

발간등록번호

11-1360620-000199-14

한반도 기후변화 전망보고서 2020

SSP1-2.6/SSP5-8.5에 따른
기후변화 전망

책임운영기관

국립기상과학원

National Institute of
Meteorological Sciences





| 목 차 |

| | |
|--------|---|
| 제1장 서론 | 1 |
|--------|---|

| | |
|------------------|---|
| 제2장 동아시아 기후변화 전망 | 3 |
|------------------|---|

| | |
|-------------------------|----|
| 1. 동아시아 지역 기후변화 시나리오 산출 | 4 |
| 2. 기온 | 6 |
| 3. 강수 | 8 |
| 4. 극한기후지수 | 10 |
| 1) 기온 극한기후지수 | 10 |
| 2) 강수 극한기후지수 | 10 |

| | |
|-----------------|----|
| 제3장 한반도 기후변화 전망 | 13 |
|-----------------|----|

| | |
|--------------|----|
| 1. 기온 | 14 |
| 2. 강수 | 16 |
| 3. 극한기후지수 | 18 |
| 1) 기온 극한기후지수 | 18 |
| 2) 강수 극한기후지수 | 20 |

| | |
|------|----|
| 참고문헌 | 22 |
|------|----|

| | |
|-------|----|
| [부 록] | 25 |
|-------|----|

| | |
|-----------------------------------|----|
| 부록 I. 새로운 온실가스 경로, SSP | 26 |
| 부록 II. 지난 시나리오(RCP)와 비교 | 27 |
| 부록 III. 자료 및 분석 방법 | 30 |
| 부록 IV. 동아시아 기후변화 시나리오 예측모델의 성능 평가 | 36 |
| 부록 V. 자료 다운로드 | 38 |



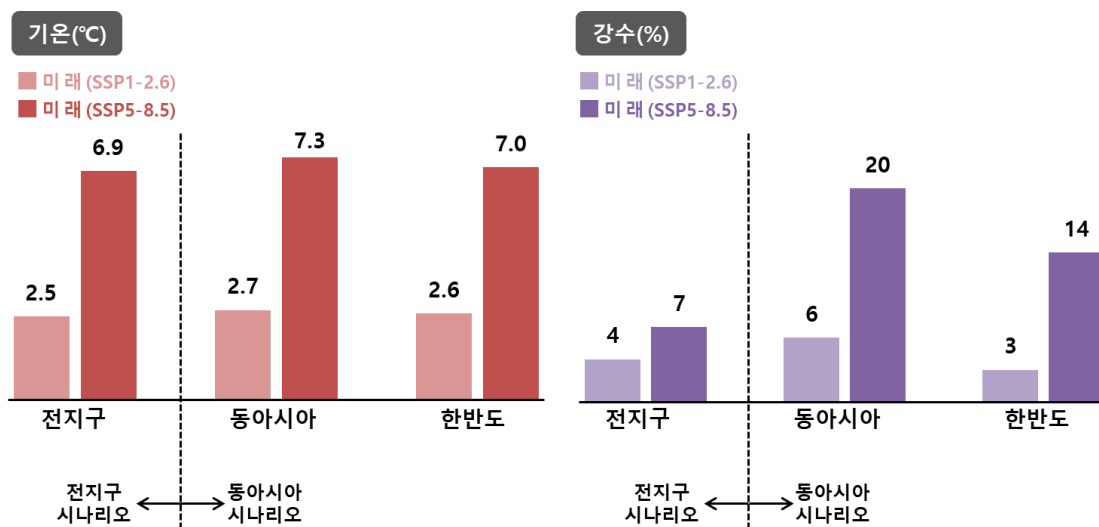
요약

본 보고서는 IPCC 6차평가보고서(AR6)의 최신 온실가스 경로(SSP, Shared Socioeconomic Pathways)에 따라 산출된 신규 동아시아 지역 기후변화 시나리오 2종(SSP1-2.6, SSP5-8.5)에 대해 분석한 결과임.

- 기상청 국립기상과학원은 전지구 기후변화 시나리오(2019년), 동아시아 지역 기후변화 시나리오(2020년), 남한상세 기후변화 시나리오(2021년)를 순차적으로 산출하고 있음.
- 전지구(수평 해상도: 135km) 시나리오는 육지와 해양, 극 지역에 걸쳐 전 지구적인 기후변화를 전망하는 시나리오이며, 국립기상과학원은 이를 활용하여 「전지구 기후변화 전망 보고서」를 발간하였음.
- 동아시아 지역 시나리오는 전지구 시나리오로 표현하기 힘든 작은 규모의 대기현상과 지형효과 등이 반영된 고해상도(수평 해상도: 25km) 시나리오이며, 본 보고서에서는 이를 활용하여 동아시아와 한반도 육상지역의 기후변화를 전망하였음.
- 동아시아 지역 시나리오는 향후 산출될 남한상세(수평 해상도: 1km) 시나리오의 입력 자료로 사용될 것임. 남한상세 시나리오는 남한 지역의 시·군·구 별 상세 미래 기후변화를 전망하여 국가 및 지자체 단위의 기후변화 적응대책 수립을 지원하는데 활용될 것임.
- 기후변화 시나리오의 불확실성을 줄이기 위하여 4종의 지역기후 예측모델을 활용하여 동아시아 지역 시나리오를 산출하였음. 본 보고서는 이를 앙상블 평균하여 동아시아 및 한반도의 미래 기후변화를 전망하였음.

I. 기온과 강수 변화 전망

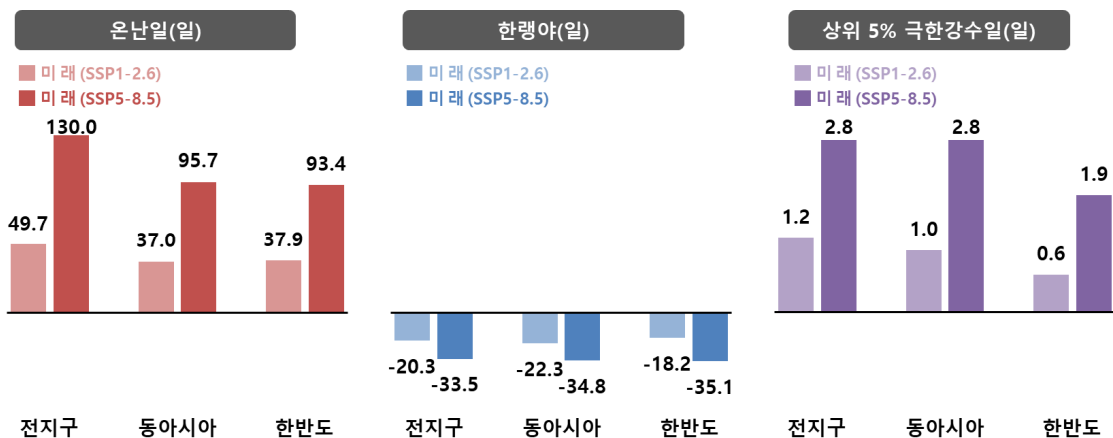
- 동아시아 및 한반도 육상의 미래 기온 상승폭은 전지구 육상의 평균과 비슷하나 미래 강수량은 전지구 평균에 비해 증가폭이 큼.
- 정부가 선언한 2050 탄소중립 시점인 미래 중반기(2041~2060년)의 한반도 연평균기온은 현재(1995~2014년) 대비 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 3.3℃ 상승하는 반면, 온실가스 저감 정책이 실현된 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서는 1.8℃ 상승으로 기후변화가 상당히 억제됨.
- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 경우, 현재 대비 미래 후반기(2081~2100년) 한반도 연평균기온은 7.0℃ 상승하고 평균 강수량은 14% 증가할 것으로 전망됨.
- 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 경우, 현재 대비 미래 후반기(2081~2100년) 한반도 연평균기온은 2.6℃ 상승하고 평균 강수량은 3% 증가할 것으로 전망됨.



[SSP에 따른 현재 대비 미래 후반기의 영역별 연평균기온(℃, 좌), 평균 강수량(%), 우) 변화. 전지구 변화는 전지구 기후변화 전망보고서(국립기상과학원, 2020) 참고]

II. 극한기후 변화 전망

- 동아시아 및 한반도는 전지구 평균과 마찬가지로 미래 극한 고온현상과 극한 강수현상은 증가하고 극한 저온현상은 감소.
- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 경우, 현재 대비 미래 후반기 한반도 온난일은 약 4배로 급증하고 한랭야는 거의 발생하지 않으며, 상위 5% 극한강수일은 약 30% 증가할 것으로 전망됨.
- 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 경우, 현재 대비 미래 후반기 한반도 온난일은 약 2배 증가하고 한랭야는 절반으로 감소하며, 상위 5% 극한강수일은 큰 변화가 없을 것으로 전망됨.



