



「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」 해설서



기상청

Korea Meteorological
Administration

「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」해설서 요약본

** 본 해설서는 『지구온난화 1.5℃ 특별보고서』 본 보고서와 요약보고서(SPM)에 기반하여 작성되었다. 1.5℃ 배출 경로, 미래 기후변화 전망과 영향, UN의 지속 가능한 발전 목표(Sustainable Development Goals, SDGs)와 저감대책 등 주요 연구결과를 제시하였고, 동아시아와 우리나라에 대해서는 국립기상과학원의 분석 결과(심성보 외, 2019)를 사용하였다.

■ 1.5℃와 2.0℃ 지구온난화의 차이

- 인간활동으로 인해 산업화 이전 대비 2017년 현재 약 1.0℃(0.8~1.2℃ 범위)의 기온이 상승한 것으로 추정된다. 산업화 이전 대비 1.5℃ 온난화일 때 자연계와 인간계에 대한 기후 관련 위험이 현재보다 높아지고, 2.0℃ 온난화일 때 더 높아질 것이다(높은 신뢰도).
- 대부분의 육지와 해양의 평균 온도가 상승하고(높은 신뢰도), 많은 지역에서 극한 고온 현상이 증가할 것이다(높은 신뢰도). 또한 일부 지역에서 호우가 증가하고(중간 신뢰도) 일부 지역에서는 가뭄과 강수 부족 가능성이 증가(중간 신뢰도) 할 것이다.
- 2100년까지 전지구 평균 해수면 상승 폭은 1.5℃보다 2.0℃ 온난화에서 약 0.1m 높을 것으로 전망된다(중간 신뢰도). 해수면은 2100년 이후에도 계속 상승할 것이며(높은 신뢰도), 상승 규모와 속도는 미래 배출 경로에 따라 달라진다.
- 동아시아와 한반도의 1.5℃와 2.0℃ 온난화에 따른 미래 전망 결과는 전지구 상승 수준과 유사한 것으로 나타났다. 1.5℃ 온난화 보다 2.0℃ 온난화에서 동아시아 지역 기온은 약 0.6℃ 상승했고 연강수량은 약 20mm 증가했다.
- 육지에서 생물종의 감소, 멸종과 같은 생물다양성과 생태계에 대한 영향은 2.0℃보다 1.5℃ 온난화에서 줄어들 것으로 전망된다. 2.0℃보다 1.5℃ 온난화에서 해양 산성화가 완화된다고, 북극해 해빙이 여름에 모두 녹아 없어질 가능성이 줄어들며 위험에 처하는 산호초의 비율 또한 줄어든다.
- 현재 대비 건강, 생계, 식량 안보와 물 공급, 인간 안보와 경제성장에 대한 기후 관련 위험은 1.5℃ 온난화에서 증가하며 2.0℃ 온난화에서는 더 증가할 것이다. 1.5℃ 온난화보다 2.0℃ 온난화에서 곡물 수확량은 더 감소할 것이고 물부족 위기에 처하는 인구는 많아지며 경제성장의 위험 또한 커질 것이다.
- 이러한 기후변화의 위험을 줄일 수 있는 다양한 적응 전략이 있는데 1.5℃ 온난화보다 2.0℃ 온난화에서 생태계, 식량, 보건 시스템에 대한 적응이 더 어려울 것으로 예상된다.



그림 1.5℃와 2.0℃ 온난화가 발생했을 때의 영향 비교

■ 1.5℃ 지구온난화 달성을 위한 배출경로

- 2100년에 지구 기온의 상승 폭을 1.5℃ 미만으로 제한하기 위해서는 인간활동에 기인한 전지구 CO₂ 순배출량을 2030년까지 2010년 대비 최소 45%까지 감소시키고 2050년에는 순제로(net zero)에 도달해야 한다. 즉, 이산화탄소의 추가 배출로 인한 이산화탄소 농도의 상승이 없어야 한다. 2.0℃ 미만으로 온난화 폭을 억제하는 대부분의 경로는 2030년까지 이산화탄소 배출량을 대략 25% 감소시키고, 2070년경에는 순제로에 도달해야 한다. 1.5℃와 2.0℃로 억제하는 경로 모두 비이산화탄소(non-CO₂) 물질 배출량은 상당히 감축될 것으로 보인다(높은 신뢰도).
- 온난화를 1.5℃로 억제하는 배출 경로에 도달하려면 에너지, 토지이용, 도시, 수송과 건물을 포함한 기반시설과 산업 체계의 빠르고 광범위한 시스템 전환이 필요하다(높은 신뢰도). 이러한 시스템의 전환은 전례가 없었던 수준으로 모든 부문의 온실가스 배출량을 대대적으로 감축해야 하고, 감축을 위한 광범위한 포트폴리오와 투자의 증대가 필요하다(중간 신뢰도). 온난화를 1.5℃로 억제하는 배출 경로에서는 2.0℃ 경로 대비 향후 20년 동안 더 빠르고, 대대적인 시스템의 변화가 필요하다(높은 신뢰도).
- 에너지 부문에서 온난화를 1.5℃로 억제하는 모델 경로는 일반적으로 2.0℃ 경로보다 에너지의 효율성을 더 개선해야 한다. 또한, 소비자가 사용하는 형태의 에너지를 전력으로 빠르게 바꾸어서, 서비스 수요를 충족시키는 동시에 소비를 절감할 수 있도록 한다(높은 신뢰도). 2.0℃ 경로와 대비하여 1.5℃ 경로에서는 2050년 이전에 저배출 에너지원의 비중이 더 높아질 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 또한, 2050년에 이르러 재생 에너지가 전력 생산의 70~85%(4분위수 범위)를 차지할 것으로 전망된다(높은 신뢰도).
- 온난화를 1.5℃로 억제하는 모델 경로에서 2050년에 산업부문의 CO₂ 배출량은 2010년 대비 대략 65~90%(4분위수 범위) 감소할 것으로 전망되며, 2.0℃ 경로에서는 50~80% 감소할 것으로 전망된다(중간 신뢰도). 1.5℃로 억제하는 모델 경로에서는 2010년 대비 2050년에는 초지가 50~1,100만 km² 감소한다. 식량과 사료작물 생산에 필요한 초지를 제외한 농경지는 -400~+250만 km² 범위에서 감소하거나 증가하며, 바이오에너지에 필요한 작물 경작지가 0~600만 km² 증가할 전망이다. 이로 인해서 산림 면적은 -200~+950만 km² 범위에서 감소하거나 증가할 것으로 전망된다(중간 신뢰도).
- 온난화를 1.5℃로 억제하는 경로에서, 2016~2050년에 에너지 관련 감축을 위한 연평균 추가 투자액은 약 8,300억 달러(2010년 US 달러 기준, 6개 모델에서 1,500억~1조 7,000억 달러 범위)에 이를 것으로 추정된다. 온난화를 1.5℃로 억제하는 모든 경로에서는 이산화탄소제거 기술을 사용하면 21세기에 대략 100~1,000 GtCO₂의 이산화탄소가 흡수될 것으로 전망된다.

■ 1.5℃ 지구온난화 달성을 위한 대응

- 2030년 전지구 온실가스 배출량은 52~58 GtCO₂-eq yr⁻¹에 달할 것이다. 2030년 이후에 배출량 감축에 대한 목표와 규모를 확대 하는 노력을 하더라도, 파리협정에 따른 국가별 감축 수준을 반영한 경로에서는 온난화를 1.5℃로 억제할 수 없을 확률이 높다(높은 신뢰도). 향후 오버슈트를 피하고 대규모 이산화탄소제거 기술에 의존하지 않으려면 2030년 훨씬 이전에 전지구적 CO₂ 배출량을 감소 시켜야 한다(높은 신뢰도). 2030년 배출량을 낮출수록, 2030년 이후 오버슈트 없이 또는 제한된 오버슈트 하에서 온난화를 1.5℃로 억제 하기 위한 어려움은 줄어든다(높은 신뢰도).
- 온난화를 1.5℃로 억제하는 데 필요한 완화와 적응은 이행 가능한 조건(enabling condition)에 따라 달라진다. 이 조건은 「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」에서 지구물리학적, 환경-생태적, 기술적, 경제적, 사회-문화적, 제도적 가능성을 총망라하여 평가되었다. 다층적 거버넌스, 제도적 역량, 정책 수단, 기술혁신과 이전, 재정 동원, 행동과 생활양식의 변화와 같은 이행 가능한 조건은 온난화를 1.5℃로 억제하기 위한 완화와 적응 전략의 실행 가능성을 높일 수 있다(높은 신뢰도).
- 이행 가능한 조건과 함께 국가별 상황에 맞는 적응 방안이 신중하게 선별된다면, 상충이 발생할 수는 있으나 1.5℃ 온난화 억제와 지속 가능한 발전, 빈곤 감소를 위한 편익이 발생할 것이다(높은 신뢰도). 선별된 적응 전략은 잘 관리된다면 식량과 물 안보 확보, 재난 위험 감소, 보건 환경 개선, 생태계 서비스 유지, 빈곤과 불평등 감소를 비롯해 지속 가능한 발전과 함께 많은 시너지를 발생시키고, 온난화를 1.5℃로 억제하는 것을 지원할 수 있다(높은 신뢰도). 지속 가능한 발전과 빈곤 퇴치의 차원에서 1.5℃ 온난화에 따른 위험을 억제 하려면, 적응과 완화에 대한 투자 증가, 정책 도구, 기술혁신과 행동 변화의 가속화를 통해 달성할 수 있는 시스템의 전환이 필요하다(높은 신뢰도). 지속 가능한 발전은 온난화를 1.5℃로 억제하는 데 도움이 되는 기본적인 사회와 시스템의 전환과 변화를 지원하고, 이를 이행 가능하게 한다.

- 국가와 지방정부, 시민사회, 민간부문, 토착민과 지역 공동체의 기후변화 대응 역량 강화는 온난화를 1.5℃로 억제하는 적극적인 행동을 지원할 수 있다(높은 신뢰도). 국제협력은 모든 국가와 사람들에게 적극적인 온난화 억제 행동이 가능한 환경을 제공할 수 있다. 국제협력은 개발도상국과 취약 지역에 매우 중요한 지원 수단이다(높은 신뢰도). 공공과 민간분야, 기관 투자자, 재정 시스템, 시민사회와 연구기관을 모두 포함하는 동반협력(Partnership)은 온난화를 1.5℃로 억제하기 위한 행동과 대응을 지원할 수 있다(매우 높은 신뢰도).

핵심 용어

• 전지구 평균 지표 온도(Global Mean Surface Temperature, GMST)

육지와 해빙 표면 부근의 기온과 해양의 해수면 온도를 고려한 전지구 평균 온도 추정치이다.

※ 해빙은 바닷물이 얼어서 생긴 얼음으로 물보다 밀도가 낮아 바다 위에 떠 있다.

• 복사강제력(radiative forcing, RF)

복사강제력은 기후변화를 일으키는 물질이 지구시스템에 미치는 에너지 변화를 정량화한 것으로 양의 복사강제력은 온난화를, 음의 복사강제력은 냉각화를 의미한다.

• 순제로(net zero) 이산화탄소 배출량

어느 특정 기간에 인간활동으로 인한 전지구적 이산화탄소 배출량과 흡수량이 동일할 때 이산화탄소 배출량이 순제로가 된다. 추가 배출량이 없어서 대기 중 이산화탄소 농도가 유지되는 것이다.

• 위험(Risk)

기후 관련 위해(hazard) 요소에 의해 생명, 건강, 생태계, 경제, 사회, 문화적 자산, 기반시설 등에 발생할 수 있는 잠재적인 부정적 영향을 말한다. 위험은 그 영향에 따라 발생할 확률 혹은 가능성으로 표현한다.

• 적응

해를 가하거나 위협하는 것을 조정하고 방지할 방법을 찾는 것으로, 새로운(변화한) 기후와 그 영향에 적응하여 살아가는 것이다. 예를 들어 해수면 상승에 적응하여 해안근처의 주거지역을 내륙으로 이동시키거나 방파제를 높이는 것이다.

• 완화

산림과 같은 온실가스 흡수원은 확대하고 온실가스 배출원은 줄이는 인간활동을 통해 대기 중의 온실가스 농도를 낮추는 것을 말한다.

• 비가역적

어떠한 시스템이 정상상태에서 불안정한 상태에 도달하는 데 걸린 시간보다 자연적 과정을 통해 정상상태로 회복하는데 걸리는 시간이 훨씬 긴 경우를 비가역적이라고 한다. 시스템이 한번 바뀐 다음에 본래 상태로 다시 돌아갈 수 없음을 의미한다.

• 가역적

비가역적과 반대 의미이며, 시스템이 불안정한 상태로 바뀌었지만 자연적 과정을 통해 다시 본래 상태로 돌아갈 수 있음을 의미한다.

• 극한 온난일(extreme hot day)

통계적으로 극단에 위치한 매우 높은 온도를 의미하며 다양한 기준으로 사용되는데, 여기에서는 연중 가장 높은 최고기온을 뜻한다.

예를 들어 홍천에서 2018년에 기록한 최고기온 중 가장 높은 값은 8월 1일에 발생한 41.0℃ 이었고, 이 값은 홍천의 2018년 극한 온난일 값이다.

• 극한 한랭야(extreme cold night)

통계적으로 극단에 위치한 매우 낮은 온도를 의미하며 다양한 기준으로 사용되는데, 여기에서는 연중 가장 낮은 최저기온을 뜻한다.

예를 들어 양평에서 1981년 기록한 최저기온 중 가장 낮은 값은 1월 5일에 발생한 -32.6℃ 이었고, 이 값은 양평의 1981년 극한 한랭야 값이다.

• 배출 경로

21세기 동안 인간활동으로 인한 전지구 온실가스 배출량을 모델링한 경로이다. 현재 지식 수준을 바탕으로 할 때 50% 이상의 확률로 온난화를 1.5℃ 미만으로 억제하는 경로는 '오버슈트 없음'으로 분류한다. 온난화를 1.6℃ 이하로 억제하고 2100년 까지 1.5℃로 낮출 수 있는 경로를 '1.5℃ 제한된 오버슈트'로 분류한다. 1.6℃를 일시적으로 초과하지만 2100년까지 1.5℃로 낮출 수 있는 경로를 '보다 높은 오버슈트'로 분류한다.

• 오버슈트

온도 오버슈트는 특정한 온난화 수준을 일시적으로 초과하는 경우를 의미한다.

• 노출과 취약성

인간, 생태계, 기반시설이나 경제, 사회 혹은 문화적 자산이 부정적인 영향을 받을 수 있는 장소나 환경에 놓여지는 것이 노출이다. 부정적인 영향을 받는 경향과 성향이 있으면 위험에 대한 민감도가 높고, 대처와 적응 능력이 부족할 경우 취약성이 높다고 할 수 있다.

※ 기후 관련 '위험'은 실제 위해(hazard)뿐만 아니라 인간과 자연계의 노출과 취약성에 따라 달라진다.

• 이산화탄소제거(CDR, Carbon dioxide removal) 기술

대기 중의 CO₂를 흡수하고 지질, 육상, 해양 저장소 또는 기기에 영구적으로 이산화탄소를 저장하는 인위적 활동이다. 기존과 향후 가능한 생물이나 지구화학적 흡수원을 인위적으로 강화시키는 것과 공기를 직접적으로 포집하고 저장하는 것이 포함된다. 이 때, 인간활동과 직접적으로 관련 없는 자연적 CO₂ 흡수는 제외한다.

• 비이산화탄소(non-CO₂) 물질 배출량

비이산화탄소(Non-CO₂) 물질 배출량은 CO₂ 외에 복사강제력에 영향을 미치는 모든 인간활동으로 인한 물질 배출량을 말한다. 여기에는 아산화질소, 일부 불화계 가스와 같은 장기 체류 온실가스뿐만 아니라 블랙카본, 이산화황 같은 에어로졸과 에어로졸 전구물질, 메테인, 오존 전구물질과 같은 단기 체류 기후변화 유발물질이 포함된다. Non-CO₂ 물질의 배출량과 표면 반사도 변화에 관련된 복사강제력은 non-CO₂ 물질의 복사강제력으로 언급된다.

• 기후 복원력 있는 개발 경로

여러 규모에서 평등한 사회와 시스템 전환을 통한 지속 가능한 발전, 빈곤 퇴치 노력을 강화하는 경로이다. 이 경로에서는 적극적인 완화, 적응, 기후 복원력 강화를 위한 노력을 통해 기후변화 위험이 줄어든다.

목차

머리말	8
<hr/>	
제1장 1.5°C 지구온난화 이해에 필요한 다양한 개념	
1. 기후변화 시나리오와 경로(pathways)의 정의	10
2. IPCC 평가보고서와 기후변화 시나리오	10
<hr/>	
제2장 관측된 기후시스템 변화와 영향	
1. 관측된 전지구 평균 지표 온도 변화	12
2. 온실가스의 배출량	13
3. 위험(Risk), 적응과 완화의 가정	15
<hr/>	
제3장 1.5/2.0°C 온난화의 기후변화 전망, 잠재적 영향과 위험	
1. 기온과 강수 극한의 미래 전망	16
2. 해수면의 미래 전망	18
3. 동아시아와 우리나라 기후의 미래 전망	19
4. 육지와 해양 생태계의 잠재적 영향과 위험	19
5. 다양한 부문의 잠재적 영향과 위험	21
6. 기후변화 적응	22
<hr/>	
제4장 1.5°C 온난화에 도달할 수 있는 배출 경로와 사회시스템 전환	
1. 이산화탄소와 비이산화탄소 물질의 배출 경로	24
2. 부문별 시스템 변화	26
3. 탄소포집기술과 순마이너스 배출량	29
<hr/>	
제5장 지속 가능한 발전, 빈곤 퇴치, 불평등 축소의 전지구적 대응 강화	
1. 이산화탄소 저감의 이행	32
2. 빈곤 퇴치와 지속 가능한 발전을 위한 적응 방안	33
3. 적응 방안 선정과 편익	33
4. 빈곤 퇴치와 지속 가능한 발전을 위한 완화 방안	33
5. 거버넌스와 국제협력	36

머리말

유엔기후변화협약(UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)은 2015년 11월에 개최된 제21차 당사국총회에서 파리협정을 채택하였다. 그리고, 이를 이행하는 전략에 필요한 과학적 정보 산출을 위해서 IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체)에 『지구온난화 1.5℃ 특별보고서』를 요청하였다. 총회 결정문에는 “산업화 이전 대비 1.5℃ 높은 지구온난화가 발생했을 때의 영향과 이와 관련된 온실가스 배출 경로에 대한 특별보고서를 2018년에 제공하도록...” 하는 내용이 포함되었다. 2016년 4월에 IPCC는 이 요청을 수락하여, 지속 가능한 발전과 빈곤 퇴치를 목표로 전지구적 기후변화에 적극적으로 대응하기 위해서 특별보고서를 작성하기로 결정했다. 전체 보고서와 함께 정책결정자를 위한 요약보고서(SPM)가 작성되어 2018년 10월 6일 인천에서 승인되었다.

