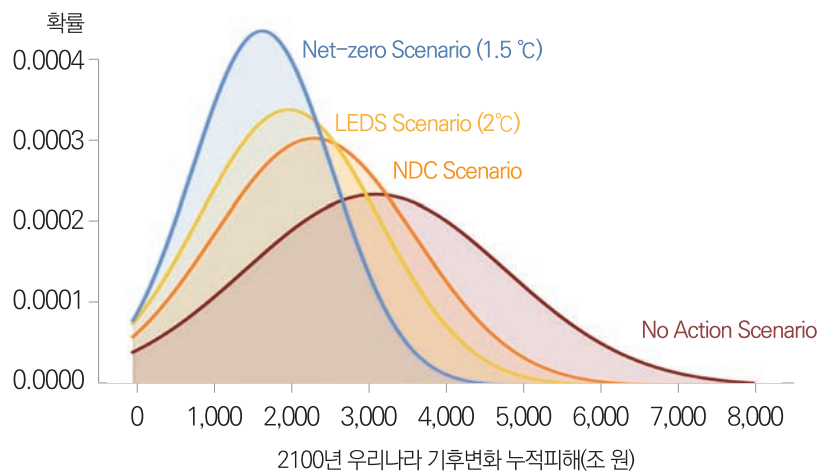


자료: PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

10) PAGE 기본 할인을 1% 적용.

- 온실가스 배출량 증가에 따라 대규모 피해비용 발생 확률 증가(그림 9 참조)
- No Action 시나리오의 경우 평균 피해비용 증가뿐 아니라, 대규모 피해 발생 확률 증가
- 4,000조 원 이상 대규모 기후변화 누적 피해 발생 확률은 무대응 시 20%, LEDS 시나리오의 경우 1.8%, 탄소중립 시 0.0002%
- 탄소중립 시나리오와 LEDS 시나리오는 평균 피해비용에서 큰 차이가 없지만 4,000조 원 이상 대규모 피해 발생 확률에서 큰 차이를 보임

그림 9. 우리나라 기후변화 누적 피해비용 확률 분포

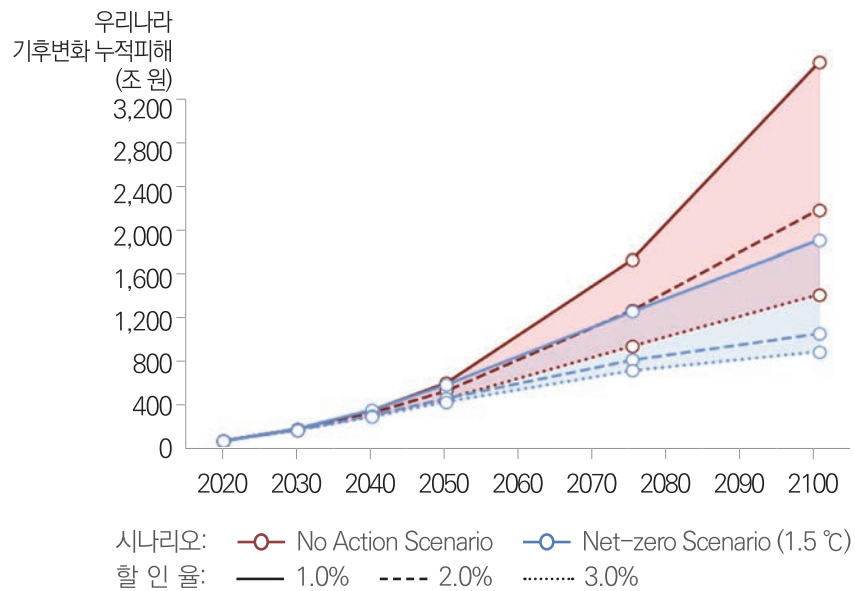


자료: PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

◆ 사회적 할인율에 대한 민감도 분석

- 사회적 할인율이란 미래 가치를 현재 가치로 환산하기 위해 사용되는 비율을 의미하며, 기후변화 피해비용 관련 연구들은 1%~7%의 사회적 할인율을 사용
- IWG(2016)는 사회적 탄소비용의 민감도 분석을 위해 2.5%~5%의 할인율 적용
- 기후변화의 심각성을 인정하지 않는 트럼프 정부는 3%~7%의 높은 할인율 적용(EPA, 2017)
- 낮은 할인율은 미래 세대의 편익 가치를 높게 평가함
- 미래 세대의 편익 가치를 높게 평가하여 1%의 할인율을 적용한다면 No Action 시나리오와 탄소중립 시나리오의 차이는 1,461조 원이 될 것으로 분석됨
- 현재 세대의 편익 가치를 높게 평가하여 3%의 할인율을 적용한다면 그 차이는 479조 원이 될 것으로 분석됨

그림 10. 할인율에 따른 우리나라 기후변화 누적 피해비용 민감도 분석 결과



자료 : PAGE 모델링 결과를 바탕으로 저자 작성.