[SSP에 따른 현재 대비 미래 후반기의 영역별 극한기후현상 변화.]

제1장

서론



제1장 서론

- 국제사회는 IPCC를 중심으로 기후변화에 대응하고 있으며, 2018년의 「지구온난화 1.5℃」 특별보고서¹⁾, 2019년의 「기후변화와 토지」 특별보고서²⁾와 「해양 및 빙권」 특별보고서³⁾ 발간을 통해 기후변화로 인한 위험이 심화됨을 강조하고 있음.
- 국립기상과학원은 국제 기후변화 공동 연구에 참여하여 사회·경제학적 요소가 고려된 IPCC의 신규 온실가스 경로(SSP4)를 기반으로 한 새로운 전지구 기후변화 시나리오를 산출하였으며, 이를 바탕으로 전지구의 미래 기후변화 정보를 수록한 「전지구 기후변화 전망 보고서」⁴⁾를 발간하였음.
- 그러나 공간해상도가 수평적으로 100km 이상인 전지구 기후변화 시나리오는 지역에 따른 상세한 기후변화 특성을 분석하기에는 한계가 존재하므로, 고해상도의 지역 단위 기후변화 전망자료의 필요성이 대두되었음.
- 국립기상과학원은 고해상도 시나리오에 대한 사회적 요구에 대응하고 국가 기후변화 적응대책을 지원하기 위하여 학계와 공동으로 신규 온실가스 경로(SSP)에 기반하여 한반도를 포함한 고해상도(25km) 동아시아 지역 기후변화 시나리오를 산출하였음.
- 본 보고서에는 최신의 과학기술과 사회·경제학적 요소가 고려된 새로운 동아시아 시나리오를 활용하여 동아시아 및 한반도 지역에 대한 현재(1995~2014년) 대비 미래(2015~2100년) 기후변화를 전망하고 이에 대한 정보를 수록하였음.

1) IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5° C.

2) IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land.

3) IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

4) SSP(Shared Socioeconomic Pathways): IPCC AR6에서 사용된 온실가스 경로. 상세 사항은 부록I 참조.

5) 국립기상과학원, 2020: 전지구 기후변화 전망보고서(개정판)

제2장

동아시아 기후변화 전망

1. 동아시아 지역 기후변화 시나리오 산출
2. 기온
3. 강수
4. 극한기후지수



제2장 동아시아 기후변화 전망

1. 동아시아 지역 기후변화 시나리오 산출

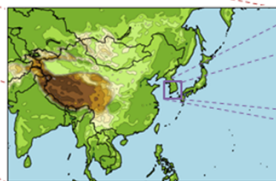
▣ 기후변화 시나리오는 전지구부터 동아시아, 남한상세까지 3단계로 산출됨.

- 전지구 시나리오(135km, 2019년)는 한국과 영국 기상청 간 과학협력의 일환으로 공동 활용 중인 영국기상청의 예측모델 UKESM1(Sellar et al., 2019) 및 국립기상과학원의 K-ACE를 통해 산출됨.
- 동아시아 지역 시나리오(25km, 2020년)는 전지구 시나리오(135km)에서 표현하기 힘든 작은 규모의 대기현상과 상세한 지형 효과 등이 반영된 시나리오임. 본 보고서에는 UKESM1 기반의 전지구 시나리오를 입력 자료로 사용하여 역학적 상세화를 통해 산출된 동아시아 지역 시나리오를 활용하였음.
- 향후 산출될 남한상세 시나리오(1km, 2021년)는 동아시아 지역 시나리오가 입력 자료로 사용될 것이며, 우리나라의 복잡한 지형 조건과 해안선 등을 반영하여 육상 지역에 대하여 산출될 것임. 남한상세 시나리오를 기반으로 우리나라의 행정 구역 별(시·군·구) 상세 기후변화 전망 정보가 산출될 것이며, 이는 국가 및 지자체 단위의 기후변화 적응대책 수립을 지원하는데 활용될 것임.

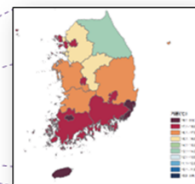
전지구 시나리오
(해상도: 135km)



동아시아 시나리오
(해상도: 25km)



남한상세 시나리오
(해상도: 1km)



- 한-영 공동협력모델(UKESM1)

- HadGEM3-RA 등 4종

- PRISM 등

[그림 1] 기후변화 시나리오 생산체계 (전지구(135km)→동아시아(25km)→남한상세(1km)).



■ 이 보고서에 사용된 동아시아 지역 기후변화 시나리오는 CORDEX⁶⁾ 국제 프로젝트 중 CORDEX-동아시아의 규격에 따라 생산.

- CORDEX는 2단계 프로젝트를 진행 중이고 동아시아를 포함하여 유럽, 북극 등 14개 지역으로 나뉘어 상세 기후변화 연구를 공동수행하고 있으며 시나리오 산출기간, 입력자료, 앙상블 개수, 최종 산출변수, 해상도, 자료 포맷 등을 결정하고 국제 표준 규격을 제시하였음.
- 동아시아 지역 기후변화 시나리오의 과거기후 산출 기간은 1970~2014년, 미래 시나리오 산출 기간은 2015~2100년임.
 - 본 보고서는 미래 기간을 미래 전반기(2021~2040년), 중반기(2041~2060년), 후반기(2081~2100년)로 나누어서 기상 관측자료 기반의 현재(1995~2014년) 기후와 비교하였음.

■ 기후변화 예측모델이 가지는 불확실성을 줄이기 위하여 4종⁷⁾의 지역기후 예측모델을 활용하여 앙상블 자료를 산출하였으며, 이를 평균하여 동아시아 및 한반도 기후변화 전망에 사용하였음.

- 본 보고서에는 기온과 강수량에 대하여 앙상블 평균값을 제시하고 불확실성 범위(앙상블 범주)를 그래프에 표출하였음.

■ 본 보고서와 관련하여 산출된 시나리오는 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)와 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)이며, 향후 2종(SSP2-4.5와 SSP3-7.0)의 시나리오를 추가로 산출할 예정임.

※ 시나리오에 대한 상세 정보는 부록 I 과 II를 참고.

6) CORDEX(COordinated Regional Climate Downscaling Experiment): 상세 지역기후 전망을 위한 국제 공동 연구

7) HadGEM3-RA(국립기상과학원), WRF(부산대학교), CCLM(포항공과대학교), GRIMs(공주대학교)



2. 기온

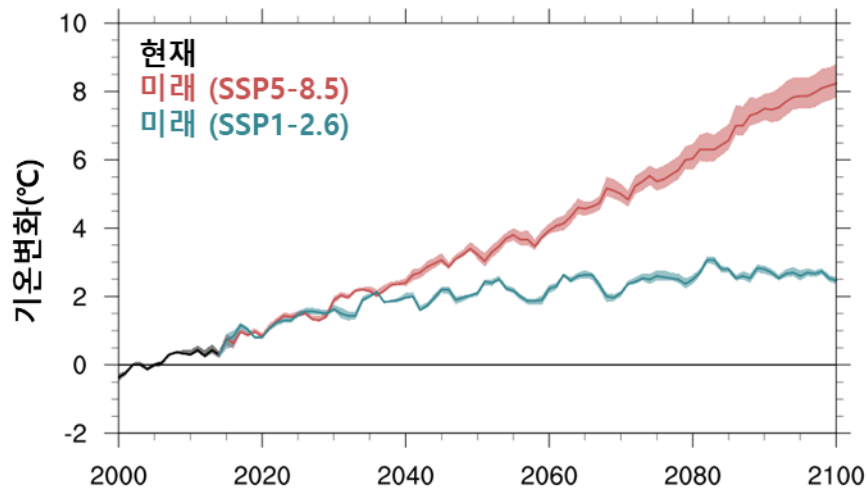
▣ 미래 후반기의 동아시아 연평균기온은 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 +2.7~7.3℃ 상승할 것으로 전망됨.