『지구온난화 1.5℃ 특별보고서』 작성에는 산업화 이전 대비 현재, 1.5℃와 2.0℃ 지구온난화의 차이와 영향을 비교하는 것이 필요하고, 이를 위해서는 지금까지 발표된 과학적, 기술적, 사회경제적 연구결과를 평가해야 한다. 『지구온난화 1.5℃ 특별보고서』에는 2018년 5월 15일에 발행된 연구결과까지 포함되어 있다. 여기 제시된 주요 결과의 신뢰도와 발생가능성의 의미는 IPCC에서 전문가들이 연구결과를 평가하고, 정량화하여 결정한 것으로 다소 복잡하다. ‘신뢰도 수준’은 ‘매우 낮음’, ‘낮음’, ‘중간’, ‘높음’, ‘매우 높음’의 5단계로 구분하며, ‘발생 가능성’은 표 1과 같이 사용한다. 예를 들어, 연구가 충분히 이루어지고, 결과가 일관성이 있을 때 그 결과는 ‘사실상 확실’ 또는 ‘높은 신뢰도’를 사용한다. 『지구온난화 1.5℃ 특별보고서』의 요약보고서(SPM)는 국문 기준으로 24쪽이고, 전체 보고서는 약 500쪽으로 구성되어 두 보고서가 제공하는 정보량의 차이가 매우 크다. 본 해설서는 두 보고서에서 제시하는 1.5℃ 배출 경로, 미래 기후변화 전망과 영향, UN의 지속 가능한 발전 목표(Sustainable Development Goals, SDGs)와 저감대책 등을 포함하여 주요 연구결과를 제시하였다.

지구온난화는 인위적으로 배출한 온실가스로 인해서 **전지구 평균 지표 온도(Global Mean Surface Temperature, GMST)**가 상승하는 것을 의미한다. 본 해설서에서 지구온난화의 강도는 특별한 언급이 없는 한 산업화 이전 대비 특정 기준 연도의 GMST 상승 폭으로 표현한다. 예를 들어, 산업화 이전 대비 2006~2015년(10년)의 전지구 기온 상승 폭이 약 0.87℃ 이면, 이 값이 지구온난화의 강도이다. 여기서 '산업화 이전'은 현대적인 관측자료가 존재하는 1850~1900년을 기준기간으로 한다. 기준기간과 비교 기간에 따라 값의 규모는 달라질 수 있지만, 기온 변화의 경향은 통계적으로 강건(robust)하게 상승을 나타낸다. 강건하다는 것은 결과가 변할 가능성이 거의 없는 상태를 말한다. 본 해설서에 강건하다는 것은 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 실험에 참여한 기후모델 중 최소한 2/3 이상의 모델이 동일한 경향의 변화를 보여준다는 의미이다. 즉, 기온의 상승 경향이 강건하다는 것은 그 변화 경향이 뚜렷하여 방향이 바뀔 확률이 거의 없음을 의미한다.

표 1 본 해설서에서 제시된 주요 결과의 신뢰도와 발생 가능성의 정의

용어		발생 가능성 범위
사실상 확실함	virtually certain	99~100%
대단히 가능성 높음	extremely likely	95~100%
매우 가능성 높음	very likely	90~100%
가능성 높음	likely	66~100%
발생 가능성이 상대적으로 높음	more likely than not	50~100%
가능성 있음	as likely as not	33~66%
발생 가능성이 상대적으로 낮음	more unlikely than not	0~50%
가능성 낮음	unlikely	0~33%
매우 가능성 낮음	very unlikely	0~10%
대단히 가능성이 낮음	extremely unlikely	0~5%
가능성이 매우 희박함	exceptionally unlikely	0~1%

제1장

1.5℃ 지구온난화 이해에 필요한 다양한 개념

21세기에 1.5℃ 지구온난화의 영향을 평가하기 위해서는 기후변화 시나리오 또는 배출 경로를 이해해야 한다. 여기에서는 기후변화 시나리오, 배출 경로의 개념을 설명하고, IPCC가 평가보고서를 발표할 때마다 사용한 기후변화 시나리오를 제시하였다.

1. 기후변화 시나리오와 경로(pathways)의 정의

‘기후변화 시나리오’와 ‘경로’는 의미상 겹치는 부분이 많아서 혼용하는 경우가 많다. ‘기후변화 시나리오’는 미래 인간과 환경시스템의 변화를 일관성 있게 설명하는 것을 목적으로 하며, 정량적인 전망과 정성적인 경향을 종합적으로 보여주는 내러티브(narratives) 또는 설명으로 구성된다. 기후변화 시나리오는 온실가스 배출량과 농도 경로를 보여주는 배출량 시나리오, 기후전망 시나리오, 영향평가 시나리오로 구성되며, 각 시나리오의 미래 전망에는 내재된 불확실성을 가지고 있다. 즉, 기후변화는 장기적이고, 다측면적인 특성을 가진다. 따라서 21세기 국내총생산량(GDP), 기술혁신, 거버넌스, 생활방식의 변화 등 사회경제시스템의 변화가 미래의 에너지와 토지이용에 영향을 미친다. 이를 고려하여, 미래 온실가스 배출량, 인간 취약성, 노출도의 변화를 보여줄 수 있는 기후변화 시나리오가 필요하다. 기후변화 시나리오는 다양한 기후 정책을 반영하여 분석하고, 수립하고, 비교하는데 필수적인 정보이다.

기후변화 과학에서 경로(pathways)는 다양한 의미를 내포한다. 경로는 온실가스 배출량과 사회경제시스템의 발달을 포함하여 기후변화 시나리오의 시간적 변화를 기술하는데 사용하거나, 개별 시나리오를 지칭하기도 한다. 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오는 온실가스 농도 변화, 즉 경로를 말하고, 공통사회경제 경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 시나리오는 인구, GDP, 도시화와 같은 사회경제요소를 정량적으로 전망하고 미래 사회에 대해 설명한다. SSP는 사회경제요소와 기후정책 시나리오를 결합시키는 특성을 갖는다.

2. IPCC 평가보고서와 기후변화 시나리오

IPCC 1차부터 3차 평가보고서까지는 아주 단순한 형태의 기후변화 시나리오가 사용되었지만, 4차 평가보고서부터는 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 시나리오가 사용되었다. 2000년에 발표된 SRES 시나리오는 온실가스 배출량을 제한하는 미래 기후정책이 포함되지 않은 4개 시나리오로 구성되어 있다. 이후에 개발된 많은 정책 시나리오는 SRES 시나리오에 근거하여 개발되었다. 5차 평가보고서부터는 대표농도경로 시나리오인 RCP(Representative Concentration Pathways)와 6차 평가보고서부터는 공통사회경제시나리오로 불리는 SSP(Shared Socioeconomic Pathways)로 대체되었다. 이들 기후변화 시나리오에는 기후정책이 고려되어 있다. RCP 시나리오는 인류의 활동으로 인해 발생할 수 있는 **복사강제력**의 변화 범위($2.6 \sim 8.5 \text{W/m}^2$)를 기준으로 한 4개 시나리오로 구성된다.

CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 모델을 이용하여 기후전망자료를 생산하였고, 결과의 평가가 IPCC 5차 평가보고서에 포함되었다. 모든 모델 결과를 평균하여 산출하는 CMIP5 모델들의 앙상블을 기준으로 RCP2.6 시나리오는 기온 상승 폭을 2.0°C 이하로 제한할 수 있다. 그리고 다양한 모델이 생산한 RCP2.6 시나리오에서, 1850~1900년 대비 2100년의 기온 상승 중간값은 1.6°C에 이를 것이다. 다양한 모델 결과 중 일부 RCP2.6 시나리오만이 기온 상승 폭을 1.5°C 미만으로 제한할 수 있다.

SSP 시나리오는 RCP 시나리오를 보완하기 위해서 개발되었고, 적응과 완화에 필요한 사회경제적 노력 또는 비용을 고려하고 있다. 1.5°C로 온난화를 제한하는 기후변화 시나리오가 필요하여 RCP2.6보다 낮은 복사강제력을 포함하여 다양한 복사강제력에 대한 SSP 시나리오가 개발되었다. SSP 시나리오는 사회경제시스템, 에너지, 토지이용, 대기오염, 온실가스 배출량의 변화를 통합하여 개발되어, 미래 기후평가, 취약성, 적응, 완화에 대한 종합적인 분석이 가능하다.

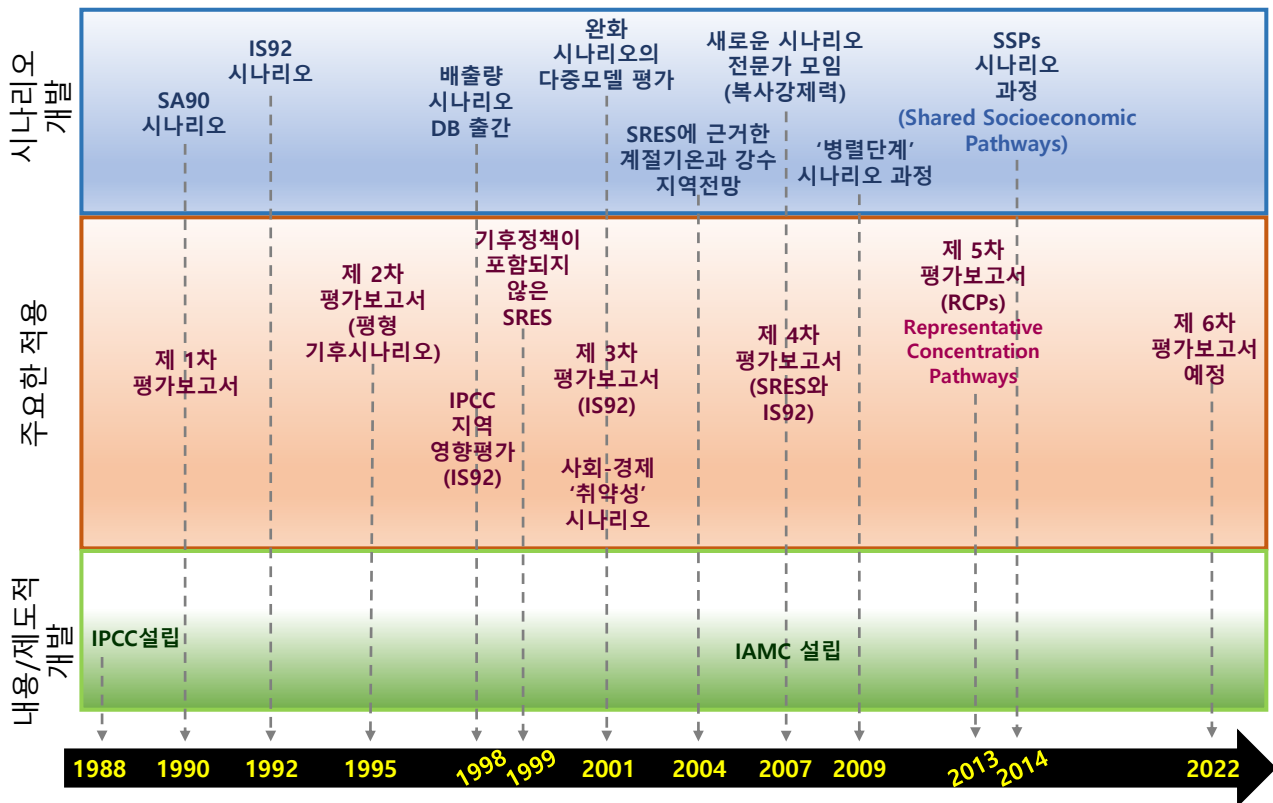


그림 1.1 IPCC 평가보고서 발간연도와 사용된 기후변화 시나리오

출처: Moss et al.(2010)

제2장

관측된 기후시스템 변화와 영향

인간활동은 산업화 이전 대비 2017년 현재 약 1.0℃(0.8~1.2℃ 범위)의 지구온난화(이하 온난화)를 유발한 것으로 추정된다. 현재까지의 배출량 만으로는 1.5℃의 온난화가 발생할 가능성은 낮지만(중간 신뢰도), 온난화가 현재 속도로 진행된다면 2030년에서 2052년 사이에 1.5℃ 상승에 도달할 가능성이 높다(높은 신뢰도)(그림 2.1). 1.5℃ 온난화일 때 자연계와 인간계에 대한 기후 관련 위험이 현재보다 높지만, 2.0℃일 때 보다는 낮다(높은 신뢰도).

1. 관측된 전지구 평균 지표 온도 변화

산업화 이전부터 현재까지 계속된 장기간의 온난화 경향이 반영되어, 2006~2015년(10년)에 관측된 전지구 평균 지표 온도(Global Mean Surface Temperature, GMST)는 1850~1900년 평균보다 0.87℃(0.75~0.99℃ 범위 내 가능성 높음) 높았다(그림 2.2). 이 결과는 '매우 높은 신뢰도'로 과학적으로 강건하다고 할 수 있다. 인간활동으로 인해 발생한 온난화 정도와 관측된 전체 온난화 정도는 ±20% 오차 범위(가능성 높음) 내에서 일치한다. 즉, 현재 발생한 온난화의 원인은 오차 범위 ±20% 내에서 인간활동인 셈이다. 오차 범위는 태양과 화산활동 등 자연변동성과 내부 변동성으로 인한 불확실성 때문에 발생한다. 과거부터 현재까지 배출한 온실가스의 증가로 온난화가 진행되고 있으며, 현재 GMST는 10년에 0.2℃(0.1~0.3℃ 범위 내에 가능성 높음)씩 상승하고 있다(높은 신뢰도). 산업화 이전 대비 최근 5년(2013~2017년) 기준 약 10년에 0.2℃ 상승으로 추정한다. 기간에 따라 상승 폭은 다르지만, 방향성은 변하지 않고 있다.

지구 평균인 GMST의 상승 폭보다 더 큰 온난화가 많은 지역에서 나타나고 있다. 특히 북극에서는 2~3배 더 크게 온난화가 진행되고 있다. 눈과 얼음은 반사도가 높아 대부분의 태양에너지를 반사시키는데, 온난화로 인해 북극의 눈과 얼음이 녹으면서 반사하는 태양에너지의 양이 감소한다. 결과적으로 북극에 흡수되는 태양에너지가 점점 많아지면서, 다른 지역보다 온도가 더 빠르게 상승하게 된다. 또한, 해양은 비열이 크기 때문에, 일반적으로 온난화는 육지에서 더 크게 나타난다(높은 신뢰도). 약 0.5℃의 온난화로 인해서 현재 일부 극한 기후와 기상 현상의 강도와 빈도가 통계적으로 유의하게 변하고 있다(중간 신뢰도). 극한은 통계분포에서 양 극단에 존재하는 현상으로 발생빈도는 낮지만 강도가 커서 그 피해가 직접적이다. 기후학적으로 보면 기온이 매우 높거나, 낮거나 강수량이 매우 많거나 적은 경우가 해당된다.

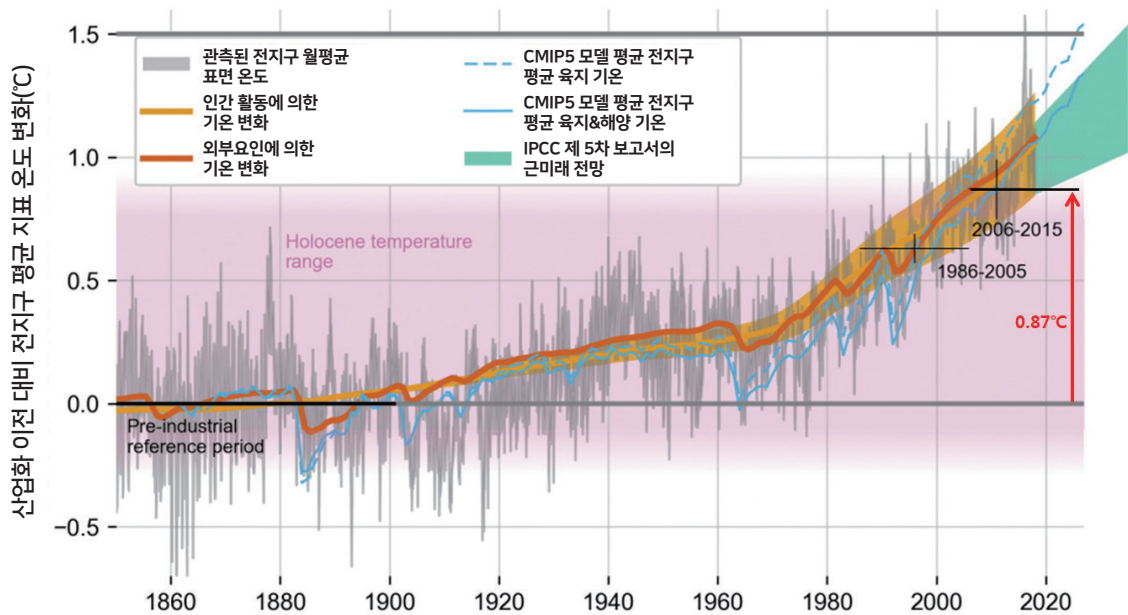


그림 2.1 산업화 이전 대비 관측된 전지구 월평균 지표 온도 변화

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure 1.2)

2. 온실가스의 배출량

산업화 이전부터 현재까지 인간활동으로 인한 온난화의 영향은 앞으로도 수백 년에서 수천 년간 지속될 것이다. 따라서 온도 상승으로 인한 해수의 팽창과 육지 빙하가 녹아 바다로 유입되어 발생하는 해수면 상승과 같은 기후 시스템¹의 장기적인 변화와 이로 인한 영향은 계속될 것이다(높은 신뢰도). 하지만 현재까지 인간활동으로 인한 배출량(온실가스, 에어로졸, 전구물질² 포함)만으로는 향후 20~30년간(높은 신뢰도) 또는 한 세기 내(중간 신뢰도)에 산업화 이전 대비 1.5°C의 온난화가 발생할 가능성은 낮다. 인간활동으로 인한 전지구 이산화탄소(CO₂) 배출량이 순제로(net zero)에 도달하여 유지되고, 메테인, 아산화질소, 프레온가스, 에어로졸과 같은 비이산화탄소(non-CO₂) 물질의 복사강제력이 감소하면 인간활동으로 인한 온난화는 향후 수십 년 안에 멈출 것이다(높은 신뢰도). 이 때 도달하는 최대온도(maximum temperature)³는 이산화탄소 배출량이 순제로에 도달하는 시점까지 인간활동으로 인해 누적된 전지구 이산화탄소 순 배출량(높은 신뢰도)과 최대 온도에 도달하기 이전 기간의 비이산화탄소 물질의 복사강제력 수준(중간 신뢰도)에 의해 결정된다. 더 장기간의 시간 규모에서 보면, 추가적인 온난화를 방지하고(중간 신뢰도), 해양 산성화⁴를 되돌리고, 해수면 상승을 최소화하기 위해서는, 인간활동으로 인한 전지구 이산화탄소 배출량을 순마이너스(net-negative)⁵로 유지하고 동시에/또는 비이산화탄소 물질의 복사강제력을 추가적으로 감소시켜야 할 것이다(높은 신뢰도).