IV 결론 및 시사점

- ◆ PAGE 모형을 활용하여 4가지 배출경로에 대해 우리나라 기후변화 피해비용을 분석
 - 4개 온실가스 배출경로 시나리오에 대한 피해비용 산정
 - No Action 시나리오
 - NDC 시나리오
 - LEDS 시나리오
 - 탄소중립 시나리오
- ◆ No Action 시나리오에 의하면 2100년 기후변화로 인한 피해가 GDP 대비 4.25%인 반면, 탄소중립 시나리오(1.5℃)의 경우 1.26%로 크게 감소하는 것으로 나타남¹¹⁾
 - NDC와 LEDS(2.0℃) 시나리오의 경우 2100년 기후변화 피해는 GDP 대비 각각 2.48%, 1.73%로 나타남
 - 탄소중립(1.5℃) 경로의 기후변화 누적 피해비용은 No Action 시나리오 대비 약 47% 이상 감소하며, 특히 4,000조 원 이상의 높은 피해가 발생할 확률은 20%에서 0.0002%로 대폭 감소
 - 2100년까지 기후변화 누적 피해비용은 No Action 시나리오 약 3,128조 원, 탄소중립 시나리오 약 1,667조 원으로 나타남
- ◆ 기후변화 피해비용과 대규모 피해 발생 확률을 고려할 때 보다 선제적인 온실가스 감축이 요구됨
 - 특히, 탄소중립(1.5℃) 시나리오에서 대규모 피해 발생 확률이 현저하게 감소하는 것으로 분석됨

11) 2020년 기준 우리나라 GDP 대비 국방비는 약 2.3%이며, 총액은 약 50조 수준임(e-나라지표, “국방예산 추이”, 검색일: 2020.7.10).





참고문헌

국내문헌

- 2050 저탄소 사회 비전 포럼(2020), 「2050 장기 저탄소 발전전략: 2050 저탄소 사회 비전 포럼 검토안」.
- 관계부처 합동(2018), 「2030 온실가스 감축 로드맵 수정안」.
- 채여라 외(2016), 「저탄소 기후변화 적응 사회를 위한 사회·경제 변화 시나리오 개발」, 한국환경산업기술원.
- 채여라 외(2017), 「IPCC 신시나리오 체계를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용 분석」, 한국환경정책·평가연구원.

국외문헌

- ADB(2013), *The Economics of Climate Change in East Asia*.
- Burke et al.(2015), "Global Non-linear Effect of Temperature on Economic Production", *Nature*, 527, pp.235-239.
- EC(2018), *Global Energy and Climate Outlook 2018: Sectoral mitigation options towards a low-emissions economy*.
- EPA(2017), *Regulatory Impact Analysis for the Review of the Clean Power Plan Proposal*.
- EPRI(2014), *Understanding the Social Cost of Carbon: A Technical Assessment*.
- Hope(2011), *The PAGE09 Integrated Assessment Model: A Technical Description*.
- IPCC(2018), *Global Warming of 1.5°C*.
- IWG(2016), *Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulation Impact Analysis - Under Executive Order 12866*.
- OECD(2015), *The Economic Consequences of Climate Change*.
- Stern(2006), *Stern Review: The Economics of Climate Change*.
- Yumashev(2019), *PAGE-ICE IAM*, v6.22.
- Yumashev et al.(2019), "Climate Policy Implications of Nonlinear Decline of Arctic Land Permafrost and Other Cryosphere Elements", *Nature Communications*, 10, 1900.

온라인 자료

- e-나라지표, "국방예산 추이", <http://www.index.go.kr>, 검색일: 2020.7.10.
- UNFCCC, "Communication of long-term strategies", <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>, 검색일: 2020.7.13.