- 모든 시나리오에서 미래 전반기까지 현재 대비 연평균기온 상승폭이 비슷하지만 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)는 미래 중반기부터 기온이 비교적 급격하게 상승(표 1, 그림 2).
 - SSP5-8.5에서 연평균기온은 현재 대비 미래 전반기에 +1.8℃(±0.1℃) 상승하며, 기온의 상승 추세가 강해진 미래 후반기에는 +7.3℃(±0.4℃) 상승할 것으로 전망됨.
 - SSP1-2.6에서 연평균기온은 현재 대비 미래 전반기에 +1.6℃(±0.04℃) 상승하며, 기온의 상승 추세가 약해진 미래 후반기에는 +2.7℃(±0.1℃) 상승할 것으로 전망되어 기후변화가 상당히 억제됨.
- 동아시아의 지역별 연평균기온 상승폭은 고위도 지역에서 크고 저위도와 해양에 인접한 지역은 상승폭이 비교적 작음(그림 3).
- 동아시아에서 연평균최저기온은 연평균기온과 연평균최고기온에 비해 미래 모든 기간에 걸쳐 기온 상승폭이 더 큼(표 1).

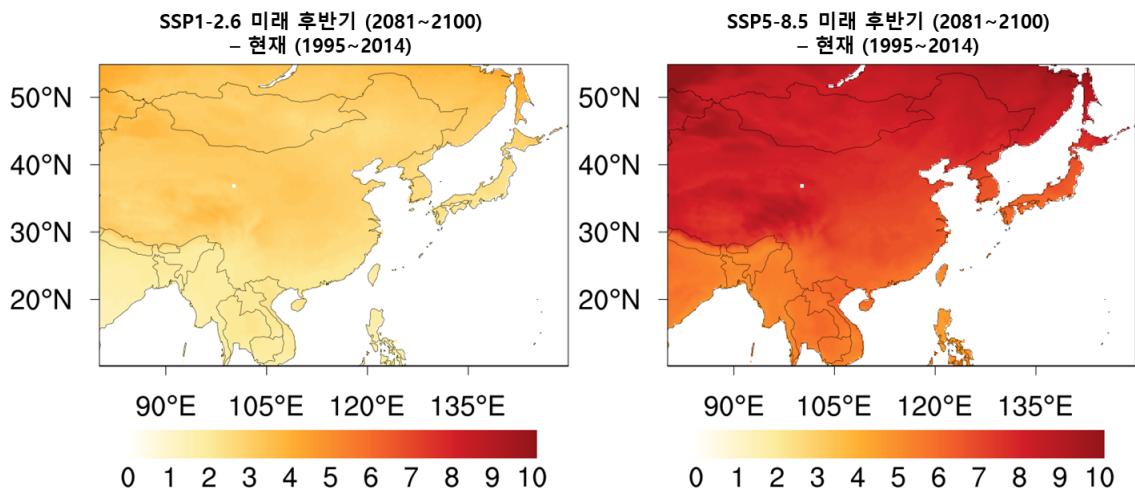
[표 1] 현재 및 미래 기간별 동아시아 연평균·최고·최저기온 변화(℃).

| 기온 | 현재 (1995~2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|-------------|-------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 평균기온 (℃) | 10.2 | 11.8 (+1.6) | 12.0 (+1.8) | 12.2 (+2.0) | 13.4 (+3.2) | 12.9 (+2.7) | 17.5 (+7.3) |
| 최고기온 (℃) | 15.6 | 17.2 (+1.6) | 17.4 (+1.8) | 17.6 (+2.0) | 18.8 (+3.2) | 18.3 (+2.7) | 22.8 (+7.2) |
| 최저기온 (℃) | 4.7 | 6.4 (+1.7) | 6.6 (+1.9) | 6.8 (+2.1) | 8.1 (+3.4) | 7.5 (+2.8) | 12.3 (+7.6) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.



[그림 2] 현재(1995~2014년) 대비 2000~2100년의 동아시아 연평균기온 변화(°C). 실선은 앙상블 평균값을 의미하며, 음영은 4개 모델 앙상블의 범주를 의미함.



[그림 3] 동아시아 지역의 SSP 시나리오에 따른 현재(1995~2014년) 대비 미래 후반기(2081~2100년)의 연평균기온 변화(°C).



3. 강수

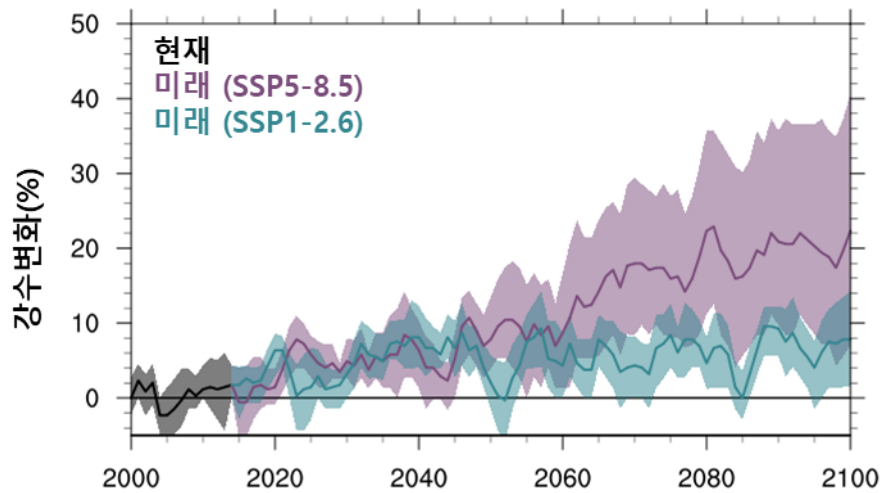
▣ 미래 후반기의 동아시아 평균 강수량은 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 +6~20% 증가할 것으로 전망됨.

- 미래 중반기까지는 모든 시나리오에서 현재 대비 평균 강수량 증가율이 비슷하지만 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)는 미래 중반기 이후에 강수량이 비교적 급격하게 증가(표 2, 그림 4).
 - SSP5-8.5에서 평균 강수량은 현재 대비 미래 중반기에 +7%(±5%) 증가하며, 강수량 증가 추세가 강해진 미래 후반기에 +20%(±12%)로 급증할 것임.
 - SSP1-2.6에서 평균 강수량은 현재 대비 미래 중반기에 +5%(±3%) 증가하며, 강수량 증가 추세가 약해진 미래 후반기에 +6%(±3%) 증가하여 SSP5-8.5에 비해 기후변화가 상당히 억제됨.
- 미래 후반기 동아시아 강수량 변화 경향은 지역에 따라 편차가 큼(그림 5).
 - 미래 한반도 평균 강수량 증가율은 다른 지역에 비해 큰 변화가 보이지 않음.
 - 중국 내륙 등에서 강수량 증가율이 비교적 크며, 해안에 인접한 일본과 필리핀 등은 강수량이 감소할 것으로 전망됨.
- 강수일수는 현재 대비 미래 전반기에 비슷한 감소폭을 보이고 미래 중반기 이후, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 강수일수 감소가 더 커짐(표 2).

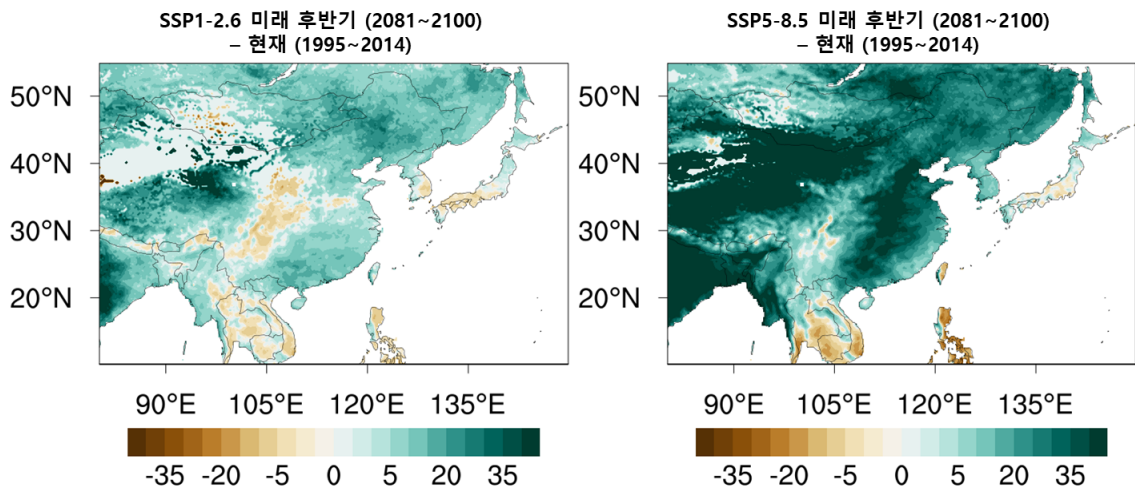
[표 2] 현재 및 미래 기간별 동아시아 평균 강수량(mm)·강수일수(일) 변화.

| 강수 | 현재 (1995~2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|-------------|-------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-------------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 강수량 (mm) | 775.7 | 823.6 (+47.9) | 835.4 (+59.7) | 833.0 (+57.3) | 853.2 (+77.5) | 840.9 (+65.2) | 981.0 (+205.3) |
| 강수일수 (일) | 125.4 | 123.5 (-1.9) | 123.9 (-1.5) | 123.1 (-2.3) | 121.5 (-3.9) | 121.2 (-4.2) | 117.1 (-8.3) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.