1 기후에 영향을 미치는 모든 시스템으로 대기권, 해양을 포함한 수권, 생물권, 지권, 빙권을 말함.

2 배출할 때는 온실가스나 에어로졸이 아니었지만, 화학반응에 의해 온실가스나 에어로졸이 되어 농도에 영향을 미치는 화합물

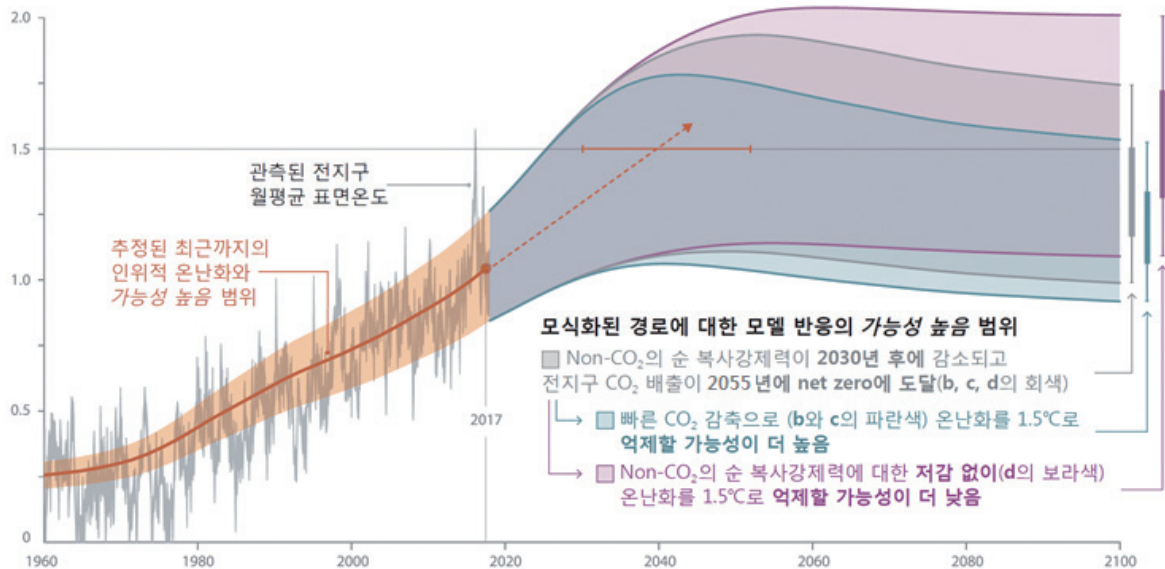
3 최대 온도는 복사강제력 증가로 인해 상승할 수 있는 가장 높은 기온

4 대기 중에 이산화탄소가 해양으로 흡수되면서 알칼리성인 해수의 산도값이 낮아져 산성화되는 것.

5 온실가스 배출량 보다 흡수량이 더 많은 상황으로 흡수량을 늘리거나 배출량을 줄여서 달성 가능함.

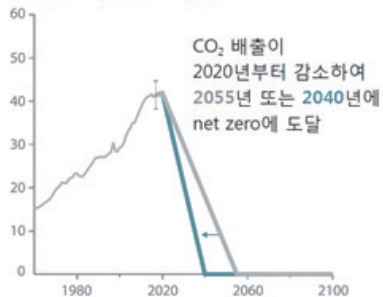
a) 관측된 전지구 기온 변화와 모식화된 인간활동에 의한 배출 및 강제력 경로에 따른 모델 반응

1850-1900년 대비 지구온난화(°C)



b) 모식화된 전지구 CO₂ 순 배출 경로

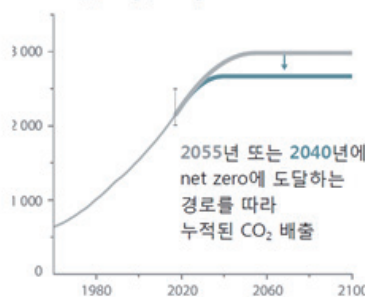
10억톤 CO₂/년 (GtCO₂/년)



보다 빠르고 극단적인 CO₂ 배출량 감축은 세부
그림 c)에서 보여지는 누적 CO₂ 배출량을 억제함

c) CO₂ 순 누적 배출량

10억톤 CO₂ (GtCO₂)



최고 온도 상승은 CO₂ 순 누적 배출량과 메탄, NO₂, 에어로졸 및 다른 인간활동에
기인한 강제력 인자들에 의한 non-CO₂ 순 복사강제력에 의해 결정

d) Non-CO₂ 복사강제력 경로

W/m²

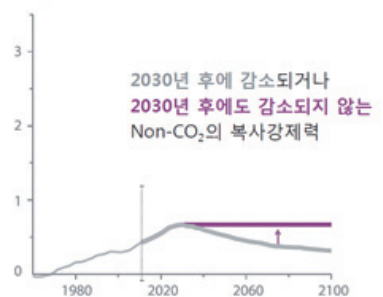


그림 2.2 a) 관측된 월별 전지구 평균 지표 온도(GMST) 변화(2017년까지 회색 실선이고, HadCRUT4, GISTEMP, Cowtan-Way, NOAA 등 4개 자료로 산출)와 인간활동에 기인한 온난화 추정치 (2017년까지 주황색 실선, 주황색 음영은 가능성 높음으로 평가된 범위). 주황색 점선 화살표와 주황색 수평 오차 막대는 각각 온난화가 현재의 속도로 지속되는 경우에 1.5°C에 도달하는 시점의 중간 값과 가능성 높음 범위를 나타낸다. a)의 오른쪽 회색 음영은 기후모델로 계산된 것으로, CO₂ 순 배출량(그림 b)와 c)의 회색 실선) 2020년부터 급속하게 감소하여 2055년에 순제로(net zero)에 도달한다. 또한, 비이산화탄소(non-CO₂) 물질의 순복사강제력은(그림 d)의 회색 실선) 2030년까지 증가하다가 이후 감소하는 것으로 유형화된 경로에 대해 '가능성 높음'의 온난화 반응 범위를 나타낸다. 그림 a)의 파란색 음영은 CO₂ 순 배출량 감소가 더 빨라져 2040년에 순제로에 도달하고(그림 b)의 파란색 실선) 이에 따른 CO₂ 누적 배출량(그림 c)이 감소할 때의 반응을 나타낸다. 보라색 음영은 CO₂ 순 배출량이 2055년까지 0으로 감소하고, non-CO₂ 물질의 순복사강제력이 2030년 이후 일정하게 유지되었을 때의 반응을 나타낸다. 그림 a)에서 오른쪽의 수직 오차 막대는 3개 유형화된 경로 하에서 2100년에 추정된 온난화 분포의 가능성 높음 범위 (가는 실선)와 중간 범위(33~66 분위, 굵은 실선)를 나타낸다. 그림 b), c), d)의 수직 방향 점선 오차 막대는 각각 2017년 기준 과거의 연간 전지구 CO₂ 배출량(Global Carbon Project 자료), CO₂ 순 누적 배출량, IPCC 5차 평가보고서의 2011년 non-CO₂ 물질의 순복사강제력에 대한 '가능성 높음' 범위를 나타낸다. 그림 c와 d의 수직 축은 대략적으로 GMST와 동등한 효과를 표현하기 위해 조정되었다.

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure SPM.1)

그림 2.2에서 회색선과 범위, 파란색 선과 범위, 보라색 선과 범위는 1.5°C 온난화에 도달할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 파란색선은 CO₂ 배출량의 빠른 감축으로 온난화를 1.5°C로 억제할 가능성이 가장 높은 경로이다. 극히 일부를 제외하고, 대부분이 1.5°C로 억제된다. 회색선은 비이산화탄소 물질의 순복사강제력이 2030년 후에 감소하고, 전지구 CO₂ 배출량이 2055년에 순제로 도달하는 경로를 보여준다. 많은 부분이 1.5°C 억제가 가능하지만 일부는 실패한다. 보라색선은 비이산화탄소 물질의 순복사강제력이 저감되지 않아서 일부는 억제가 가능하지만, 가능성이 낮다. 결과적으로 1.5°C로 온난화를 제한하기 위해서는 CO₂와 함께 비이산화탄소 물질 복사강제력의 저감이 필요하다.

3. 위험(Risk), 적응과 완화의 가정

자연계와 인간계에 영향을 미치는 기후 관련 위험은 온난화의 규모⁶와 속도, 지리적 위치⁷, 경제발달 정도⁸와 취약성 수준에 따라 달라지며, 적응과 완화 전략의 선택과 실행에 의해 결정된다(높은 신뢰도)(그림 3.5). 온난화가 자연계와 인간계에 미치는 영향은 이미 관측되고 있다(높은 신뢰도). 온난화로 인해 육상과 해양 생태계 대부분이 변화했고, 그것들이 인간에게 제공하는 혜택 역시 변화했다(높은 신뢰도). 미래의 기후 관련 위험은 온난화의 속도, 정점 온도(peak)⁹와 지속 기간에 의해서 결정된다. 전체적으로 기후 관련 위험은 2100년까지 점진적으로 1.5°C 온난화가 진행되어 안정화되는 경우보다, 최종적으로 1.5°C를 초과하는 경우에 더욱 크다. 특히 정점 온도가 높을 때(가령 약 2.0°C) 그 위험이 더욱 커진다(높은 신뢰도). 일부 생태계 손실과 같은 영향은 장기간 지속되거나 **비가역적**일 수 있다(높은 신뢰도). 다시 현재의 상태로 돌아오는 것이 불가능하거나 많은 시간과 노력이 필요할 수 있다.

적응과 완화를 위한 노력은 이미 진행되고 있다(높은 신뢰도). 다양한 부문에서 기후변화를 완화하는 전략의 이행을 확대하고 가속화하여 미래의 기후 관련 위험을 감소시킬 수 있다. 더불어 점진적이고 전환적인 적응 노력을 통해서도 그 위험을 감소시킬 수 있다(높은 신뢰도).

6 기온 상승 폭 또는 온난화 강도를 말함. 온도 상승 폭이 크면 클수록 온난화의 강도는 커짐.

7 중위도보다 고위도와 북극에서 기온의 상승 폭이 큼.

8 경제 발달 단계가 높으면 대응 대책이 잘 수립될 확률이 큼.

9 온난화로 인해 가장 높이 올라간 온도로 최대온도와 같은 의미임.

제3장

1.5℃/2.0℃ 온난화의 기후변화 전망, 잠재적 영향과 위험

현재의 기후와 기후모델에서 산출한 1.5℃와 2.0℃¹⁰ 온난화의 미래 전망을 비교하였다. 기후모델의 결과는 온난화가 1.5℃까지 진행될 때와 2.0℃까지 진행될 때 지역별 기후변화 차이가 클 것으로 전망한다. 대부분의 육지와 해양에서 평균 온도는 상승하며, 일부 지역에서는 호우 또는 가뭄이 증가한다. 1.5℃보다 2.0℃ 온난화에서 해수면은 더 많이 상승하고, 육지와 해양 생태계에 대한 위험과 다양한 부문¹¹의 기후 관련 잠재적 위험 또한 커질 것이다. 그러므로 적응 필요성은 대부분 1.5℃ 온난화보다 2.0℃ 온난화에서 더 높다(높은 신뢰도).

1. 기온과 강수 극한의 미래 전망

대부분의 육지와 해양의 평균 온도가 상승하고(높은 신뢰도), 많은 지역에서 극한 고온 현상이 증가할 것이다(높은 신뢰도). 또한, 일부 지역에서 호우¹²가 증가하고(중간 신뢰도) 일부 지역에서는 가뭄과 강수 부족의 가능성이 증가(중간 신뢰도)할 것이다. 각각의 결과는 중간에서 매우 높은 신뢰도까지 다양하게 나타나지만, 온도와 관련된 현상이 강수와 관련된 현상보다 신뢰도가 높다.

과거 결과에서 0.5℃ 상승으로도 극한기후 현상은 명백하게 변화하기 때문에 현재보다 0.5℃ 더 상승한다면 또 다른 극한기후 현상의 변화를 초래할 수 있다(중간 신뢰도). 산업화 이전과 대비하여 1.5℃ 온난화가 발생했을 때, 많은 지역에서 극한 고온 현상이 증가할 것이라는 결과는 신뢰도가 높고, 이러한 결과가 바뀔 가능성은 매우 낮다. 일부 지역에서는 호우의 빈도와 강도 그리고/또는 강수량이 증가(높은 신뢰도)하지만, 일부 지역에서는 가뭄의 강도 또는 빈도가 증가할 것이다(중간 신뢰도).

육지에서 극한 고온과 저온의 상승이 전지구 평균 지표 온도(GMST)의 상승보다 더 클 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 중위도에서 **극한 온난일(extreme hot day)**은 산업화 이전과 대비하여 1.5℃ 온난화에 도달했을 때 약 3.0℃까지 상승하고, 2.0℃ 온난화에 도달했을 때는 약 4.0℃까지 높아질 것으로 전망된다(높은 신뢰도)(그림 3.1). 고위도에서 **극한 한랭야(extreme cold night)**는 산업화 이전과 대비하여 1.5℃ 온난화에 도달했을 때 약 4.5℃ 상승하고, 2.0℃ 온난화에 도달했을 때 약 6.0℃까지 높아질 것으로 전망된다(높은 신뢰도)(그림 3.1). 극한 고온의 빈도는 대부분 육지에서 증가하는데, 특히 열대지역에서 크게 증가할 것으로 전망된다(높은 신뢰도).

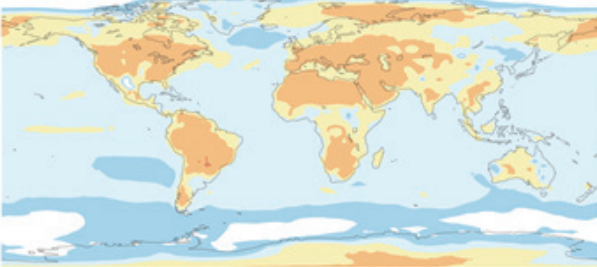
전지구적으로 1.5℃보다 2.0℃ 온난화에서 5일최다강수량으로 산출한 호우, 특히 열대저기압과 관련된 호우가 더 많이 발생한다(중간 신뢰도)(그림 3.2). 극한 기온의 변화보다 극한 강수량의 변화는 신뢰도가 낮다. 호우로 인한 잠재적 홍수(hazard) 피해 면적이 전지구 육지에서 더 넓어질 것으로 전망된다(중간 신뢰도). 일부 북반구 고위도와 그리고/또는 높은 산지, 동아시아와 북아메리카 동부에서 호우 위험이 높아질 것이다. 하지만 나머지 지역에서는 미래 호우 전망에 대한 신뢰도가 낮다.

¹⁰ 온난화 정도는 전지구 평균기온을 이용하여 산출함.

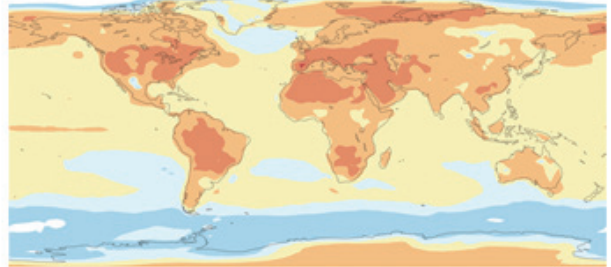
¹¹ 건강, 생계, 식량 안보, 물 공급, 경제성장 등

¹² 여기에서 호우는 연중 5일 연속 강수량의 합 중에 가장 높은 값으로 5일최다강수량(Rx5day)을 의미함.

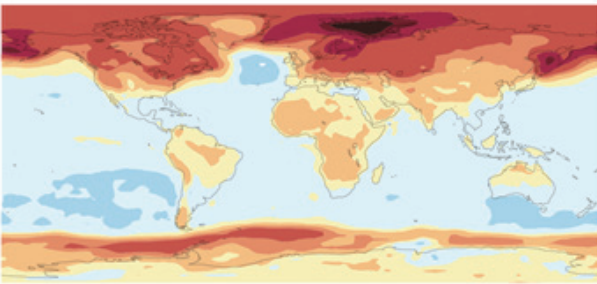
(A) 1.5°C 온난화일 때 극한 온난일 변화



(B) 2.0°C 온난화일 때 극한 온난일 변화



(C) 1.5°C 온난화일 때 극한 한랭야 변화



(D) 2.0°C 온난화일 때 극한 한랭야 변화

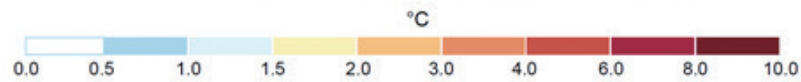
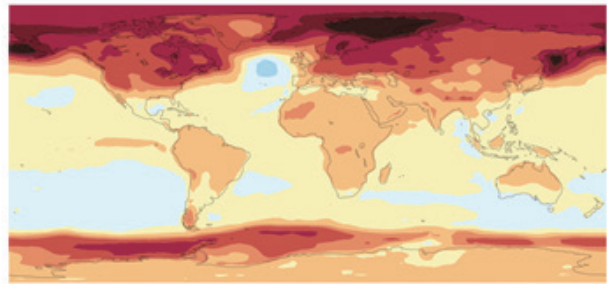
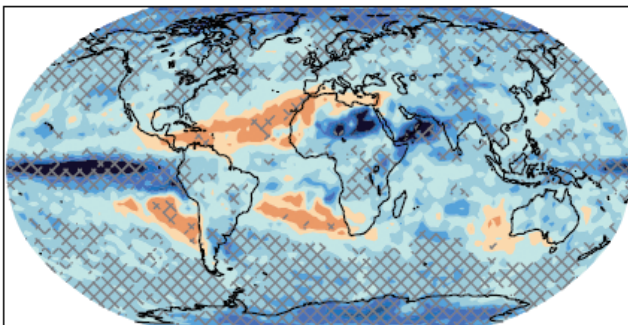


그림 3.1 1.5/2.0°C 온난화일 때 극한 온난일과 극한 한랭야의 변화 차이(A, B, C, D)

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (FAQ 3.1, Figure 1)

(A) 1.5°C 온난화일 때 호우(Rx5day) 변화



(B) 2.0°C 온난화일 때 호우(Rx5day) 변화

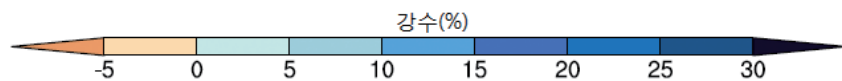
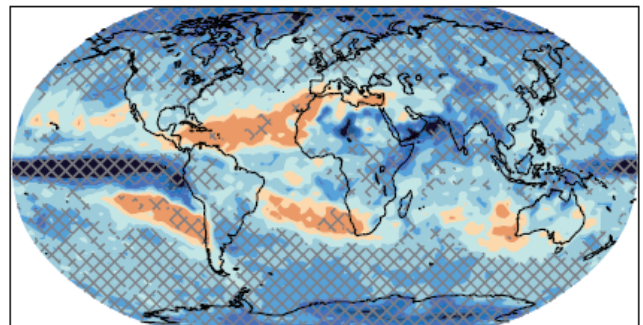


그림 3.2 1.5/2.0°C 온난화일 때 호우(5-day Maximum Rainfall, Rx5day)의 변화 차이(A, B)

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure 3.4)

일부 지역에서는 최다무강수일로 표시한 가뭄과 강수 부족으로 인한 위험이 나타날 것으로 전망된다. 이 위험은 1.5℃보다 2.0℃ 온난화에서 더 높아질 것으로 전망된다(중간 신뢰도)(그림 3.3). 결과적으로 지역에 따라 홍수와 가뭄의 피해가 동시에 발생하여 수자원 관리에 대한 부담이 커질 것이다.

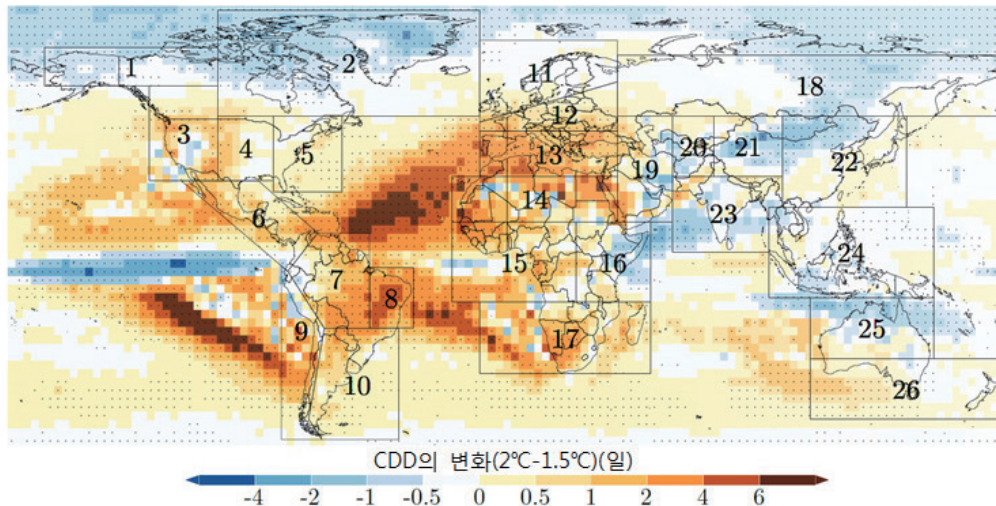


그림 3.3 2.0℃와 1.5℃ 온난화일 때 가뭄(최대무강수일, Consecutive Dry Days, CDD)의 변화 차이

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5℃ (Figure 3.13)

2. 해수면의 미래 전망

2100년까지 전지구 평균 해수면 상승 폭은 1.5℃보다 2.0℃ 온난화에서 약 0.1m 높을 것으로 전망된다(중간 신뢰도). 해수면은 2100년 이후에도 계속 상승할 것이며(높은 신뢰도), 상승 규모와 속도는 미래 **배출 경로**에 따라 달라진다. 해수면이 상승하면 가장 먼저 영향을 받는 지역은 군소 도서지역, 저지대 연안, 삼각주 지역과 같이 바다와 인접한 곳이다. 해수면 상승 속도가 느려지면 이러한 지역에서 해수면 상승에 적응하는데 더 많은 시간적 여유가 생긴다(중간 신뢰도).

2100년까지 전지구 평균 해수면은 1.5℃ 온난화일 때 1986~2005년 대비 0.26~0.77m 정도 상승할 것이며, 이는 2.0℃ 온난화보다 0.1m(0.04~0.16m 범위) 낮은 수치다(중간 신뢰도). 전지구 해수면 상승을 0.1m 감소시키면 적응정책을 실행하지 않아도 관련 위험에 노출되는 인구를 2010년 인구 기준으로 최대 1천만 명 줄일 수 있다(중간 신뢰도).

21세기 동안 온난화를 1.5℃로 억제하더라도, 해수면은 2100년 이후까지 계속 상승할 것이다(높은 신뢰도). 남극 빙상¹³의 불안정성 그리고/또는 그린란드 빙상의 되돌릴 수 없는 손실로 인해 수백 년에서 수천 년에 걸쳐 해수면이 수 미터(m) 상승할 수 있다. 1.5~2.0℃ 범위의 온난화에서 이러한 불안정성이 촉발될 수 있다(중간 신뢰도).

온난화가 심화되면 해수면 상승과 관련된 바닷물 침입, 홍수와 기반시설 피해 증가가 군소 도서지역, 저지대 해안지역, 삼각주의 인간계와 생태계에 더 많은 위험을 초래할 것이다(높은 신뢰도). 해수면 상승과 관련된 위험은 1.5℃보다 2.0℃ 온난화에서 더 높다. 1.5℃ 온난화일 때는 해수면의 상승 속도가 2.0℃ 온난화보다 느리기 때문에 연안 자연생태계의 관리와 복원, 기반시설 보강 등 적응을 위한 시간적 여유가 생기면서 위험이 줄어들게 된다(중간 신뢰도).

¹³ 대륙을 덮고 있는 거대한 얼음 덩어리를 빙상이라 하며 현재 넓은 면적을 덮고 있는 빙상은 남극과 그린란드에 존재함.

3. 동아시아와 우리나라 기후의 미래 전망

국립기상과학원의 분석 결과(심성보 외, 2019)에 따르면 1.5/2.0°C 온난화에 따른 동아시아 기후의 미래 전망 결과는 현재(2006~2015년 모델과거) 대비 전지구 기온 상승 수준과 유사한 것으로 나타났다(그림 3.4). 1.5°C 보다 2.0°C 온난화에서 동아시아 지역의 기온은 약 0.6°C 더 상승했으며, 한반도, 몽골, 중국 화북과 동북에서 뚜렷하게 증가했다. 연강수량은 전지구에 비해 동아시아와 우리나라 지역에서 증가하는 경향이 크게 나타났다. 1.5°C 보다 2.0°C 온난화에서 동아시아는 $20.7 \pm 4.1\text{mm}$, 한반도에서는 $25.1 \pm 6.6\text{mm}$ 더 증가했으며, 특히 한반도, 중국 화동, 화북과 일본에서 뚜렷하게 증가했다.

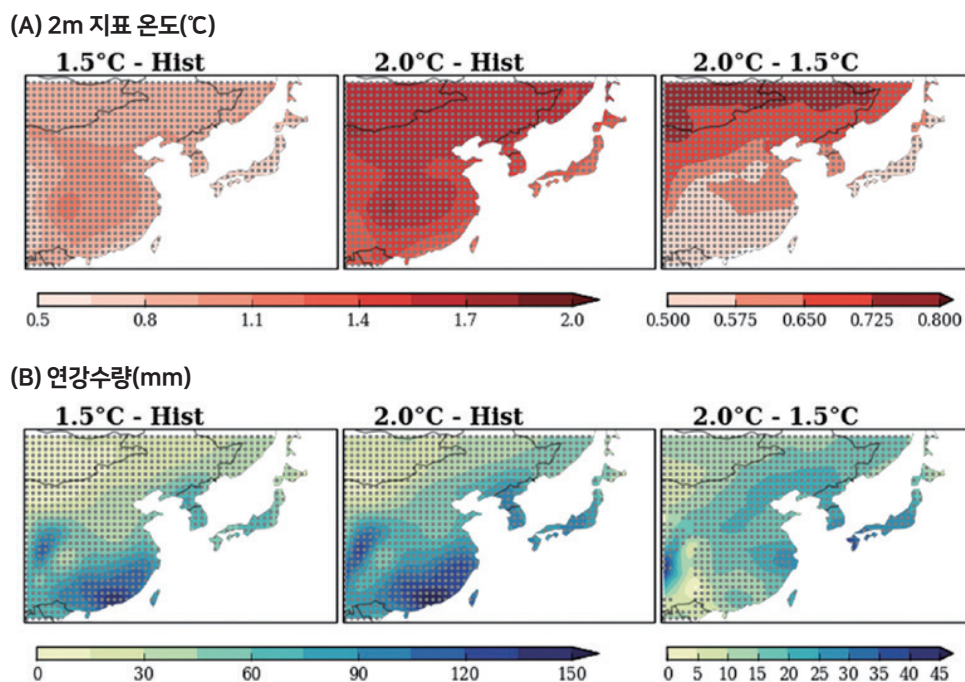


그림 3.4 1.5/2.0°C 온난화일 때 동아시아 2m 지표 온도(A)와 연강수량(B) 변화와 차이

출처: 심성보 외(2019)

4. 육지와 해양 생태계의 잠재적 영향과 위험

육지에서 생물종의 감소와 멸종과 같은 생물다양성과 생태계에 대한 영향은 2.0°C보다 1.5°C 온난화에서 줄어들 것으로 전망된다. 온난화를 1.5°C로 억제하게 되면 육상, 담수와 연안 생태계에 대한 영향은 2.0°C 온난화일 때보다 줄어들고 이들이 제공하는 역할과 작용을 많이 보존할 수 있을 것으로 전망된다(높은 신뢰도)(그림 3.5).

105,000개 육지 생물종 가운데 1.5°C 온난화일 때 곤충의 6%, 식물의 8%, 척추동물의 4%가 현재 기후적으로 서식 가능한 공간 범위의 절반 이상을 잃고, 2.0°C에서는 더 많이 잃을 것으로 전망된다(중간 신뢰도). 2.0°C 온난화보다 1.5°C 온난화일 때 산불과 침입종의 확산과 같은 기타 생물다양성 관련 위험도 감소한다(높은 신뢰도).

2.0℃ 온난화에서는 전지구 육지 면적의 약 13%(4분위 범위¹⁴ 8~20%)가 다른 유형의 생태계로 전환될 것으로 전망된다. 반면 1℃ 온난화에서는 약 4%(4분위 범위 2~7%)만이 다른 유형의 생태계로 전환될 것으로 예상된다(중간 신뢰도). 1.5℃ 온난화일 때는 다른 유형의 생태계로 전환될 위험에 처해지는 면적이 2.0℃ 온난화의 절반 수준인 약 6.5% 일 것으로 예상된다(중간 신뢰도).

나무가 자랄 수 없던 툰드라 지역에서 기온 상승으로 인해 관목이 자라기 시작했다(높은 신뢰도). 특히 고위도 지역의 툰드라와 한대림은 기후변화로 인한 황폐화와 산림이 감소할 위험에 놓여있다. 현재보다 기온 상승 폭이 클수록 이러한 위험은 더 커질 것이다. 1.5℃ 온난화보다 2.0℃ 온난화일 때 수 세기 동안 약 1.5~2.5백만 km²의 영구동토층¹⁵이 더 녹을 것으로 전망된다(중간 신뢰도).

2.0℃ 온난화보다 1.5℃ 온난화일 때 해양 온도의 상승뿐 아니라 이와 관련된 해양 산성화가 완화되고, 해양의 산소 수치가 높아질 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 북극 해빙과 온난한 수역의 산호초는 감소하고 있다. 2.0℃ 온난화보다 1.5℃ 온난화일 때 해양의 생물다양성, 어업, 생태계와 이들이 인간에게 제공하는 다양한 혜택이 사라질 위험이 줄어들 것으로 전망된다(높은 신뢰도).

2.0℃ 온난화에서는 북극해의 해빙이 여름에 모두 녹아 없어질 가능성이 10년에 한 번 정도이다. 반면, 1.5℃ 온난화에서는 100년에 한 번 정도로 발생 가능성이 현저하게 낮다(높은 신뢰도). 온도 **오버슈트**의 영향으로 인한 북극 해빙 면적의 변화는 10년 정도의 시간 규모에서는 **가역적**이다(높은 신뢰도).

1.5℃ 온난화에서는 기온 상승으로 현재보다 해양 생물종의 분포가 본래의 서식지보다 고위도로 이동¹⁶하고, 연안자원 손실, 어업과 양식업의 생산량 감소와 같은 생태계에 대한 피해도 증가 하는데, 특히 저위도에서 많이 증가할 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 이러한 위험은 1.5℃보다 2.0℃ 온난화에서 더 증가할 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 예를 들어, 산호초가 백화현상¹⁷과 같은 위험에 처하는 비율이 1.5℃ 온난화에서는 70~90%인데 반해(높은 신뢰도), 2.0℃ 온난화에서는 약 99%에 이를 것으로 전망된다(매우 높은 신뢰도). 기온 상승에 따라 여러 해양과 연안 생태계의 비가역적인 손실 위험은 증가하며, 특히 2.0℃ 온난화 이상에서 더욱 증가한다(높은 신뢰도).

1.5℃ 온난화에서 이산화탄소의 농도 증가로 인한 해양 산성화는 해조류에서 어류에 이르기까지 광범위한 생물종의 성장, 발달, 석회화, 생존, 나아가 다양성에도 악영향을 미칠 것이다. 이러한 해양 산성화가 2.0℃ 온난화에서는 더욱 심화될 것이다(높은 신뢰도).

해양의 기후변화는 생물체의 생물학적 기능과 작용, 생존, 서식지, 번식, 질병의 발병과 침입종 위험에 영향을 미쳐 어업과 양식업에 대한 위험을 증가시킬 것이다(중간 신뢰도). 그 영향은 2.0℃ 온난화보다 1.5℃에서 줄어들 것으로 전망된다. 예를 들어, 어떤 전지구 어업모델은 연간 전지구 어업 수확량이 1.5℃ 온난화에서는 대략 150만 톤 정도가 감소하는데 반해 2.0℃ 온난화에서는 300만 톤 이상 감소할 것으로 전망하였다(중간 신뢰도).

¹⁴ 통계적 분포에서 상위 25%와 하위 25%를 제외한 중간 50% 범위임. 여기에서는 중간 50%에 해당하는 기후모델들이 다른 유형의 생태계로 전환될 것으로 전망하는 육지 면적의 범위가 8~20%임을 의미함.

¹⁵ 온도가 최소 2년 동안 연속해서 0℃ 이하로 유지된 지표면

¹⁶ 예를 들어 아열대 어종이 중위도 해역에서 발견됨.

¹⁷ 산호 내에 서식하는 조류가 빠져나가 하얗게 변하는 현상으로 폐사에 이를 수 있음. 주요 발생 원인은 해수온도 상승임.

5. 다양한 부문의 잠재적 영향과 위험

건강, 생계, 식량 안보와 물 공급, 안정성과 경제성장에 대한 기후 관련 위험은 1.5°C 온난화에서 증가하며, 2.0°C 온난화에서는 더 증가할 것이다(그림 3.5). 사회적 소외계층과 취약계층, 일부 토착민, 그리고 농업이나 어업에 생계를 의존하는 지역 공동체는 1.5°C 이상의 온난화로 인해 부정적인 영향을 받을 가능성이 가장 높은 그룹에 속한다(높은 신뢰도). 또한, 위험이 가장 높은 지역에는 북극 생태계, 건조지역과 군소 도서 개발도상국, 저개발국가가 포함된다(높은 신뢰도). 결국, 온난화가 심화될수록 빈곤층과 사회적 소외계층이 증가할 것으로 전망된다. 하지만, 1.5°C로 억제할 경우, 기후관련 위험에 **노출**되고, 빈곤에 **취약**해지는 인구수를 2050년까지 최대 수억 명 줄일 수 있을 것이다(중간 신뢰도).

온난화가 지속되면 보건부문에 부정적인 영향이 발생할 것으로 예상된다(높은 신뢰도). 1.5°C 온난화에서 2.0°C보다는 열과 관련된 질병 유병률과 사망률이 더 낮다(매우 높은 신뢰도). 오존 배출량이 계속 높게 유지된다면 오존 관련 사망률도 1.5°C 온난화에서 더 낮을 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 도시 열섬 현상은 도시에서 폭염의 영향을 증대시킬 것이다(높은 신뢰도). 말라리아와 Dengue 같은 일부 매개체 감염 질병의 위험은 2.0°C보다 1.5°C 온난화에서 더 낮고, 감염 질병의 위험 공간 범위가 잠재적으로 줄어들 것으로 전망된다(높은 신뢰도).

2.0°C 온난화보다 1.5°C 온난화일 때, 사하라 인근 아프리카, 동남아시아, 중남미 지역에서 옥수수, 쌀, 밀, 잠재적 기타 곡물 수확량의 순 감소량이 줄어들 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 즉, 미래에는 곡물 수확량이 2.0°C 온난화에서 1.5°C 온난화보다 더 크게 감소한다. 또한, 이산화탄소 농도에 영향을 받는 쌀과 밀의 질적 저하도 더 커질 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 사헬(Sahel), 아프리카 남부, 지중해, 중부 유럽, 아마존에서 1.5°C보다 2.0°C 온난화일 때 식량 가용성이 더 크게 감소할 것으로 전망된다(중간 신뢰도). 가축은 온도가 상승할수록 부정적인 영향에 더 노출되지만, 사료의 질, 질병의 확산, 수자원 가용성의 변화 정도에 따라 달라질 수 있다(높은 신뢰도).