[그림 4] 현재(1995~2014년) 대비 2000~2100년의 동아시아 평균 강수량 변화(%). 실선은 앙상블 평균값을 의미하며, 음영은 4개 모델 앙상블의 범주를 의미함.



[그림 5] 동아시아 지역의 SSP 시나리오에 따른 현재(1995~2014년) 대비 미래 후반기(2081~2100년)의 평균 강수량 변화(%).



4. 극한기후지수

1) 기온 극한기후지수

■ 기온 극한기후지수의 증가 추세는 미래 전반기까지는 기후 정책에 상관없이 비슷하나 미래 중반기부터 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)는 급증하고 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)는 큰 변화가 없음(표 3).

- 미래 동아시아에서 극한 고온현상은 증가하며, 극한 저온현상은 감소할 것으로 전망됨.
 - SSP5-8.5에서 온난일/온난야는 미래 전반기에 약 2배가량 증가하나, 미래 후반기에는 약 4배까지 급증할 것이며, 한랭일/한랭야⁸⁾는 미래 전반기에 약 50%가 감소하나 미래 후반기에는 거의 발생하지 않을 것으로 전망됨.
 - 일 최저기온과 관련된 극한지수의 변화 추세가 더 큰 것으로 나타남.
- 일 최고·최저 기온의 연중 최대·최소값은 모두 상승할 것으로 전망됨.
 - 일 최저기온 연 최소값이 가장 큰 상승 폭을 보이며, 일 최고기온 연 최대값이 가장 작은 상승 폭을 보임.

2) 강수 극한기후지수

■ 미래 후반기에 동아시아 극한 강수량 및 극한 강수일수는 증가(표 4).

- 시나리오에 따라 현재 대비 미래 후반기 5일 최대 강수량은 14.4~46.3mm 증가하며, 상위 5%(95퍼센타일) 극한강수일은 현재 대비 미래 후반기에 1~3일(20~60%) 증가가 예상됨. 현재 대비 미래 후반기 변화폭은 SSP5-8.5가 SSP1-2.6에 비해 약 3배가량 더 큼.

8) 온난일, 온난야, 한랭일, 한랭야 등 극한기후지수의 정의는 부록Ⅲ의 표Ⅲ-3 참고.



[표 3] 현재 및 미래 기간별 동아시아 기온 극한기후지수 변화.

| 극한기후지수 | 현재 (1995~2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|--------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 온난일 (일) | 36.5 | 57.8 (+21.3) | 61.0 (+24.5) | 67.5 (+31.0) | 82.5 (+46.0) | 73.5 (+37.0) | 132.2 (+95.7) |
| 온난야 (일) | 36.5 | 42.9 (+30.5) | 71.5 (+35.0) | 79.4 (+42.9) | 97.3 (+60.8) | 87.7 (+51.2) | 147.7 (+111.2) |
| 한랭일 (일) | 36.5 | 23.9 (-12.6) | 20.9 (-15.6) | 22.8 (-13.7) | 14.7 (-21.8) | 16.6 (-19.9) | 3.3 (-33.2) |
| 한랭야 (일) | 36.5 | 21.9 (-14.6) | 18.2 (-18.3) | 20.2 (-16.3) | 12.0 (-24.5) | 14.2 (-22.3) | 1.7 (-34.8) |
| 일 최고기온 연 최대값(℃) | 33.3 | 35.1 (+1.8) | 35.2 (+1.9) | 35.7 (+2.4) | 36.7 (+3.4) | 36.0 (+2.7) | 40.8 (+7.5) |
| 일 최저기온 연 최대값(℃) | 21.6 | 23.3 (+1.7) | 23.5 (+1.9) | 23.9 (+2.3) | 25.1 (+3.5) | 24.4 (+2.8) | 29.1 (+7.5) |
| 일 최고기온 연 최소값(℃) | -7.0 | -5.3 (+1.7) | -4.5 (+2.5) | -4.8 (+2.2) | -3.8 (+3.2) | -4.1 (+2.9) | 0.8 (+7.8) |
| 일 최저기온 연 최소값(℃) | -17.2 | -15.2 (+2.0) | -14.5 (+2.7) | -14.7 (+2.5) | -13.4 (+3.8) | -14.0 (+3.2) | -8.5 (+8.7) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.

[표 4] 현재 및 미래 기간별 동아시아 강수 극한기후지수 변화.

| 극한기후지수 | 현재 (1995~2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 1일 최대 강수량(mm) | 38.6 | 44.2 (+5.6) | 45.2 (+6.6) | 46.1 (+7.5) | 49.7 (+11.1) | 47.1 (+8.5) | 66.4 (+27.8) |
| 5일 최대 강수량(mm) | 82.7 | 92.3 (+9.6) | 93.1 (+10.4) | 94.8 (+12.1) | 101.5 (+18.8) | 97.1 (+14.4) | 129 (+46.3) |
| 99퍼센타일 강수일수(일) | 1.0 | 1.1 (+0.1) | 1.2 (+0.2) | 1.2 (+0.2) | 1.3 (+0.3) | 1.3 (+0.3) | 1.8 (+0.8) |
| 95퍼센타일 강수일수(일) | 5.1 | 5.7 (+0.6) | 5.8 (+0.7) | 5.9 (+0.8) | 6.3 (+1.2) | 6.1 (+1.0) | 7.9 (+2.8) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.

제3장

한반도 기후변화 전망

1. 기온
2. 강수
3. 극한기후지수



제3장 한반도 기후변화 전망

1. 기온

▣ 미래 후반기의 한반도 연평균기온은 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 +2.6~7.0℃ 상승할 것으로 전망됨.

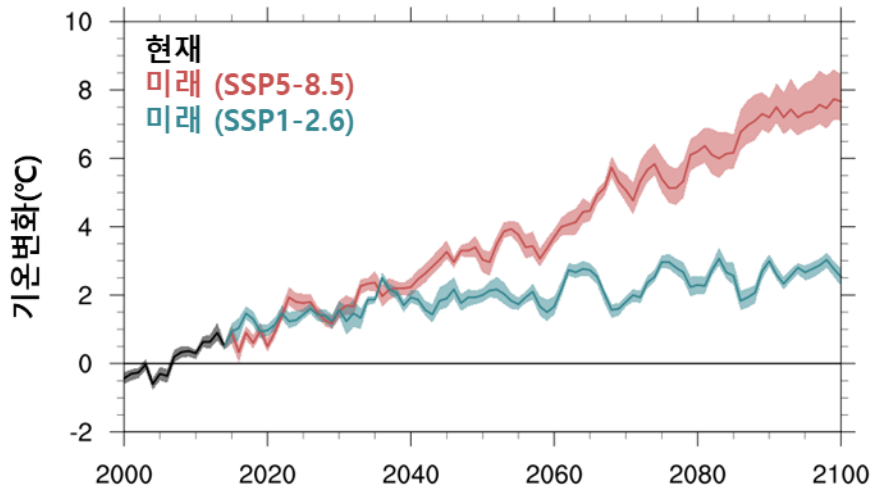
- 모든 시나리오에서 미래 전반기까지 연평균기온 상승폭이 비슷하지만 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)는 미래 중반기부터 급격히 상승(표 5, 그림 6과 7).
 - SSP5-8.5에서 연평균기온은 현재 대비 미래 전반기에 +1.8℃(±0.2℃) 상승하며, 기온 상승 추세가 강해진 미래 후반기에 +7.0℃(±0.6℃) 상승할 것으로 전망됨. 이는 인류에 심각한 기후위기를 초래할 수 있는 수치임(Mark, 2008).
 - SSP1-2.6에서 연평균기온은 현재 대비 미래 전반기에 +1.6℃(±0.1℃) 상승하며, 기온 상승 추세가 약해진 미래 후반기에 +2.6℃(±0.2℃) 상승이 전망되어 SSP5-8.5에 비해 기온변화가 상당히 억제될 것으로 기대됨.
- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 한반도 육지 연평균기온은 전지구 육지 평균(+6.9℃)⁹⁾과 비슷한 상승폭을 보임. 또한 한반도는 동아시아 평균과 전지구 평균에 비해 기온 상승에 대한 모델 앙상블의 범주는 더 큼(그림 6).