지역 간 상당한 차이가 존재하지만, 미래의 사회경제적 여건을 고려했을 때 온난화를 2.0°C 대비 1.5°C로 억제하면 기후 변화로 인한 물 부족 현상을 겪는 세계 인구의 비율을 최대 50%까지 감소시킬 수 있다(중간 신뢰도). 또한 많은 군소 도서 개발도상국에서 물 부족 현상이 감소할 것이다(중간 신뢰도).

21세기 말까지 기후변화의 영향으로 인한 세계 경제성장에 대한 위험은 2.0°C보다 1.5°C 온난화에서 더 낮을 것으로 전망된다(중간 신뢰도)¹⁸. 여기에는 완화 비용과 적응에 필요한 투자액과 그로인한 혜택은 포함되지 않는다. 온난화를 1.5°C로 억제하지 못하고 2.0°C 까지 상승할 경우 열대와 남반구 아열대 국가들이 경제성장에 가장 큰 피해를 받을 것으로 전망된다(중간 신뢰도).

1.5°C 온난화보다 2.0°C 온난화로 갈수록 기후 관련 위험에 더 많이 노출되는데, 특히 아프리카와 아시아에서 더 많은 사람들이 빈곤에 노출되고, 취약해진다(높은 신뢰도). 1.5°C에서 2.0°C 온난화로 갈수록 에너지, 식량, 수자원 부문에 걸친 위험이 공간적으로나 시간적으로 중첩되어 나타날 수 있다(중간 신뢰도). 즉, 여러 위험이 동시에 같은 공간에 발생하게 되면서 기존의 재해, 노출과 취약성을 악화시킬 뿐만 아니라 더 많은 인구와 지역에 영향을 미칠 수 있는 새로운 재해, 노출, 취약성까지도 가져올 수 있다(중간 신뢰도).

5차 평가보고서 이후 2.0°C 온난화에서는 다섯 가지 '우려 단계(Reasons for Concern, RFCs)'(표 3.1) 중 네 단계에서 위험이 증가한다는 많은 증거가 도출되었다(높은 신뢰도). 온난화의 정도에 따른 위험 변화는 다음과 같이 설명할 수 있다. 1.5°C와 2.0°C 사이에서 RFC1(고유의 위협받는 시스템)에 대해 높음에서 매우 높음까지(높은 신뢰도); 1.0°C와 1.5°C 사이에서 RFC2(극한 기상 현상)에 대해 보통에서 높음까지(중간 신뢰도) 나타난다. 1.5°C와 2.0°C 사이에서 RFC3(영향의 분포)에 대해 보통에서 높음까지(높은 신뢰도); 1.5°C와 2.5°C 사이에서 RFC4(전지구 총 영향)에 대해

¹⁸ 사망, 문화유산과 생태계 서비스의 손실과 같은 영향은 금액으로 평가하기 어렵기 때문에 경제 발달 정도는 GDP로 산출함.

보통에서 높음까지(중간 신뢰도) 나타난다. 1.0℃와 2.5℃ 사이에서 RFC5(대규모 특이 현상)에 대해 보통에서 높음까지(중간 신뢰도)(그림 3.5) 나타난다.

표 3.1 다섯 가지 우려 단계와 정의

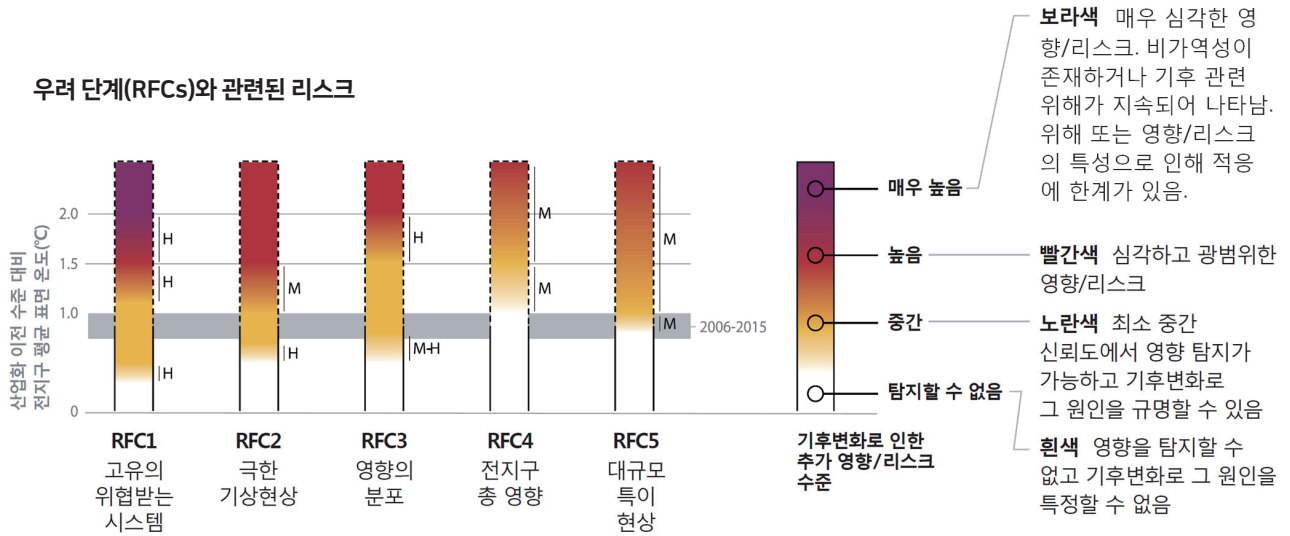
우려 단계		정의
RFC1	고유의 위협받는 시스템	기후 조건에 의존적이며 제한된, 지리적 분포 범위를 갖고 특유의 풍토성 또는 다른 고유성을 지니는 생태계와 인간계. 예로는 산호초, 북극과 북극의 토착민, 산악 빙하와 생물다양성의 위험 지역이 포함됨.
RFC2	극한 기상현상	폭염, 호우, 가뭄, 산불과 연안 홍수와 같은 극한 기상 현상으로 인한 건강, 생계, 재산, 생태계에 대한 위험/영향
RFC3	영향의 분포	물리적인 기후변화의 재해(hazard), 노출, 취약성의 불균등한 분포로 인해 특정 집단에 더 많은 영향을 미치는 위험/영향
RFC4	전지구 총 영향	전지구적 재정 피해, 전지구 규모 생태계와 생물다양성의 황폐화와 감소
RFC5	대규모 특이 현상	온난화로 인한 상대적으로 거대하고, 갑작스럽고, 때때로 비가역적인 시스템의 변화. 예로는 그린란드와 남극 빙상의 붕괴가 있음.

6. 기후변화 적응

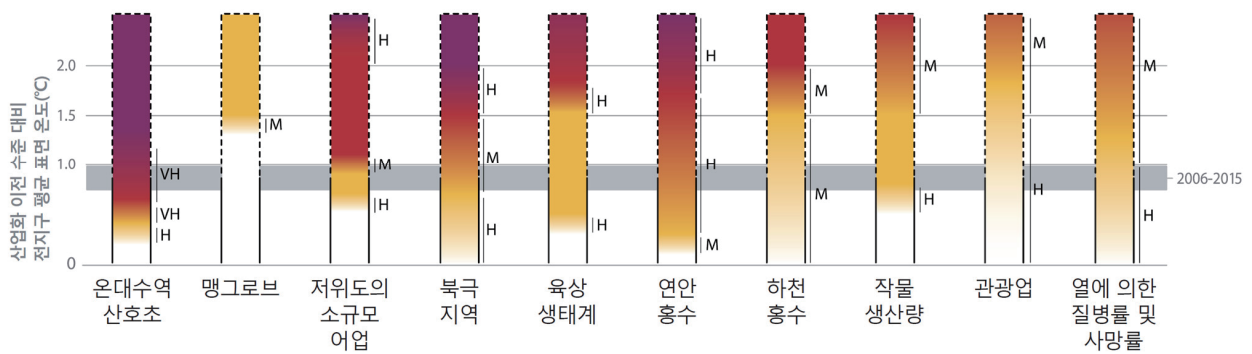
기후변화 위험을 줄일 수 있는 다양한 적응 전략이 있다(높은 신뢰도). 하지만 1.5℃ 온난화에서도 인간계와 자연계에 대한 적응 역량의 한계가 존재하며, 이로 인한 손실 또한 발생한다(중간 신뢰도). 적응 전략의 종류와 유용성은 부문별로 다르게 나타난다(중간 신뢰도). 다양한 적응 전략이 자연계와 생태계에 대한 위험 저감에 이용될 수 있으며 연안 방어와 강화와 같은 전략은 해수면 상승 위험 저감에 유용하다(중간 신뢰도). 예를 들어, 생태계에 기반한 적응, 생태계 복원, 황폐화와 산림파괴 방지, 생물다양성 관리, 지속 가능한 양식업, 지역 정보와 토착 정보 등이 포함된다. 농어촌 지역에서 건강, 생계, 식량, 물, 경제성장의 위험 저감에 유용한 적응 전략에는 효과적 관개, 사회안전망, 재난 위험 관리, 위험 분산과 공유, 공동체 기반의 적응 등이 있다. 도시 지역에서는 친환경 사회기반시설, 지속 가능한 토지 사용과 계획, 지속 가능한 물 관리 등이 위험 저감에 유용한 적응 전략이다(중간 신뢰도).

1.5℃ 온난화보다 2.0℃ 온난화에서 생태계, 식량, 보건 시스템에 대한 적응이 더 어려울 것으로 예상된다(중간 신뢰도). 그러나 군소 도서국가와 저개발 국가를 비롯한 일부 취약 지역은 1.5℃ 온난화에서도 다중적인 기후 위험을 경험할 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 1.5℃ 온난화에서도 적응 역량에 대한 한계가 존재하며, 온난화가 심화될수록 이 한계는 명백 해지고 부문에 따라 달라진다(중간 신뢰도). 이러한 한계는 취약한 지역, 생태계와 보건에 대해 지역별로 다르게 나타난다(중간 신뢰도).

우려 단계(RFCs)와 관련된 리스크



선택된 자연계, 관리된 시스템 및 인간계에 대한 리스크



신뢰도 수준 : L=낮음, M=중간, H=높음, VH=매우 높음

그림 3.5 다섯 가지 통합 우려 단계(Reasons for Concern, RFCs)는 여러 부문과 지역에 걸쳐 나타나는 주요 영향과 위험을 요약하는 기준으로 IPCC 3차 평가보고서에서부터 도입됨. RFCs는 인간, 경제, 생태계에 대한 온난화의 영향을 설명함. 개별 RFC에 대한 영향 그리고/또는 위험은 새로운 연구 문헌을 평가해서 작성됨. AR5와 같은 방식으로 온난화 수준을 영향과/또는 위험을 탐지할 수 없거나, 보통이거나, 높거나, 매우 높음을 평가해 전문적인 결정을 내리는 데 활용됨.

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure SPM.2)

제4장

1.5℃ 온난화에 도달할 수 있는 배출 경로와 사회시스템 전환

이산화탄소의 추가적인 배출로 인한 이산화탄소 농도의 상승이 없어야 2100년에 지구 기온의 상승 폭을 1.5℃ 미만으로 제한할 수 있다. 온난화를 1.5℃로 억제하는 배출 경로에 도달하려면 에너지, 토지이용, 도시, 수송과 건물을 포함한 기반시설과 산업 시스템의 빠르고 광범위한 시스템 전환이 필요하다(높은 신뢰도). 1.5℃ 배출 경로는 2.0℃ 경로 대비 향후 20년 동안 더 빠르고, 대대적인 시스템의 변화를 필요로 한다(높은 신뢰도). 온난화를 1.5℃로 억제하는 모든 경로는 21세기 동안 이산화탄소제거(CDR)기술을 사용하여 100~1,000 GtCO₂의 이산화탄소가 흡수될 것으로 전망한다.

1. 이산화탄소와 비이산화탄소 물질의 배출 경로

앞에서 밝힌 바와 같이 2100년에 지구 기온의 상승 폭을 1.5℃ 미만으로 제한하기 위해서는 인간활동에 기인한 전지구 CO₂ 순배출량을 2030년까지 2010년 대비 최소 45%까지 감소시키고 2050년에는 순제로(net zero)에 도달해야 한다. 즉, 이산화탄소의 추가 배출로 인한 이산화탄소 농도의 상승이 없어야 한다. 2.0℃ 미만으로 온난화 폭을 억제하는 대부분의 경로는 2030년까지 이산화탄소 배출량을 대략 25% 감소시키고, 2070년경에는 순제로에 도달해야 한다. 1.5℃와 2.0℃로 억제하는 경로 모두 비이산화탄소(non-CO₂) 물질 배출량은 상당히 감축될 것으로 보인다(높은 신뢰도)(그림 4.1).

온난화를 1.5℃로 억제할 수 있는 이산화탄소 배출량의 감축은 에너지와 자원 사용의 감소, 탈탄소화 속도, **이산화탄소제거(Carbon dioxide removal, CDR)** 기술 등 다양한 감축 전략에 대한 의존도의 차이에 따라 다양한 완화 포트폴리오¹⁹를 가진다. 이 포트폴리오에 따라 각기 다른 이행과 관련된 도전과제와 지속 가능한 발전과는 잠재적으로 시너지를 내거나 상충한다(높은 신뢰도).

온난화를 1.5℃로 억제하는 모델 경로는 메테인과 블랙카본 배출량의 대폭적인 감축(두 물질을 포함해 2050년까지 2010년 대비 35% 이상 감축)을 필요로 한다(그림 4.1). 이러한 경로에는 대기의 온도를 낮춰주는 에어로졸의 감축도 포함되는데, 이로 인해서 20~30년은 완화 효과가 기온 상승을 부분적으로 상쇄시킨다. 에너지 부문의 광범위한 완화 전략으로 **비이산화탄소(non-CO₂) 물질 배출량**이 저감될 수 있다. 또한, 비이산화탄소 물질을 대상으로 한 완화 전략은 농업 부문에서 아산화질소와 메테인의 배출량을 줄이고, 폐기물 부문에서 메테인의 배출량을 줄이며, 블랙카본과 수소불화탄소류의 배출원을 줄일 수 있다. 높은 바이오에너지의 수요는 일부 1.5℃ 온난화 경로에서 질소산화물의 배출량을 증가시킬 수 있으며, 이는 적절한 관리 방식의 중요성을 보여준다. 모든 1.5℃ 모델 경로에서 전망된 비이산화탄소(non-CO₂) 물질 배출량의 대규모 저감 결과로 나타나는 대기질 개선은 특히 보건부문에서 직접적이고 즉각적인 편익을 제공한다(높은 신뢰도).

온난화를 억제하기 위해서는 탄소배출총량(Total Carbon Budget), 즉 산업화 이후에 발생한 인위적인 전지구 총 누적 배출량을 제한해야 한다(높은 신뢰도). 탄소배출총량은 다양한 인간활동으로 인한 탄소배출량을 고려하여 전지구 CO₂ 순

¹⁹ 본해설서에서 포트폴리오라는 저감 방법이나 계획의 채택과 사용 비율에 대한 전략을 의미한다.

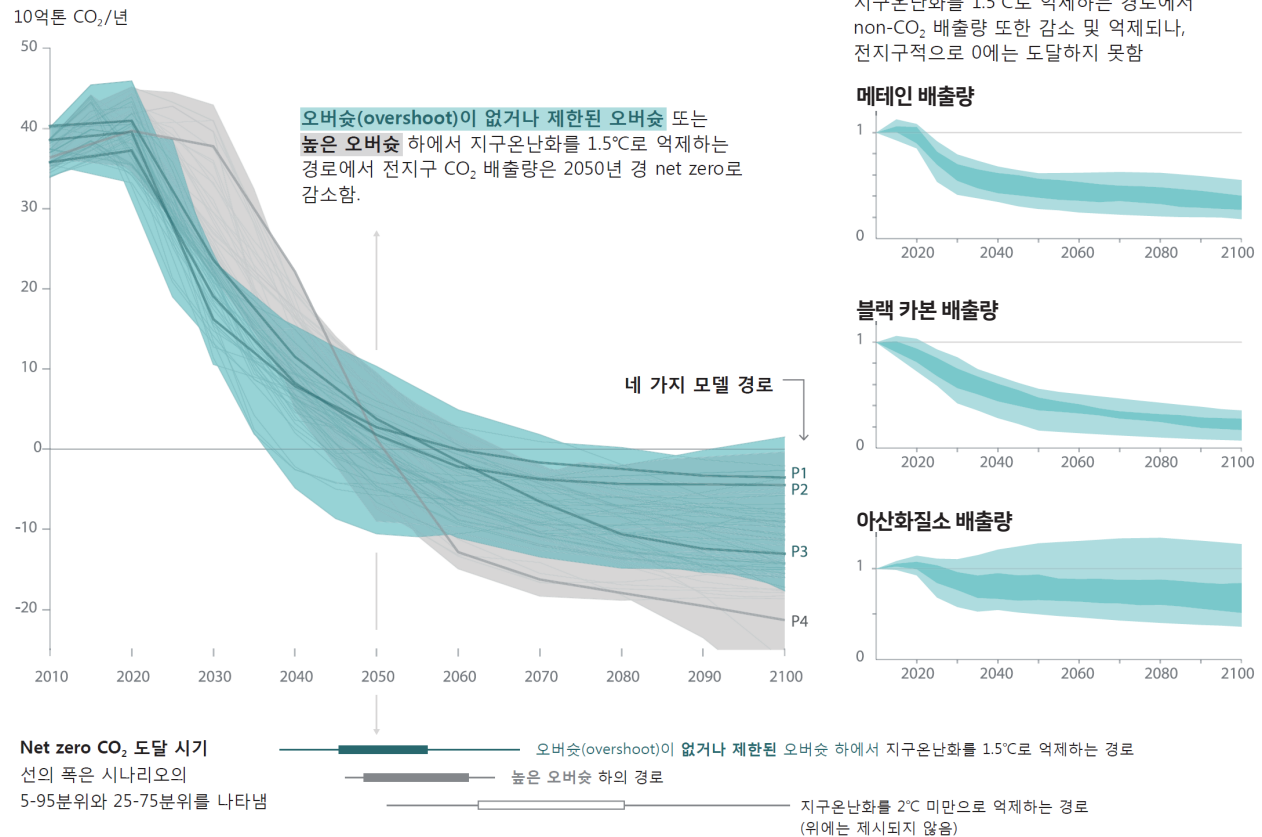
전지구 총 CO₂ 순 배출량

그림 4.1 전지구 이산화탄소와 비이산화탄소 물질의 배출 경로. 오버슈트(overshoot)이 없거나, 제한된 오버슈트(0.1°C보다 작음), 높은 오버슈트 하에서 온난화를 1.5°C로 억제하는 다양한 경로에서 추정된 인간활동에 기인한 전지구 CO₂ 순 배출량을 보여줌. 음영 처리된 영역은 이 보고서에서 평가된 모든 경로, 또는 시나리오를 보여줌. 오른쪽 그림은 메테인, 블랙카본, 아산화질소 등 비이산화탄소(non-CO₂) 물질 배출량의 범위를 보여줌. 비이산화탄소 물질의 배출량 경로는 CO₂ 감축에 매우 중요한 영향을 미치고, 별개의 배출원에서 상당한 배출량을 보여줌. 이 그림에서 음영 처리된 영역은 오버슈트(overshoot)가 없거나 제한된 오버슈트 하에서 온난화를 1.5°C로 억제하는 경로의 5~95% 범위(약한 음영)와 4분위수 범위(진한 음영)를 보여줌. 그림 하단의 박스위스커(box-whiskers)는 배출 경로가 전지구적으로 순제로 CO₂ 배출량에 도달하는 시점과 66% 이상의 확률로 온난화를 2.0°C로 억제하는 경로를 비교함. 네 유형의 모델 경로를 P1, P2, P3와 P4로 표기하였음.