[표 5] 현재 및 미래 기간별 한반도 연평균·최고·최저기온 변화(℃).

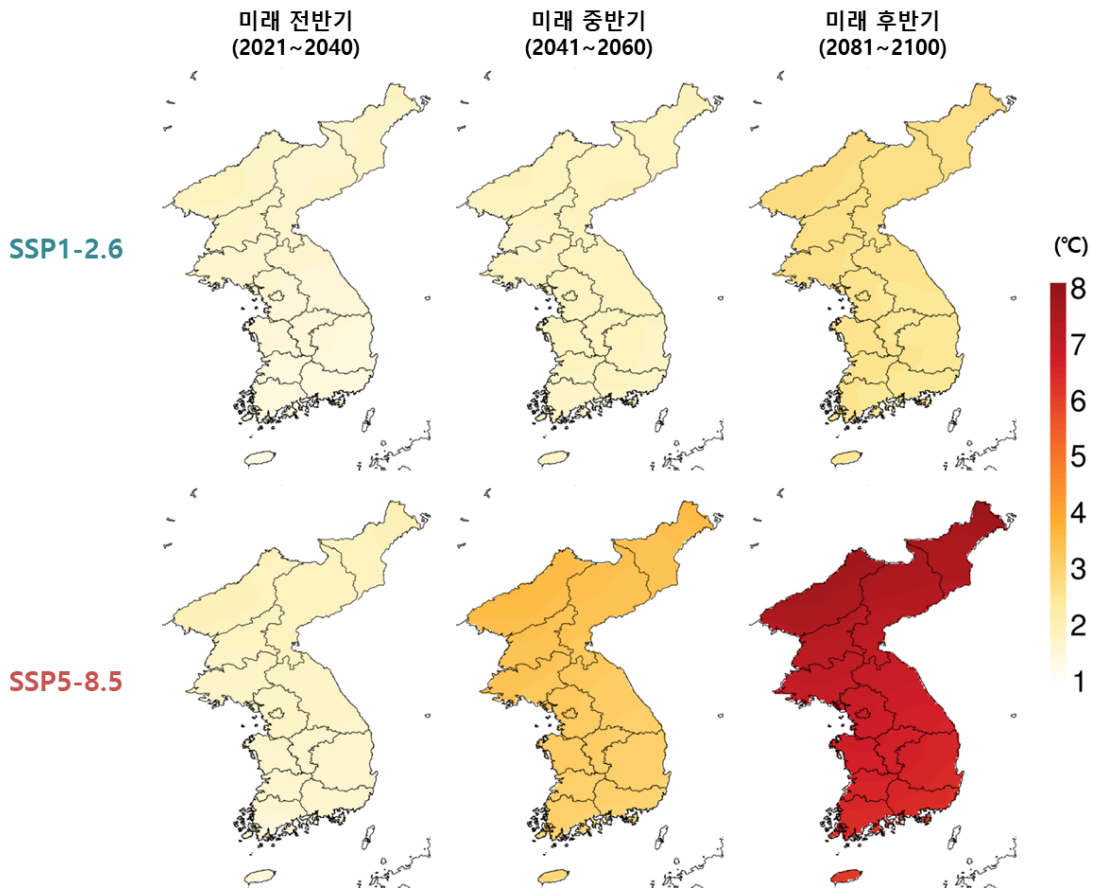
| 기온 | 현재 (1995~2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|-------------|-------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 평균기온 (℃) | 11.2 | 12.8 (+1.6) | 13.0 (+1.8) | 13.0 (+1.8) | 14.5 (+3.3) | 13.8 (+2.6) | 18.2 (+7.0) |
| 최고기온 (℃) | 16.8 | 18.5 (+1.7) | 18.6 (+1.8) | 18.6 (+1.8) | 20.1 (+3.3) | 19.4 (+2.6) | 23.9 (+7.1) |
| 최저기온 (℃) | 6.4 | 8.0 (+1.6) | 8.2 (+1.8) | 8.3 (+1.9) | 9.7 (+3.3) | 9.0 (+2.6) | 13.5 (+7.1) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.

9) 국립기상과학원, 2020: 전지구 기후변화 전망보고서(개정판)



[그림 6] 현재(1995~2014년) 대비 2000~2100년의 한반도 연평균기온 변화(°C). 실선은 앙상블 평균값을 의미하며, 음영은 4개 모델 앙상블의 범주를 의미함.



[그림 7] 한반도의 SSP 시나리오에 따른 현재(1995~2014년) 대비 미래 전반기(2021~2040년), 미래 중반기(2041~2060년), 미래 후반기(2081~2100년)의 연평균기온 변화(°C).



2. 강수

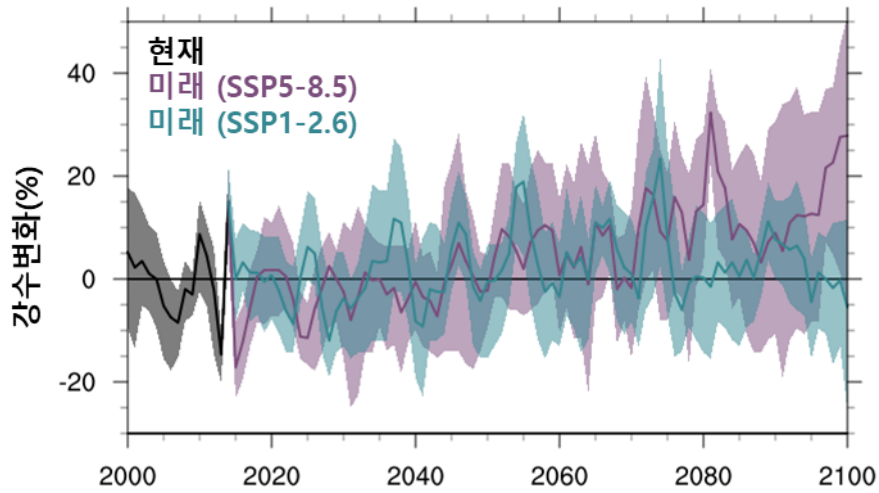
▣ 미래 후반기의 한반도 평균 강수량은 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 +3~14% 증가할 것으로 전망됨.

- 모든 시나리오에서 미래 전반기에 현재 대비 평균 강수량이 다소 감소하고 미래 후반기에 증가할 것으로 전망됨(표 6, 그림 8).
 - SSP5-8.5에서 평균 강수량은 현재 대비 미래 전반기에 3%(±3%) 감소하며, 미래 후반기에 +14%(±12%)로 급증하나 모델 앙상블의 범주가 매우 큼.
 - SSP1-2.6에서 평균 강수량은 현재 대비 미래 전반기에 1%(±7%) 감소하나 모델 앙상블의 범주가 크며, 미래 후반기에 +3%(±5%) 증가하여 SSP5-8.5에 비해 강수량 변화가 상당히 억제될 것으로 전망됨.
- 미래 한반도 강수량 변화 경향은 지역에 따라 편차가 심함(그림 9).
 - 특히, SSP1-2.6의 미래 후반기에 한반도 북쪽은 강수량이 증가하고 남쪽은 감소.
 - SSP5-8.5에서 미래 후반기에 한반도 전역에서 강수량이 증가하며, 북쪽이 비교적 더 많은 증가폭을 보임.
- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 한반도의 육지 강수량 증가율은 동아시아 육지 평균(+20%)보다 작고, 전지구 육지 평균(+7%)보다 큼.