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure SPM.3a)

누적배출량을 추정한 값이다. 1.5°C 온난화에 도달하기 위한 탄소배출총량 중에 2017년 말까지 대략 2200±320 GtCO₂을 이미 배출한 것으로 추정된다(중간 신뢰도). 그에 따른 잔여탄소배출총량(Remaining Carbon Budget)은 현재 연간 42±3 GtCO₂씩 고갈되고 있다(높은 신뢰도).

전지구 온도의 산출방법에 따라 잔여탄소배출총량의 추정치는 달라질 수 있다. AR5 보고서와 동일한 전지구 평균 지표 온도(GMST) 기준을 사용하면, 50% 확률로 1.5°C로 온난화를 억제하는 경우 잔여탄소배출총량은 580 GtCO₂로, 66% 확률로 억제하는 경우는 420 GtCO₂로 추정된다(중간 신뢰도)²⁰. 다른 GMST를 사용할 경우 50%와 66% 확률일 때의

20 사용한 GMST 산출방법과 무관하게, 이해도가 향상되고, 고도화되면서 AR5 대비 잔여탄소배출총량의 추정값이 약 300 GtCO₂ 증가함.

추정값은 각각 770 GtCO₂와 570 GtCO₂이다(중간 신뢰도)²¹. 추정된 잔여탄소배출총량의 불확실성은 상당히 크며 다양한 요인에 의해 달라진다. CO₂와 non-CO₂ 물질의 배출량에 대한 기후 반응의 불확실성이 ±400 GtCO₂, 과거 온난화 수준의 불확실성이 ±250 GtCO₂이다(중간 신뢰도). 미래에 영구동토층이 녹아서 추가적으로 배출될 수 있는 탄소와 습지에서 배출될 수 있는 메테인은 금세기 동안 잔여탄소배출총량을 최대 100 GtCO₂까지 고갈시킬 것이며, 이후에는 더 많이 고갈시킬 것이다(중간 신뢰도). 즉, 인류에게 허용된 이산화탄소 배출량은 더욱 줄어들기 때문에, 더 많은 감축을 이행해야 한다. 또한, 미래 non-CO₂ 물질의 감축 정도는 잔여탄소배출총량을 250 GtCO₂까지 증가시킬 수 있다(중간 신뢰도).

어떤 배출 경로에도 태양복사조절(SRM)²² 방법은 포함되어 있지 않다. 일부 SRM 방법은 이론적으로는 오버슈트를 줄이는데 효과적일 수 있으나, 큰 불확실성과 과학적 이해 부족, 높은 위험성, 거버넌스, 윤리, 지속 가능 발전에 대한 영향 때문에 보급에 제도적, 사회적 제약이 있다. 또한, 이 전략은 해양산성화를 완화시키지는 못한다(중간 신뢰도).

2. 부문별 시스템 변화

온난화를 1.5℃로 억제하는 배출 경로에 도달하려면 에너지, 토지이용, 도시, 수송과 건물을 포함한 기반시설과 산업 체계의 빠르고 광범위한 시스템 전환이 필요하다(높은 신뢰도). 이러한 시스템의 전환은 전례가 없었던 수준으로 모든 부문의 온실가스 배출량을 대대적으로 감축해야 하고, 감축을 위한 광범위한 포트폴리오와 투자의 증대가 필요하다(중간 신뢰도). 온난화를 1.5℃로 억제하는 배출 경로에서는 2.0℃ 경로 대비 향후 20년 동안 더 빠르고, 대대적인 시스템의 변화가 필요하다(높은 신뢰도).

에너지 부문에서 온난화를 1.5℃로 억제하는 모델 경로는 일반적으로 2.0℃ 경로보다 에너지의 효율성을 더 개선해야 한다. 또한, 소비자가 사용하는 형태의 에너지를 전력으로 빠르게 바꾸어서, 서비스 수요를 충족시키는 동시에 소비를 절감할 수 있도록 한다(높은 신뢰도). 2.0℃ 경로와 대비하여 1.5℃ 경로에서는 2050년 이전에 저배출 에너지원의 비중이 더 높아질 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 또한, 2050년에 이르러 재생 에너지가 전력 생산의 70~85%(4분위수 범위)를 차지할 것으로 전망된다(높은 신뢰도). 전력 생산에서 이산화탄소 포집과 저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술을 활용하면 화석연료와 원자력의 비중이 대부분 1.5℃ 경로에서 증가하는 것으로 예측되었다. 1.5℃ 경로에서 CCS의 활용으로 전력 생산 중 천연가스의 비중은 2050년 전지구 전력의 8%(4분위수 범위: 3~11%)를 차지하게 되고, 석탄의 비중은 모든 경로에서 전지구 전력의 0%(4분위수 범위: 0~2%)에 가깝게 대폭 감소될 것이다(높은 신뢰도). 에너지의 선택 전략, 국가별 여건 차이 등 극복할 과제가 아직 남아있지만, 과거 몇 년 동안 태양에너지와 풍력에너지, 전력 저장 기술에 대한 사회적 인식과 정책적 이행의 가능성이 상당히 높아졌다(높은 신뢰도). 이러한 개선은 발전 부문의 잠재적인 시스템 전환을 보여준다(그림 4.2).

온난화를 1.5℃로 억제하는 모델 경로에서 2050년에 산업부문의 CO₂ 배출량은 2010년 대비 대략 65~90%(4분위수 범위) 감소할 것으로 전망되며, 2.0℃ 경로에서는 50~80% 감소할 것으로 전망된다(중간 신뢰도). CO₂ 배출량의 감소는 전기화, 수소연료, 지속 가능한 바이오 기반 원료, 에너지원 대체, 탄소포집저장과활용(carbon dioxide capture, utilization and storage, CCUS)과 같은 현재 활용 가능한 기술과 새로운 기술 개발로 달성될 수 있다. 이러한 방안들은 기술적으로 입증되었으나, 재정적 측면에서 산업 설비 확보의 부족과 제도적 장치의 미비로 인해 대규모로 보급되는데 어려움이 있다. 단지 산업부문에서 에너지와 공정의 효율성을 개선하여 배출량을 저감하는 것만으로는 온난화를

21 이 추정값은 2006~2015년에 관측된 GMST를 사용하며, 지표 온도를 이용하여 미래의 온도 변화를 추정함.

22 기후시스템으로 흡수되는 태양 복사열을 감소시켜 온난화를 방지하는 기술이지만 실효성은 검증되지 않음.

1.5℃로 억제하기에는 역부족이다(높은 신뢰도).

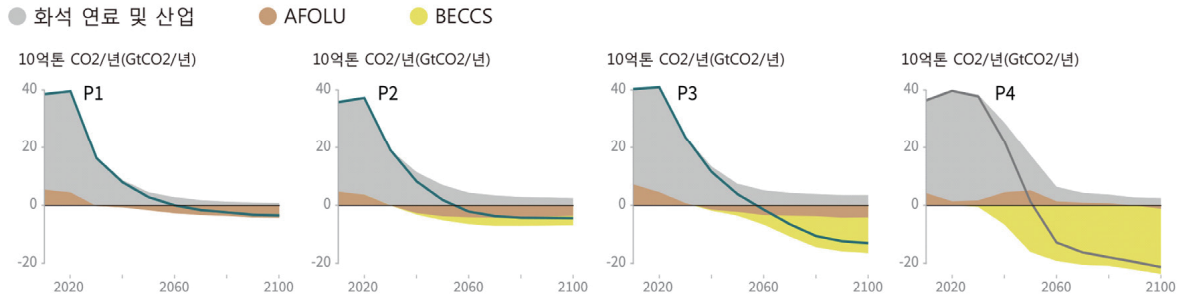
온난화를 2.0℃ 미만으로 억제하는 경로와 비교하여 1.5℃ 미만으로 억제하는 데 필요한 도시와 기반시설 시스템의 전환은 토지이용과 도시계획의 변화뿐 아니라 수송과 건물부문의 배출량을 대폭적으로 감축하는 것을 의미한다(중간 신뢰도). 대폭적으로 배출량 감축을 가능하게 하는 기술과 이행에는 다양한 에너지 효율성의 개선 방안이 포함된다. 1.5℃ 온난화 경로에서 2050년에 건물부문의 에너지 수요에서 전력이 차지하는 비중은 55~75%에 이를 것이며, 2.0℃ 온난화 경로에서는 50~70%가 될 것이다(중간 신뢰도). 수송부문에서 저배출 에너지의 비중이 2020년에 5% 미만에서 2050년에 35~65%로 증가할 것이며, 2.0℃ 온난화 경로에서는 25~45%가 될 것이다(중간 신뢰도). 국가와 지역의 여건에 따라 자본의 가용 상황이 다르기 때문에 경제적, 제도적, 사회문화적 저항이 발생하고, 도시와 기반시설 시스템의 전환을 저해할 수 있다(높은 신뢰도).

온난화를 1.5℃로 억제한 모든 경로에서 전지구와 지역별 토지이용의 전환이 나타나지만, 그 규모는 완화 포트폴리오에 따라 달라진다. 1.5℃로 억제하는 모델 경로에서는 2010년 대비 2050년에는 초지가 50~1,100만 km² 감소한다. 식량과 사료작물 생산에 필요한 초지를 제외한 농경지는 -400~+250만 km² 범위에서 감소하거나 증가하며, 바이오에너지에 필요한 작물 경작지가 0~600만 km² 증가할 전망이다. 이로 인해서 산림 면적은 -200~+950만 km² 범위에서 감소하거나 증가할 것으로 전망된다(중간 신뢰도)²³. 비슷한 규모의 토지이용의 전환이 2.0℃ 경로에서도 관측될 수 있다(중간 신뢰도). 이러한 대규모 전환으로 인해 인간 정주, 식량, 가축 사료, 펄프, 바이오에너지, 탄소 저장, 생물다양성 등에 필요한 토지를 지속 가능한 방식으로 관리하기가 상당히 어려워질 수 있다(높은 신뢰도). 토지 수요를 제한할 수 있는 완화 방안에는 토지 이용의 지속 가능한 집약화, 생태계 복원과 덜 자원 집약적인 식이습관(less resource-intensive diets)으로의 변화가 필요하다(높은 신뢰도). 따라서 육류의 소비를 줄이고, 채식을 위주로 하는 식습관이 완화에 도움이 된다. 토지에 기반을 둔 완화 이행을 위해서는 지역별로 다양한 사회·경제적, 제도적, 기술적, 재정적, 환경적인 장벽을 극복해야 한다(높은 신뢰도).

현재 실시하고 있는 정책 외에 새로운 기후정책을 포함하지 않는 경로와 비교하면 온난화를 1.5℃로 억제하는 경로에서, 2016~2050년에 에너지 관련 감축을 위한 연평균 추가 투자액은 약 8,300억 달러(2010년 US 달러 기준, 6개 모델에서 1,500억~1조 7,000억 달러) 범위²⁴에 이를 것으로 추정된다. 이러한 투자 규모는 1.5℃ 경로에서 2016부터 2050년까지 총 에너지 공급에 대한 연평균 투자액이 1조 4,600억~3조 5,100억 달러(2010년 US 달러)에 이르고, 에너지 수요 부문에 대한 투자액은 6,400억~9,100억 달러(2010년 US 달러)에 달한다. 2.0℃ 경로 대비 1.5℃ 경로에서는 에너지 관련 총 투자가 약 12%(3~24% 범위) 추가된다. 저탄소 에너지 기술과 에너지 효율성에 대한 연간 투자는 2015년 대비 2050년까지 약 6배(4~10배 범위) 높아진다(중간 신뢰도)(그림 4.2). 1.5℃ 온난화 경로에 도달하려면 저탄소 기술 혁신, 에너지의 집약적 이용이 이루어지거나, 그렇지 않으면 이산화탄소제거 기술이나 바이오에너지와 탄소포집저장(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) 기술의 광범위한 적용이 필요하다(표 4.1). P1 경로에서는 BECCS 기술을 적용하지 않아도 오버슈트 없거나 낮은 상태에서 1.5℃ 온난화로 제한할 수 있다. 하지만, P4 경로에서는 오버슈트 생겨서 1.5℃ 온난화로 제한하기 위해서는 광범위한 BECCS가 필요하다.

²³ 여기에 나타난 토지 사용 변화 전망은 하나의 경로에서 나온 것이며 동시에 상한선은 사용하지 않았음

²⁴ 오버슈트 없거나 제한된 오버슈트 하에서 온난화를 1.5℃로 억제하는 두 가지 경로와 높은 오버슈트를 보이는 네 가지 경로를 포함.



P1: 특히 제3세계에서 생활 수준이 향상되고, 사회, 기업 및 기술혁신으로 2050년까지 에너지 수요가 감소하는 시나리오. 에너지 시스템의 규모 축소로 에너지 공급의 빠른 탈탄소화가 가능해짐. 신규 조림이 유일한 CDR 옵션으로 고려되었으며 화석 연료 CCS나 BECCS는 이용되지 않음

P2: 에너지 집약도, 인간 개발, 경제적 수렴, 국제 협력 및 지속 가능하고 건강한 소비패턴, 저탄소 기술 혁신, BECCS에 대한 제한된 사회적 수용을 고려한 잘 관리된 토지 시스템을 포함하여 지속가능성에 초점을 둔 시나리오

P3: 사회 및 기술적 발전이 과거 패턴을 따르는 중도 시나리오. 배출량 감축은 주로 에너지와 제품이 생산되는 방식의 변화를 통해 이루어지며, 상대적으로 적은 수요 저감을 가정함

P4: 경제성장과 세계화로 인해 수송을 연료와 축산 제품에 대한 높은 수요를 포함해 온실가스 집약적인 생활방식이 확대되는 자원 및 에너지 집약적인 시나리오. 배출량 감축은 주로 기술적인 수단을 통해 달성되며, BECCS의 확대를 통한 CDR의 이용을 강화함

전지구 지표	P1	P2	P3	P4	사분위수 범위
경로구분	없거나 낮은 오버슈트	없거나 낮은 오버슈트	없거나 낮은 오버슈트	높은 오버슈트	없거나 낮은 오버슈트
2030년 CO ₂ 배출량 변화 (2010년 대비 %)	-58	-47	-41	4	(-58,-40)
↳ 2050년	-93	-95	-91	-97	(-107,-94)
2030년 교토-온실가스 배출량 변화 (2010년 대비 %)	-50	-49	-35	-2	(-51,-39)
↳ 2050년	-82	-89	-78	-80	(-93,-81)
2030년 최종 에너지 수요** (2010년 대비 %)	-15	-5	17	39	(-12,7)
↳ 2050년	-32	2	21	44	(-11,22)
2030년 전기에너지 중 재생에너지 비율 (2010년 대비 %)	60	58	48	25	(47,65)
↳ 2050년	77	81	63	70	(69,86)
2030년 석탄으로부터의 1차에너지 비율 (2010년 대비 %)	-78	-61	-75	-59	(-78,-59)
↳ 2050년	-97	-77	-73	-97	(-95,-74)
2030년 석유로부터의 1차에너지 비율 (2010년 대비 %)	-37	-13	-3	86	(-34,3)
↳ 2050년	-87	-50	-81	-32	(-78,-31)
2030년 가스로부터의 1차에너지 비율 (2010년 대비 %)	-25	-20	33	37	(-26,21)
↳ 2050년	-74	-53	21	-48	(-56,6)
2030년 원자력으로부터의 1차에너지 비율 (2010년 대비 %)	59	83	98	106	(44,102)
↳ 2050년	150	98	501	468	(91,190)
2030년 바이오매스로부터의 1차에너지 비율 (2010년 대비 %)	-11	0	36	-1	(29,80)
↳ 2050년	-16	49	121	418	(123,261)
2030년 바이오매스 외 재생에너지로부터 1차에너지 비율	430	470	315	110	(245,436)
↳ 2050년	833	1327	878	1137	(576,1299)
2100년 누적 CCS(GtCO ₂)	0	348	687	1218	(550,1017)
2100년 누적 BECCS(GtCO ₂)	0	151	414	1191	(364,662)
2050년 바이오에너지 재배 면적(백만 km ²)	0.2	0.9	2.8	7.2	(1.5,3.2)
2030년 농업에 의한 CH ₄ 배출량 (2010년 대비 %)	-24	-48	1	14	(-30,-11)
↳ 2050년	-33	-69	-23	2	(-47,-24)
2030년 농업에 의한 N ₂ O 배출량 (2010년 대비 %)	5	-26	15	3	(-21,3)
↳ 2050년	6	-26	0	39	(-26,1)

주: 지표는 본 보고서 제2장. 평가에서 규명된 전지구 추세를 보여주고자 채택됨.
국가 및 부문별 특징은 위에 제시된 전지구 추세와 상당히 다를 수 있음

* 교토-온실가스 배출량은 IPCC SR2 GWP-100에 기반함
** 에너지 수요 변화는 에너지 효율 개선 및 행동 변화44와 관련됨

그림 4.2 1.5°C 온난화와 관련된 4개 모델 경로의 특징. 4개 경로는 다양한 잠재적인 완화 경로를 보여주고, 경제와 인구성장, 평등성과 지속가능성을 포함해 미래의 사회경제발전에 관한 가정뿐 아니라 에너지와 토지이용 전망에 있어 상당한 차이가 있도록 선택됨. 인간활동에 기인한 전지구 CO₂ 순 배출량을 화석연료, 산업, 농공업, 산림과 기타 토지이용(AFOLU, Agriculture, Forestry and Other Land Use), 바이오에너지와 탄소포집저장(BECCS, Bioenergy with Carbon Capture and Storage)으로 세분화하여 제시함. 여기에 제시된 AFOLU 추정값은 국가별로 추정값과 반드시 일치하지는 않음. 이 경로는 완화 전략에 있어 전지구적으로 상대적인 차이를 보이지만 필요량을 의미하는 것이 아님. 비교를 위해 가장 오른편 열은 1.5°C 경로에 대한 4분위수 범위를 보여줌.

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure SPM.3b)

표 4.1 4개 경로별 특성과 설명

유형	특성	설명
P1	오버슈트 없거나 낮음.	특히 저개발국가에서 생활 수준이 향상되고, 사회, 기업, 기술의 혁신으로 2050년까지 에너지 수요가 감소하는 시나리오. 에너지 공급의 빠른 탈탄소화가 가능해짐. 신규조림이 유일한 이산화탄소제거 기술 적용으로 고려되며 화석연료 CCS나 BECCS는 이용되지 않음.
P2	오버슈트 없거나 낮음.	에너지 집약도, 교육, 경제발달, 국제협력과 지속 가능하고, 건강한 소비패턴, 저탄소 기술의 혁신, BECCS에 대한 제한된 사회적 수용을 고려하여 잘 관리된 토지 시스템을 포함하는 지속가능성에 초점을 둔 시나리오
P3	오버슈트 없거나 낮음.	사회와 기술적 발전이 과거 패턴을 따르는 중도 시나리오. 배출량의 감축은 주로 에너지와 제품의 생산방식을 전환하여 이루어지며, 상대적으로 작은 수요 저감을 가정함.
P4	오버슈트 큼.	경제성장과 세계화로 인해 수송을 연료와 축산 제품에 대한 높은 수요를 포함해 온실가스 집약적인 생활 방식이 확대되는 자원과 에너지 집약적인 시나리오. 배출량의 감축은 주로 기술적인 수단을 통해 달성되며, BECCS의 확대를 통한 이산화탄소제거 기술의 이용을 강화함.

3. 탄소포집기술과 순마이너스 배출량

온난화를 1.5℃로 억제하는 모든 경로에서는 이산화탄소제거 기술을 사용하면 21세기에 대략 100~1,000 GtCO₂의 이산화탄소가 흡수될 것으로 전망된다. 이산화탄소제거 기술을 이용하여 잔여 배출총량이 다소 늘어나게 되고, 이는 온도 정점 이후 온난화를 1.5℃로 되돌리기 위해 필요한 순마이너스(net negative) 배출량을 달성하는데 기여할 것이다(높은 신뢰도). 이산화탄소제거 기술을 통한 수백 GtCO₂의 추가 흡수는 무한정으로 실행할 수 있는 것은 아니며 이행과 지속 가능성에 따라 달라진다(높은 신뢰도). BECCS 방법을 제외하더라도 에너지와 토지이용 방식에 따라 단기 배출량을 상당히 감소시키고, 수백 GtCO₂ 배출량을 억제할 수 있다(높은 신뢰도). 현재 존재하거나 개발가능한 이산화탄소제거 기술에는 신규 조림, 재조림, 토지 복원, 토양탄소격리, BECCS, 직접 대기 탄소포집저장(Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS), 해양 알칼리화가 포함된다. 이들은 기술 수준, 잠재량, 비용, 위험, 공동 편익, 상충의 측면에서 차이가 매우 크다(높은 신뢰도). 최근 발표된 일부 경로에만 신규 조림과 BECCS 이외의 다른 이산화탄소제거 기술이 포함되어 있다.

온난화를 1.5℃로 억제하는 경로에서 AFOLU(Agriculture, Forestry, and Other Land Use) 관련 이산화탄소제거 기술은 2030년에 0~5 GtCO₂ yr⁻¹, 2050년에 1~11 GtCO₂ yr⁻¹, 2100년에는 1~5 GtCO₂ yr⁻¹의 이산화탄소를 흡수할 것으로 전망된다. BECCS 확대에 의해 2030년에 0~1 GtCO₂ yr⁻¹, 2050년 0~8 GtCO₂ yr⁻¹, 2100년에는 0~16 GtCO₂ yr⁻¹의 이산화탄소가 흡수될 것으로 전망된다(중간 신뢰도). 21세기 중반까지 이러한 확대는 최대 5 GtCO₂ yr⁻¹의 BECCS 잠재량과 최대 3.6 GtCO₂ yr⁻¹의 신규 조림 잠재 흡수량을 초과한다(중간 신뢰도). 일부 경로는 수요 측면의 조치와 농업, 산림과 기타 토지이용(AFOLU) 관련 이산화탄소제거 기술을 더 많이 활용하여 BECCS의 확대를 지양한다(중간 신뢰도). 여러 부문에서 화석연료를 대체할 수 있는 가능성 때문에 BECCS가 포함되었을 때와 비교하여 포함되지 않았을 때는 바이오에너지의 이용이 더 높아질 수 있다(높은 신뢰도)(그림 4.2).

오버슈트 있는 경로에서 지구 평균 온도 상승 폭을 2100년까지 1.5℃ 미만으로 되돌아가기 위해서는 금세기 후반에 잔여 이산화탄소 배출량을 초과하는 이산화탄소제거 기술의 적용이 필요하며, 오버슈트 클수록 이산화탄소제거 기술로 더 많은 양의 이산화탄소를 흡수해야한다(높은 신뢰도). 따라서, 이산화탄소제거 기술 확대의 속도, 규모, 사회적 수용성에 대한 제약에 따라 오버슈트 이후 온난화를 1.5℃ 미만으로 되돌릴 수 있는 능력이 결정된다. 온도가 정점에 도달한 이후 온도를 낮추기 위한 순마이너스(net negative) 배출량 효과에 대한 탄소 순환과 기후시스템에 대한 이해는 여전히 제한적인 상황이다(높은 신뢰도).

대부분 이산화탄소제거 기술의 적용이 대규모로 확대될 경우 토지, 에너지, 물 또는 영양분에 상당한 영향을 미칠 수

있다(높은 신뢰도). 신규 조림과 바이오에너지는 다른 형태의 토지이용과 경쟁 관계에 있으며, 농업과 식량 시스템, 생물 다양성, 다른 생태계의 기능과 서비스에 심각한 영향을 미칠 수 있다(높은 신뢰도). 이런 상충을 억제하고, 육상, 지하, 해양 저장소에 영구적으로 탄소를 저장하기 위해서는 효과적인 거버넌스가 필요하다(높은 신뢰도). 이산화탄소 제거 기술 이용의 실행과 지속가능성은 대규모의 단일 방안보다는 작은 규모지만 실질적으로 보급되는 포트폴리오를 통해 개선될 수 있다(높은 신뢰도). 자연 생태계 복원과 토양 탄소격리와 같은 일부 AFOLU 관련 이산화탄소 제거 기술의 적용은 생물다양성, 토질, 지역 식량 안보 개선과 같은 공동의 편익을 제공할 수 있다. 이것을 대규모로 확대하기 위해서는 토지 탄소 축적량과 다른 생태계 기능과 서비스를 보존하는 등 토지의 지속 가능한 관리를 가능하게 하는 거버넌스 시스템이 필요하다(중간 신뢰도).

제5장

지속 가능한 발전, 빈곤 퇴치, 불평등 축소의 전지구적 대응 강화

향후 오버슈트를 피하고 대규모 이산화탄소제거(CDR) 기술에 의존하지 않으려면 2030년 훨씬 이전에 전지구 CO₂ 배출량을 감소시켜야 한다(높은 신뢰도). 지속 가능한 발전, 빈곤 퇴치, 불평등 해소를 위한 노력은 온난화를 1.5℃로 억제하는 데 도움이 될 수 있다(높은 신뢰도). 이런 차원에서 1.5℃ 온난화에 따른 위험을 억제한다는 것은 적응과 완화에 대한 투자 증가, 정책 도구, 기술혁신과 행동 변화의 가속화를 통해 달성할 수 있는 시스템의 전환을 의미한다(높은 신뢰도). 국가와 지방정부, 시민사회, 민간부문, 토착민과 지역 공동체의 기후변화 대응 역량 강화는 온난화를 1.5℃로 억제하는 적극적인 행동을 지원할 수 있다(높은 신뢰도). 지속 가능한 발전이라는 측면에서 국제협력은 모든 국가와 사람들에게 1.5℃로 온난화를 억제할 수 있는 환경을 제공할 것이다. 국제협력은 개발도상국과 취약 지역에 매우 중요한 지원 수단이다(높은 신뢰도). 공공과 민간분야, 기관 투자자, 재정 시스템, 시민사회와 연구기관을 모두 포함하는 동반협력(Partnership)은 온난화를 1.5℃로 억제하기 위한 행동과 대응을 지원할 수 있다(매우 높은 신뢰도).

1. 이산화탄소 저감의 이행

파리협정은 당사국이 자발적으로 온실가스의 저감 목표량을 설정하고, 평가하도록 권고하고 있다. 국가별 감축 목표에 근거한 전지구 온실가스 배출량 추정값에 따르면 2030년 전지구 온실가스 배출량²⁵은 52~58 GtCO₂-eq yr⁻¹에 달할 것이다(중간 신뢰도). 2030년 이후에 배출량 감축에 대한 목표와 규모를 확대하는 노력을 하더라도, 국가별 감축 수준을 반영한 경로에서는 온난화를 1.5℃로 억제할 수 없을 확률이 높다(높은 신뢰도). 향후 오버슈트를 피하고 대규모 이산화탄소 제거 기술에 의존하지 않으려면 2030년 훨씬 이전에 전지구 CO₂ 배출량을 감소시켜야 한다(높은 신뢰도).

온난화를 1.5℃로 억제하는 경로들은 2030년까지 온실가스 배출량의 감축을 분명하게 보여준다(높은 신뢰도). 대부분 경로에서 2030년에 전지구 온실가스 배출량이 35 GtCO₂-eq yr⁻¹ 미만으로 감소한다. 이들 경로의 50%에서 배출량은 25~30 GtCO₂-eq yr⁻¹ 범위에 있어, 2010년 대비 40~50% 감소한 수준이다(높은 신뢰도). 2030년까지 현재의 국가별 감축 목표를 반영한 경로는 2100년까지 약 3.0℃의 온난화를 초래하며, 그 이후에도 온난화가 지속된다(중간 신뢰도). 오버슈트가 일어나는 경로들은 영향이 크고, 심각한 문제를 초래하게 된다(높은 신뢰도). 즉, 달성할 수 없는 속도와 규모로 이산화탄소제거 기술을 확대시켜야 할 것이다(중간 신뢰도).

2030년 배출량을 낮출수록, 2030년 이후 오버슈트 없이 또는 제한된 오버슈트 하에서 온난화를 1.5℃로 억제하기 위한 어려움은 줄어든다(높은 신뢰도). 온실가스 배출량의 저감이 지연되면 비용 상승, 탄소를 배출하는 기반시설의 고착(lock-in), 좌초 자산(stranded assets)과 중장기적 미래 대응 방안의 유연성 감소 등 위험이 나타난다(높은 신뢰도). 이는 각기 다른 경제와 기술 발전 단계에 있는 국가 간의 불균등한 분배의 영향을 악화시킬 수도 있다(중간 신뢰도).

25 온실가스 배출량은 IPCC 2차 평가보고서에 소개되었던 100-year GWP 값으로 집계된 것임

2. 빈곤 퇴치와 지속 가능한 발전을 위한 적응 방안

2.0℃ 온난화보다 1.5℃ 온난화에서 기후변화의 영향을 줄일 수 있다(높은 신뢰도). 이는 지속 가능한 발전, 빈곤 퇴치와 불평등 해소를 통한 것으로, 완화와 적응의 시너지가 최대화되고, 상충이 최소화되는 경우이다. 기후변화의 영향과 대응은 사회복지, 경제발달, 평등, 환경보호 등을 포함하는 지속 가능한 발전과 밀접하게 연결되어 있다. 2015년에 채택된 UN의 지속 가능한 발전 목표(SDGs)는 2.0℃ 또는 1.5℃ 온난화와 16개 개발목표(빈곤 퇴치, 불평등 해소, 기후 행동 등) 간의 연계성을 평가하는 기본 틀을 제공할 수 있다(높은 신뢰도). 윤리적인 측면과 형평성을 고려하면, 1.5℃ 이상의 온난화뿐만 아니라 완화와 적응의 역량 차이로 인해 사회 취약층이 겪게 될 불평등한 악영향을 해결할 수 있다(높은 신뢰도). 온난화를 1.5℃로 억제하는 데 필요한 완화와 적응은 이행 가능한 조건(enabling condition)에 따라 달라진다. 이 조건은 『지구온난화 1.5℃ 특별보고서』에서 지구물리학적, 환경-생태적, 기술적, 경제적, 사회-문화적, 제도적 가능성을 총망라하여 평가되었다. 다층적 거버넌스, 제도적 역량, 정책 수단, 기술혁신과 이전, 재정 동원, 행동과 생활양식의 변화와 같은 이행 가능한 조건은 온난화를 1.5℃로 억제하기 위한 완화와 적응 전략의 실행 가능성을 개선할 수 있다(높은 신뢰도).

3. 적응 방안 선정과 편익

이행 가능한 조건과 함께 국가별 상황에 맞는 적응 방안이 신중하게 선별된다면, 상충이 발생할 수는 있으나 1.5℃ 온난화 억제와 지속 가능한 발전, 빈곤 감소를 위한 편익이 발생할 것이다(높은 신뢰도).

자연과 인간계의 취약성을 줄이는 적응 전략은 잘 관리된다면 식량과 물 안보 확보, 재난 위험 감소, 보건 환경 개선, 생태계 서비스 유지, 빈곤과 불평등 감소를 비롯해 지속 가능한 발전과 함께 많은 시너지를 발생시킨다(높은 신뢰도). 사회 복원력과 적응 역량이 향상되면 물리적, 사회적 기반시설의 투자 확대는 핵심적인 이행 가능한 조건이다. 여기에서 발생하는 편익은 온난화 1.5℃에 대한 적응을 비롯하여 대부분 지역에서 발생할 수 있다(높은 신뢰도). 1.5℃ 온난화에 대한 적응은 지속 가능한 발전에 대한 악영향과 함께 상충 또는 부적응을 일으킬 수 있다. 예를 들면, 여러 부문에서 적응 프로젝트가 제대로 설계되지 않거나 실행되지 않아, 온실가스 배출량과 수자원의 사용이 증가하고, 성 불평등과 사회적 불평등이 증가할 수 있으며, 보건 환경이 악화되고 자연 생태계에 교란이 일어날 수 있다(높은 신뢰도). 빈곤과 지속 가능한 발전에 대해 관심을 높이는 적응 전략을 통하여 이러한 상충을 줄일 수 있다(높은 신뢰도).

참여적이고 통합적인 방식으로, 1.5℃로 온난화를 억제하기 위한 완화와 적응 전략의 결합이 이행되면, 도시와 농어촌 지역에 빠르고 체계적인 전환이 이루어 질 수 있다(높은 신뢰도). 이러한 전략들은 경제적이고 지속 가능한 발전으로 조율되고, 국가 정부가 지방정부와 정책 결정자를 지원할 때 가장 효과적일 것이다(중간 신뢰도). 배출량을 저감하는 적응 전략은 대부분의 부문과 시스템 전환에 있어 시너지 효과를 내고 비용을 절감시킬 수 있다. 예로 토지관리가 배출량과 재해위험을 줄이는 방식이나 냉방의 효율성을 높인 저탄소 건물의 설계가 있다. 바이오에너지 생산을 위한 작물과 신규 조림 또는 재조림이 농업 적응에 필요한 토지를 잠식하는 경우처럼, 1.5℃로 온난화를 억제하였을 때 완화와 적응 간의 상충은 식량안보, 생계, 생태계 기능과 서비스를 방해할 수 있다 (높은 신뢰도).

4. 빈곤 퇴치와 지속 가능한 발전을 위한 완화 방안

1.5℃ 온난화 경로에 상응하는 완화 방안은 여러 지속 가능한 발전 목표(SDGs)와 관련하여 다양한 시너지와 상충을 동시에 만든다. 가능한 시너지의 수가 상충되는 수를 넘어서지만, 시너지의 순 영향은 변화의 속도와 규모, 완화 포트

폴리오의 조합, 전환 관리에 따라 좌우될 것이다(높은 신뢰도)(그림 5.1). 온난화 1.5℃ 경로는 지속 가능한 발전 목표(SDGs) 3(건강과 웰빙), 7(모두를 위한 깨끗한 에너지), 11(지속 가능한 도시), 12(지속 가능한 생산과 소비), 14(해양 생태계의 보전)에 대해 특히 통계적으로 유의미한 시너지를 보여준다(매우 높은 신뢰도). 일부 1.5℃ 경로는 신중히 관리되지 않으면 SDGs 1(빈곤 퇴치), 2(기아 종식과 지속 가능한 농업), 6(깨끗한 물과 위생), 7(모두를 위한 깨끗한 에너지)의 분야에서 완화에 따른 잠재적인 상충효과가 나타난다(높은 신뢰도).

낮은 에너지의 수요와 자원 소비, 온실가스 집약도가 낮은 식량 소비를 포함하는 온난화 1.5℃ 경로는 지속 가능한 발전 목표와 가장 뚜렷한 시너지와 가장 적은 상충을 보인다(높은 신뢰도). 이러한 경로는 이산화탄소제거 기술에 대한 의존도를 낮출 것이다. 지속 가능한 발전, 빈곤 퇴치, 불평등 해소는 온난화를 1.5℃로 억제하는 것을 지원할 수 있다(높은 신뢰도). 1.5℃ 경로에서 완화가 지속 가능한 발전에 미치는 순 영향에 대한 정보는 일부 SDGs와 완화 방안에서만 존재한다. 그림 5.1의 완화 잠재량 평가는 미래에는 보다 포괄적이고, 통합된 평가로 발전해야 한다.