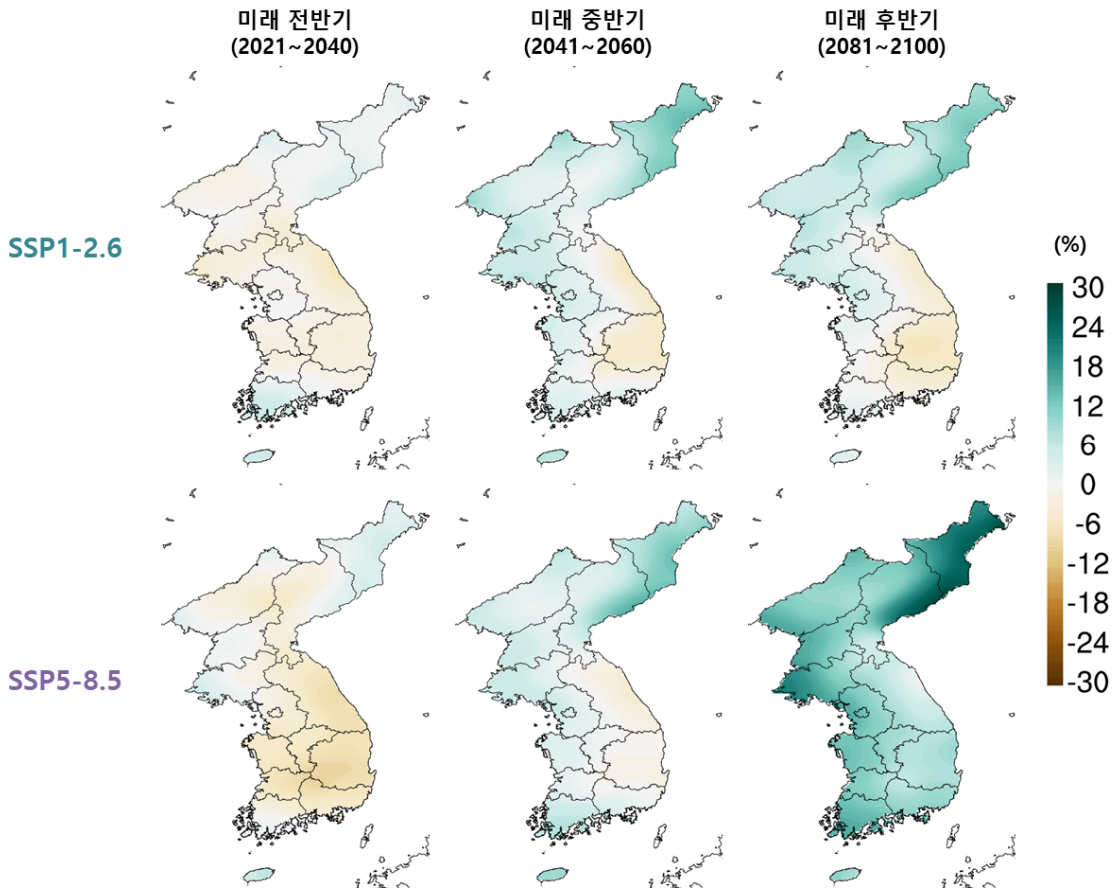
[표 6] 현재 및 미래 기간별 한반도 평균 강수량(mm)·강수일수(일) 변화.

| 강수 | 현재 (1995~2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|-------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 강수량 (mm) | 1195.2 | 1183.4 (-11.8) | 1163.6 (-31.6) | 1231.1 (+35.9) | 1240.7 (+45.5) | 1233.4 (+38.2) | 1370.5 (+175.3) |
| 강수일수 (일) | 123.8 | 121.1 (-2.7) | 121.2 (-2.6) | 122.1 (-1.7) | 120.4 (-3.4) | 120.6 (-3.2) | 116.4 (-7.4) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.



[그림 8] 현재(1995~2014년) 대비 2000~2100년의 한반도 평균 강수량 변화(%). 실선은 앙상블 평균값을 의미하며, 음영은 4개 모델 앙상블의 범주를 의미함.



[그림 9] 한반도의 SSP 시나리오에 따른 현재(1995~2014년) 대비 미래 전반기(2021~2040년), 미래 중반기(2041~2060년), 미래 후반기(2081~2100년)의 평균 강수량 변화(%).

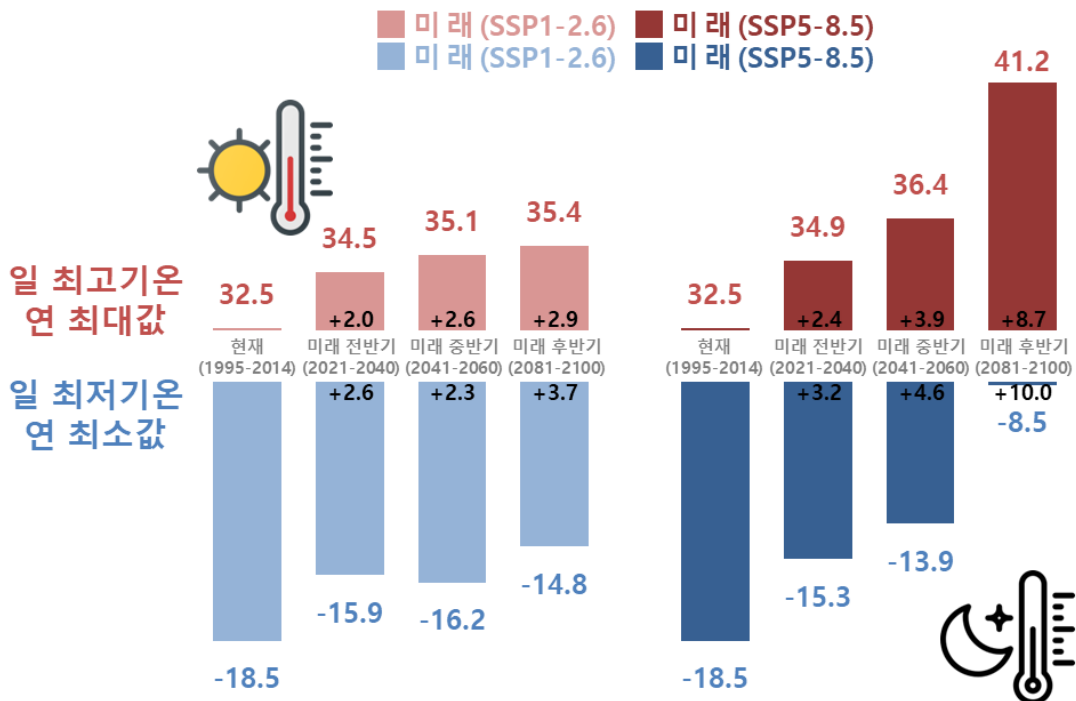


3. 극한기후지수

1) 기온 극한기후지수

■ 미래 한반도에서 극한 고온현상은 현재 대비 증가하고 극한 저온현상은 감소할 것으로 전망되며, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 이러한 경향이 더 뚜렷함(표 7).