제시된 1.5℃와 2.0℃ 온난화 경로는 보통 신규 조림과 바이오에너지의 공급과 같은 대규모 토지 관련 정책변화에 따라 달라지며, 이러한 정책은 제대로 관리되지 않을 경우에 식량 생산을 감소시켜 식량 안보에 대한 우려가 높아질 수 있다(높은 신뢰도). 이산화탄소제거 기술이 SDGs에 미치는 영향은 발전방안의 종류와 목표의 확대 규모에 따라 달라진다(높은 신뢰도). BECCS와 AFOLU와 같은 방안은 제대로 이행되지 않으면 상충을 초래할 것이다. 상황을 고려하여 설계와 이행을 하려면 사람들의 필요, 생물다양성, 기타 지속 가능한 발전의 측면을 고려해야 한다(매우 높은 신뢰도).

1.5℃ 온난화 경로에 상응하는 완화는 수익과 고용 창출을 위해 화석연료에 의존하는 지역에서 지속 가능한 발전을 어렵게 한다(높은 신뢰도). 경제와 에너지 분야의 다양성을 촉진하는 정책이 이와 관련된 과제를 해결할 수 있다(높은 신뢰도). 다양한 부문과 인구 전반에 걸쳐 빈곤층과 취약계층을 보호하는 재분배 정책은 SDGs 가운데 특히 기아, 빈곤, 에너지 접근성에 대한 상충을 해결할 수 있다. 이 상충을 보완하는 정책은 1.5℃ 온난화 경로의 전체 완화 투자 가운데 아주 일부분만 존재한다(높은 신뢰도).

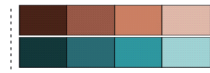
지속 가능한 발전과 빈곤 퇴치의 차원에서 1.5℃ 온난화에 따른 위험을 억제하려면, 적응과 완화에 대한 투자 증가, 정책 도구, 기술혁신과 행동 변화의 가속화를 통해 달성할 수 있는 시스템의 전환이 필요하다(높은 신뢰도). 완화와 적응을 위한 기반시설에 금융을 투자함으로써 추가적인 재원을 제공할 수 있다. 여기에는 기관 투자자, 자산 운용사, 개발은행 또는 투자 은행을 통한 민간 자금 조성뿐 아니라 공공 자금의 공급이 포함될 수 있다. 저배출과 적응에 대한 투자의 위험을 낮추는 정부 정책은 민간 자금의 동원을 장려하고 다른 공공정책의 효과를 향상시킬 수 있다. 여러 연구가 금융 접근성과 자금 동원을 비롯해 많은 저해요인이 있음을 보여준다(높은 신뢰도). 1.5℃ 온난화 달성을 위한 적응에 필요한 재정 규모는 정량화하기 어렵고, 2.0℃ 경우와도 비교하기가 어렵다. 예를 들어, 지식과 기술 격차가 크기 때문에 현재 투자가 부족한 필수 기반시설의 공급과 특정한 기후 복원력 개선을 위한 투자 규모의 산출에 충분한 자료가 포함되기 어렵다. 적응 비용의 추정치는 2.0℃ 온난화 경우보다 1.5℃ 온난화 경우가 낮을 수 있다. 적응 비용은 일반적으로 국가와 지방정부 예산 등 공공 분야 재원의 지원을 받거나 개발도상국의 경우에는 공적원조, 다자간 개발 은행과 UNFCCC 등의 지원을 받는다(중간 신뢰도). 최근에는 NGO와 민간 기금의 규모가 증가하고 있다(중간 신뢰도). 제한된 역량과 적응 금융에 대한 접근성이 낮기 때문에 적응에 필요한 재정 조달은 어려움을 겪는다(중간 신뢰도).

막대의 길이는 연계된 강도를 의미함



색칠된 막대의 전체 길이는 부문별 감축 수단과 SDGs 간 시너지 및 상충의 상대적인 가능성을 의미함

음영은 신뢰도 수준을 의미함



음영은 상충/시너지에 대하여 평가된 가능성의 신뢰도 수준을 의미함

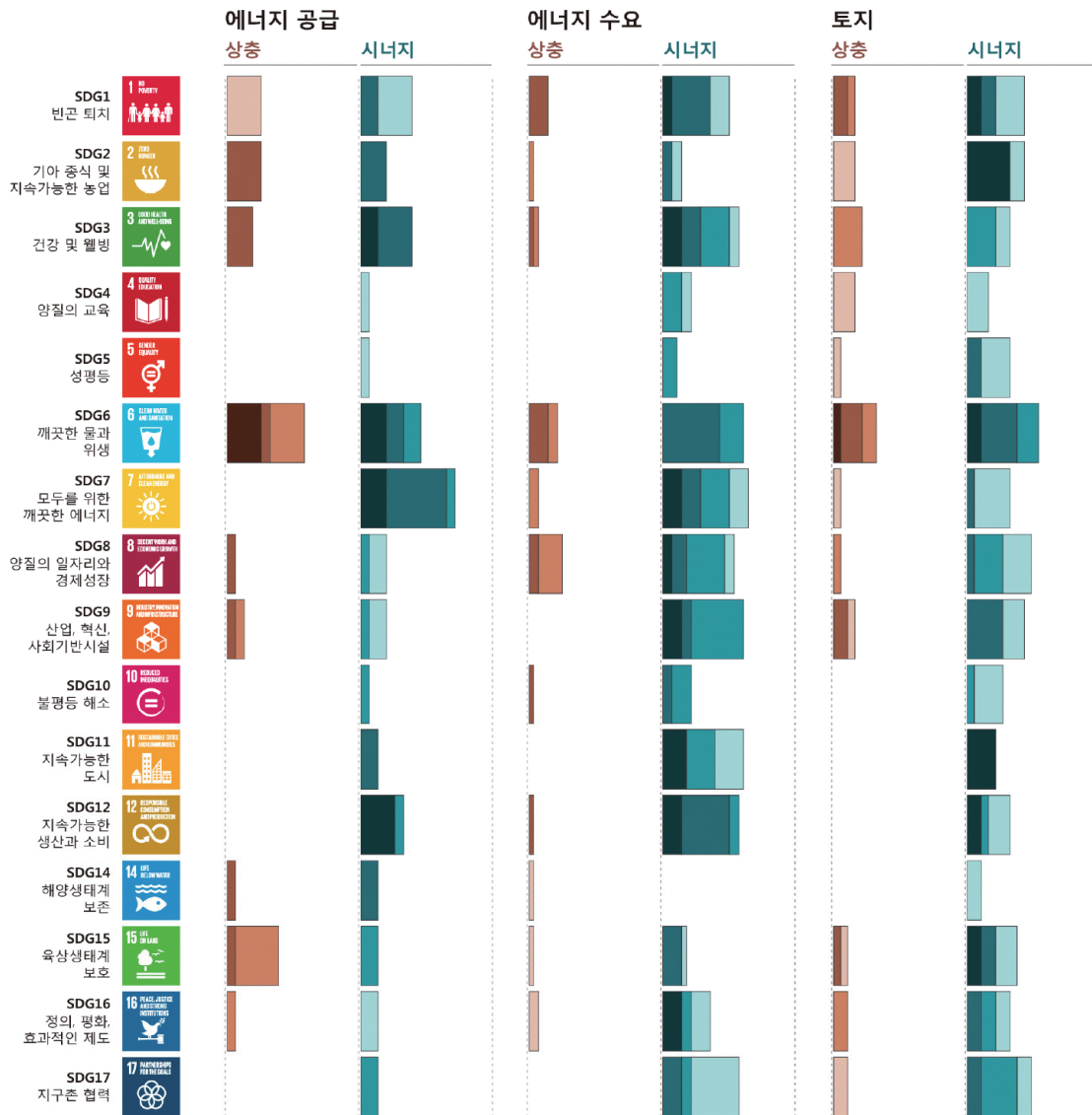


그림 5.1 부문별 기후변화 완화 포트폴리오와 지속 가능한 발전 목표 간의 잠재적인 시너지와 상충. SDGs는 여러 지속 가능한 발전 측면의 평가를 위한 분석틀로 이용되며, 2030년 SDG 기간 이후에도 연장됨. SDG와의 상호작용의 강도 평가 값은 개별 완화 방안에 대한 질적·양적 평가에 근거함. 개별 완화 방안에 대해 SDG와의 연계 강도뿐 아니라 해당 문헌의 신뢰도(녹색과 갈색 음영)가 평가됨. 한 분야 안에서 개별 방안의 긍정적인 연계(시너지)와 부정적인 연계(상충) 강도가 전체 완화 수단 포트폴리오에 대한 부문별 잠재량으로 합계됨. 막대 외부의 (백색) 영역은 상호작용이 없음을 보여주며 불확실성과 간접적 영향을 조사한 문헌이 제한적이어서 신뢰도가 낮음. 연계 강도는 완화 효과만 고려하며, 회피된 영향으로 인한 이익은 포함하지 않음. SDG 13(기후변화 대응)은 SDGs와의 상호작용에서 완화가 고려되기 때문에 제시되지 않음. 막대는 연계의 강도를 의미하며 SDGs에 대한 영향의 강도는 고려되지 않음. 에너지 수요 부문은 교통, 산업과 건물 분야에서 행동 변화, 연료 전환, 효율개선과 산업 부문에서의 탄소 포집 수단 또한 포함함. 에너지 공급 분야에서 평가된 옵션에는 바이오매스, 바이오매스 외의 재생 에너지, 원자력, BECCS, 화석연료·CCS를 포함. 토지 분야 옵션에는 농업과 산림 옵션, 지속 가능한 식이(diets)와 음식물 쓰레기 저감, 토양 격리, 가축과 분뇨 관리, 산림 파괴 저감, 신규조림과 재조림, 완전 표시제(responsible sourcing)가 포함됨.

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure SPM.4)

온난화를 1.5℃로 억제하는 전지구 모델 경로에서는 2016년에서 2035년 사이 에너지 시스템에 필요한 연간 총 투자액이 약 2조 4천억 달러(2010 US 달러)에 달하여 세계 GDP의 약 2.5%를 차지할 것으로 추정된다(중간 신뢰도). 정책 방안들은 전환의 형평성을 확보하는 전략이 필요하다. 그러나 에너지 비용, 감가상각, 국제 경쟁에 미치는 영향을 비롯해 이행과 관련하여 난관이 예상된다. 공동 편익을 극대화할 수 있는 기회를 활용하는 등 전 세계 투자와 자금의 이동, 시장과 비시장에 기반을 둔 다양한 도구를 이용해 재정의 동원을 촉진할 수 있다(높은 신뢰도). 온난화를 1.5℃로 억제하고 여기에 적응하기 위한 시스템 전환에는 새롭고 혁신적인 기술과 실천의 광범위한 채택과 함께 기후 중심의 혁신 강화가 포함된다. 이는 산업과 금융을 포함하여 기술혁신의 역량 향상을 필요로 한다. 국가의 혁신 정책과 국제협력은 완화와 적응 기술을 개발하고, 이를 상업화하여 광범위하게 채택하는데 기여할 수 있다. 혁신 정책은 기술 확산에 인센티브를 제공하는 정책 패키지와 공공부문의 R&D 지원이 결합할 때 더 효과적일 것이다(높은 신뢰도).

지역에 기반을 둔 정보를 포함하여 교육, 정보, 공동체의 접근방식은 온난화를 1.5℃로 억제하고 여기에 적응하기 위한 광범위한 행동 변화를 가속화 할 수 있다. 이러한 접근방식이 다른 정책과 결합하고 특정 행위자와 상황에 대한 동기, 역량, 자원에 부합할 때 더욱 효과적이다(높은 신뢰도). 공공의 수용성은 온난화를 1.5℃로 억제하고 그 결과에 적응하기 위한 정책과 방안의 실행을 가능하게 하거나 방해할 수 있다. 공공의 수용성은 정책 결과에 대한 개인의 평가, 결과의 분배와 결정 절차의 공정성에 대한 인식에 따라 달라진다(높은 신뢰도).

지속 가능한 발전은 온난화를 1.5℃로 억제하는 데 도움이 되는 기본적인 사회와 시스템의 전환과 변화를 지원하고, 이를 이행 가능하게 한다. 이러한 변화는 빈곤 퇴치와 불평등을 해소하기 위한 노력과 함께 완화와 적응을 달성하는 **기후 복원력 있는 개발 경로**의 추구를 돕는다(높은 신뢰도). 사회 정의와 형평성은 온난화를 1.5℃로 억제하는 것을 목적으로 하는 기후 복원력 있는 개발 경로의 핵심 요인이다. 그 이유는 사회 정의와 형평성이 난관과 피할 수 없는 상충을 해결하는 기회를 넓히며, 빈곤층과 소외계층의 상황을 더 악화시키지 않으면서 국가 간, 지역사회 내에서 전략, 비전과 가치를 신중하게 고려할 수 있도록 하기 때문이다(높은 신뢰도). 기후 복원력 있는 개발 경로의 잠재력은 다양한 개발 상황과 시스템의 취약성에 따라 지역과 국가 간/내에서 차이를 보인다(매우 높은 신뢰도). 현재까지 이러한 경로를 따르는 노력은 많지 않았으며(중간 신뢰도), 향상된 노력에는 모든 국가와 민간 활동가들의 시기적절하고 강화된 행동이 포함되어야 한다(높은 신뢰도). 지속 가능한 발전에 상응하는 경로에서는 완화와 적응의 어려움은 감소하고, 완화 비용은 낮아지게 된다. 대다수의 모델 연구 결과에 따르면 국제적 협력의 부족, 불평등과 빈곤 등을 가진 채로 온난화를 1.5℃로 억제할 수 있는 경로를 구축할 수는 없었다(높은 신뢰도).

5. 거버넌스와 국제협력

국가와 지방정부, 시민사회, 민간부문, 토착민과 지역 공동체의 기후변화 대응 역량 강화는 온난화를 1.5℃로 억제하는 적극적인 행동을 지원할 수 있다(높은 신뢰도). 지속 가능한 발전이라는 측면에서 국제협력은 모든 국가와 사람들에게 적극적인 온난화 억제 행동이 가능한 환경을 제공할 수 있다. 국제협력은 개발도상국과 취약 지역에 매우 중요한 지원 수단이다(높은 신뢰도). 공공과 민간분야, 기관 투자자, 재정 시스템, 시민사회와 연구기관을 모두 포함하는 동반협력(Partnership)은 온난화를 1.5℃로 억제하기 위한 행동과 대응을 지원할 수 있다(매우 높은 신뢰도). 산업, 시민사회, 연구기관과 같은 민간영역과 다양한 거버넌스 수준에서 조정된 부문별과 범부문별 정책, 성인지 정책, 재정 지원을 위한 혁신적인 금융 정책, 기술 개발과 이전에 대한 협력을 비롯한 책임 있는 강화된 다층적 거버넌스에 대한 협력은 참여, 투명성, 역량강화, 다양한 행위자 간의 학습을 보장할 수 있다(높은 신뢰도). 특히 독자적인 기후 대응이 어려운 개발도상국과 취약 지역은 국제 협력이 매우 중요한 조력자 역할을 한다(높은 신뢰도). 국제협력을 통해 이런 국가와 지역들은

금융과 기술에 대한 접근성 향상과 국내 역량 강화를 비롯해 1.5°C에 상응하는 기후 대응 활동을 강화할 수 있다. 온난화를 1.5°C로 억제하는 데 있어 각 국가별로 형평성과 기대할 수 있는 효과를 고려하고 다양한 여건과 역량을 반영한 공동의 노력은 기후변화에 대한 전지구적 대응 강화, 지속 가능한 발전 실현과 빈곤 퇴치를 용이하게 할 수 있다(높은 신뢰도).

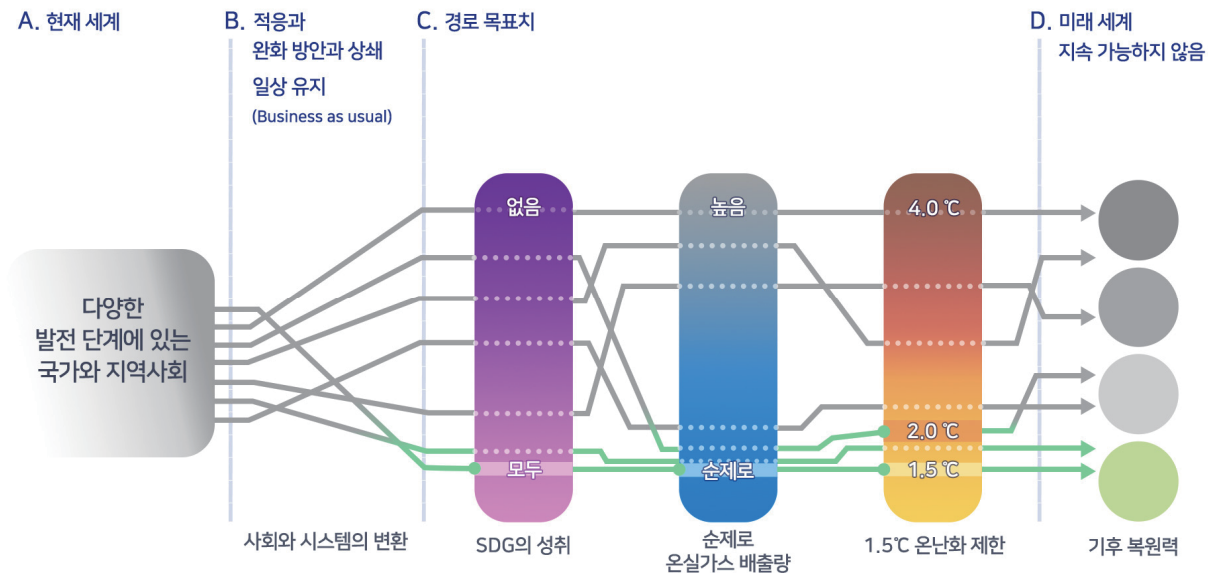


그림 5.2 지속 가능한 발전과 1.5°C 온난화

출처: IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C (Figure 5.1)

「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」해설서

발행일 2020년 12월
발행처 기상청 기후변화감시과
집필진 건국대학교 최영은·송치만·김민기·김유진
주 소 07062 서울특별시 동작구 여의대방로 16길 61

「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」 해설서



기상청

Korea Meteorological Administration

비매품/무료



9 791191 358001

ISBN 979-11-91358-00-1