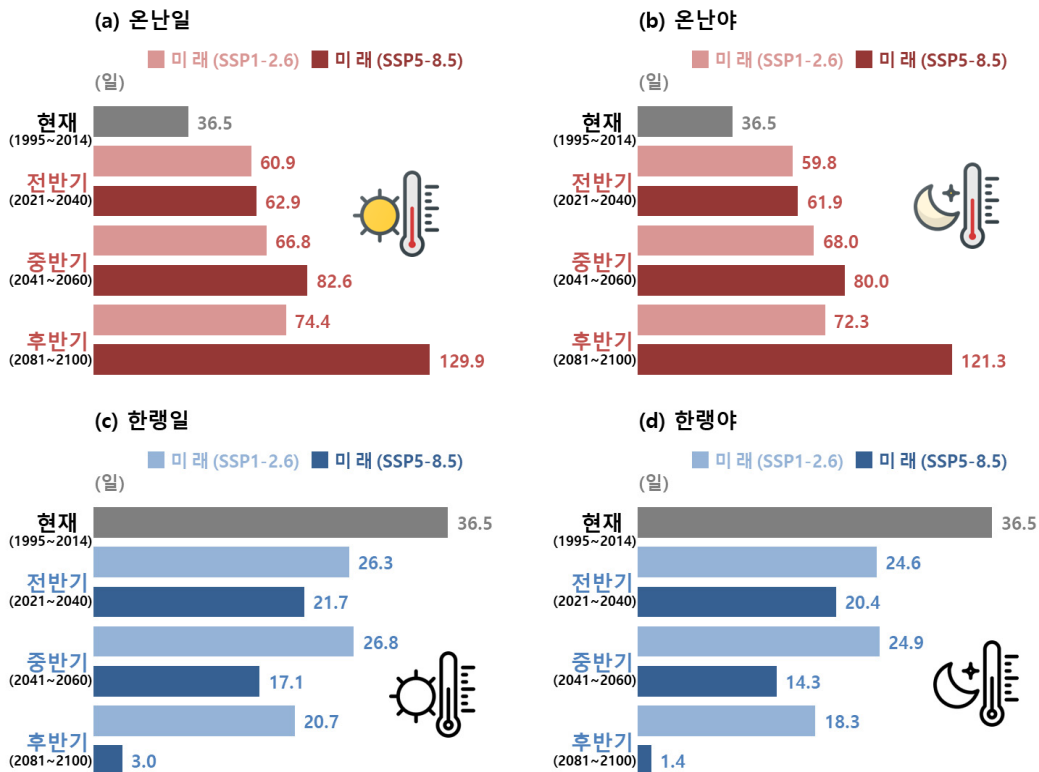
- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 경우, 일 최고기온 연 최대값/일 최저기온 연 최소값은 미래 후반기에 현재 대비 +8.7℃/+10.0℃ 상승(그림10).
- 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 경우, 일 최고기온 연 최대값/일 최저기온 연 최소값은 미래 후반기에 현재 대비 +2.9℃/+3.7℃ 상승으로 SSP5-8.5의 상승폭에 비해 1/3 수준으로 완화됨.



[그림 10] 현재(1995~2014년)와 미래 기간별 한반도의 일 최고기온 연 최대값(상)과 일 최저기온 연 최소값(하) 전망(℃).



- 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 기온 극한기후지수는 미래 후반기까지 꾸준히 증가.
 - SSP5-8.5에서 현재 대비 미래 후반기 온난일은 약 3.6배(36.5일→129.9일), 온난야는 3.3배(36.5일→121.3일)로 급격히 늘어날 것으로 전망됨(그림 11).
 - 한랭일과 한랭야는 미래 후반기에 각각 3일, 1.4일로 거의 발생하지 않을 것임.
- 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 기온 극한기후지수 변화 추세는 미래 전반기 이후 약해짐.
 - SSP1-2.6에서 온난일/온난야의 현재 대비 미래 10년당 변화율은 미래 전반기에 9.4일/9일 증가한 이후, 증가 추세가 약화된 후반기에 10년당 4.4일/4.2일 증가.
 - 한랭일/한랭야의 현재 대비 미래 10년당 변화율은 미래 전반기에 3.9일/4.6일 감소하며, 후반기에 10년당 1.8일/2.1일 감소.
- 한반도는 동아시아에 비해 미래 후반기 기온 관련 극값은 더 크게 변화하지만 온난일 등 극한기후지수는 변화폭이 작거나 비슷함(표 3과 7).



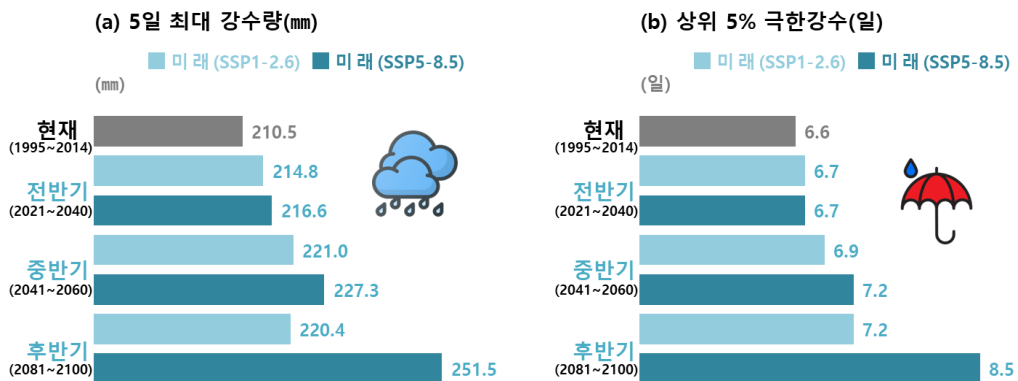
[그림 11] 현재(1995~2014년)와 미래 기간별 한반도 온난일(a)과 온난야(b), 한랭일(c)과 한랭야(d) 발생일(일) 전망. 빨간색은 극한 고온, 파란색은 극한 저온현상을 의미.



2) 강수 극한기후지수

▣ 미래 한반도 극한 강수량 및 극한 강수일수는 증가(표 8, 그림 12).

- 모든 시나리오에서 미래 전반기에 한반도 강수량이 감소하는데도 불구하고 극한 강수는 증가할 것으로 전망됨.
- SSP5-8.5에서 5일 최대강수량은 미래 전반기와 후반기에 각각 6.1mm, 41.0mm 증가함. 상위 5% 극한강수일은 각각 0.1일, 1.9일 증가하여, 미래 후반기에 약 30% 급증할 것으로 전망됨.
- SSP1-2.6에서 5일 최대강수량은 미래 전반기와 후반기에 각각 4.3mm, 9.9mm 증가하고 상위 5% 극한강수일은 각각 0.1일, 0.6일 증가하여, 전반기와 후반기 간에 큰 차이가 없을 것으로 전망됨.
- SSP1-2.6의 경우 미래 극한 고온현상 뿐만 아니라 극한 강수현상의 변화폭도 SSP5-8.5의 30~40% 수준에 그쳐(그림 11과 12), 기후변화 대응 노력이 필요함을 시사함.



[그림 12] 현재(1995~2014년)와 미래 기간별 한반도 5일 최대 강수량(mm, 좌)과 상위 5% 극한 강수일(일, 우) 전망.



[표 7] 현재 및 미래 기간별 한반도 기온 극한기후지수 변화.

| 극한기후지수 | 현재 (1995~ 2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 온난일 (일) | 36.5 | 60.9 (+24.4) | 62.9 (+26.4) | 66.8 (+30.3) | 82.6 (+46.1) | 74.4 (+37.9) | 129.9 (+93.4) |
| 온난야 (일) | 36.5 | 59.8 (+23.3) | 61.9 (+25.4) | 68.0 (+31.5) | 80.0 (+43.5) | 72.3 (+35.8) | 121.3 (+84.8) |
| 한랭일 (일) | 36.5 | 26.3 (-10.2) | 21.7 (-14.8) | 26.8 (-9.7) | 17.1 (-19.4) | 20.7 (-15.8) | 3.0 (-33.5) |
| 한랭야 (일) | 36.5 | 24.6 (-11.9) | 20.4 (-16.1) | 24.9 (-11.6) | 14.3 (-22.2) | 18.3 (-18.2) | 1.4 (-35.1) |
| 일 최고기온 연 최대값(℃) | 32.5 | 34.5 (+2.0) | 34.9 (+2.4) | 35.1 (+2.6) | 36.4 (+3.9) | 35.4 (+2.9) | 41.2 (+8.7) |
| 일 최저기온 연 최대값(℃) | 23.5 | 25.4 (+1.9) | 25.4 (+1.9) | 25.8 (+2.3) | 26.8 (+3.3) | 26.0 (+2.5) | 30.4 (+6.9) |
| 일 최고기온 연 최소값(℃) | -9.6 | -7.5 (+2.1) | -6.6 (+3.0) | -7.5 (+2.1) | -5.4 (+4.2) | -6.3 (+3.3) | 0.0 (+9.6) |
| 일 최저기온 연 최소값(℃) | -18.5 | -15.9 (+2.6) | -15.3 (+3.2) | -16.2 (+2.3) | -13.9 (+4.6) | -14.8 (+3.7) | -8.5 (+10.0) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.

[표 8] 현재 및 미래 기간별 한반도 강수 극한기후지수 변화.

| 극한기후지수 | 현재 (1995~ 2014) | 미래 전반기 (2021~2040) | | 미래 중반기 (2041~2060) | | 미래 후반기 (2081~2100) | |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| | | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 1일 최대 강수량(mm) | 127.96 | 131.0 (+3.4) | 131.8 (+4.2) | 134.6 (+7.0) | 140.3 (+12.7) | 133.9 (+6.3) | 158.6 (+31.0) |
| 5일 최대 강수량(mm) | 210.5 | 214.8 (+4.3) | 216.6 (+6.1) | 221.0 (+10.5) | 227.3 (+16.8) | 220.4 (+9.9) | 251.5 (+41.0) |
| 99퍼센타일 강수일수(일) | 1.4 | 1.5 (+0.1) | 1.5 (+0.1) | 1.5 (+0.1) | 1.7 (+0.3) | 1.6 (+0.2) | 1.9 (+0.5) |
| 95퍼센타일 강수일수(일) | 6.6 | 6.7 (+0.1) | 6.7 (+0.1) | 6.9 (+0.3) | 7.2 (+0.6) | 7.2 (+0.6) | 8.5 (+1.9) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.

참 고 문 헌

- 국립기상과학원, 2020: “IPCC 6차 평가 보고서 대응” 전지구 기후변화 전망보고서, 40pp.
- 기상청, 2018: 한반도 기후변화 전망분석서, 172pp.
- 기상청, 2019: 기후통계지침 2019, 82pp.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Portner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Pean, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.

- Mark, Lynas, 2008: Six Degrees: Our Future on a Hotter Planet, National Geographic Society, 358pp.
- O'Neill, B.C., E. Kriegler, K. Riahi, K.L. Ebi, S. Hallegatte, T.R. Carter, R. Mathur and D.P. van Vuuren, 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122, 387–400, doi:10.1007/s10584-013-0905-2.
- O'Neill, B.C., E. Kriegler, K.L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D.S. Rothman, B.J. van Ruijven, D.P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy and W. Solecki, 2017: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180.
- Sellar, A. A., C.G. Jones, J. Mulcahy, Y. Tang, A. Yool, A. Wiltshire, F.M. O'Connor, M. Stringer, R. Hill, J. Palmieri, S. Woodward, L. de Mora, T. Kuhlbrodt, S. Rumbold, D.I. Kelley, R. Ellis, C.E. Johnson, J. Walton, N.L. Abraham, M.B. Andrews, T. Andrews, A.T. Archibald, S. Berthou, E. Burke, E. Blockley, K. Carslaw, M. Dalvi, J. Edwards, G.A. Folberth, A.J. Hewitt, B. Johnson, A. Jones, C.D. Jones, J. Keeble, S. Liddicoat, O. Morgenstern, R.J. Parker, V. Predoi, E. Robertson, A. Siahann, R.S. Smith, R. Swaminathan, M.T. Woodhouse, G. Zeng, G. and M. Zerroukat, 2019: UKESM1: Description and evaluation of the UK Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, <https://doi.org/10.1029/2019MS001739>.
- WMO, 2019: The global climate in 2015–2019. World Meteorological Organization. 21pp.

부록

부록 I . 새로운 온실가스 경로, SSP

부록 II . 지난 시나리오(RCP)와 비교

부록 III . 자료 및 분석 방법

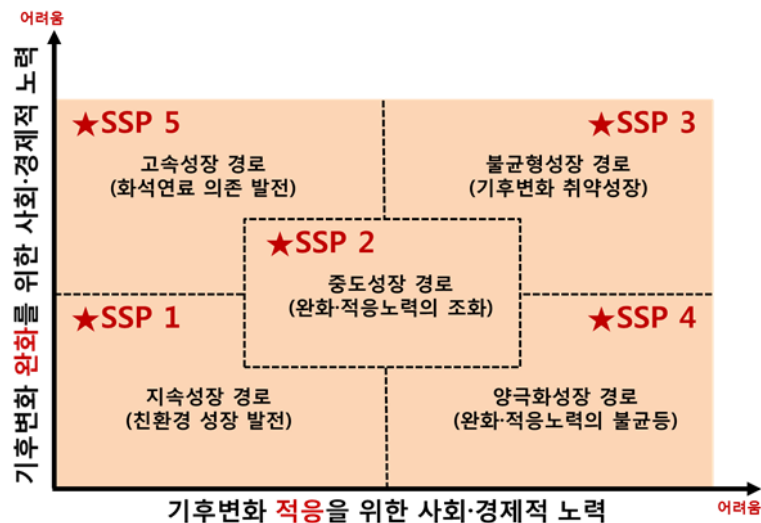
부록 IV . 동아시아 기후변화 시나리오 예측모델의 성능 평가

부록 V . 자료 다운로드



부록 1. 새로운 온실가스 경로, SSP

- 국제사회는 2021년 발간 예정인 IPCC 6차평가보고서(AR6) 작성을 위해 각국의 기후변화 예측모델이 참여하는 “국제 기후변화 시나리오 비교·검증 프로젝트(CMIP6¹⁰⁾)”를 추진 중임.
- 국제표준 기후실험에 관한 국제공동 프로젝트인 CMIP6은 IPCC AR6를 위해 온실가스 감축 수준 및 기후변화 적응대책 수행 여부 등에 따라 미래 사회경제 구조가 어떻게 달라질 것인가를 고려한 새로운 온실가스 경로인 SSP (Shared Socioeconomic Pathways, 공통사회경제경로)를 개발함.
- SSP는 2100년 기준 복사강제력 정도(기존 RCP 개념)와 함께 기후변화 적응과 온실가스 감축 여부에 따라 인구, 경제, 토지이용, 에너지 사용 등 미래의 사회경제 지표의 정량적인 변화 내용을 포함하여 5개 그룹으로 구성됨(O'Neill et al., 2014; 2017) (그림 1-1).



[그림 1-1] 기후변화 적응 및 완화 노력에 따른 공통사회경제경로(SSP)의 구분.

10) CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6): IPCC와 세계기상기구(WMO) 공동 주관의 시나리오 산출 및 비교·검증을 위한 국제표준 기후실험 사업



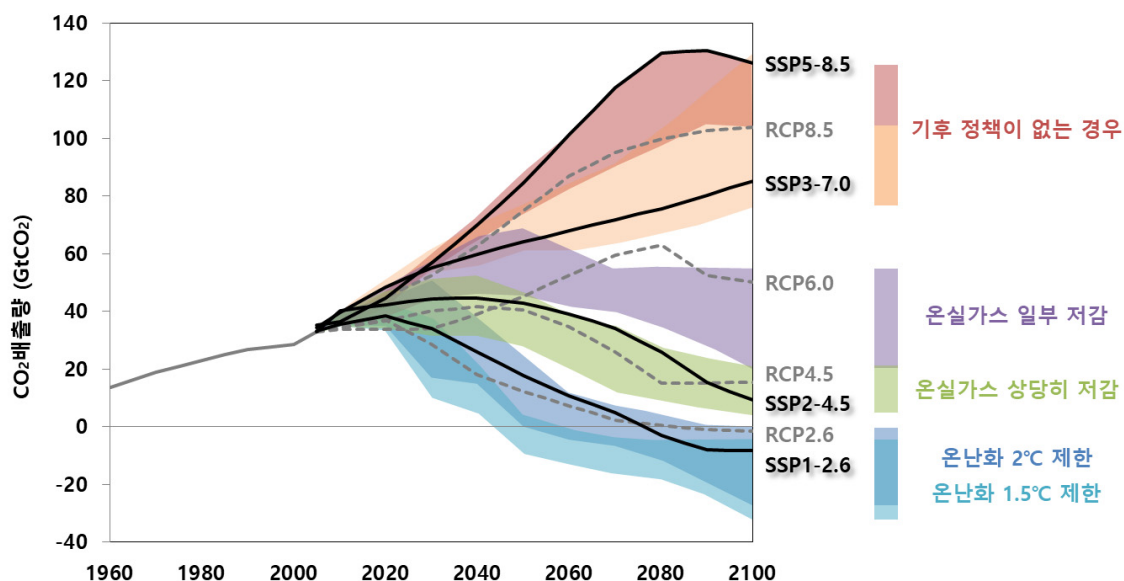
부록 II. 지난 시나리오(RCP)와 비교

■ RCP (Representative Concentration Pathways)시나리오

- RCP 시나리오는 IPCC 5차 평가보고서에 사용된 시나리오로서 2100년 지구의 복사강제력을 기준으로 한 온실가스 대표농도경로 시나리오임.

■ RCP와 SSP 시나리오의 온실가스 배출 경로

- IPCC 6차 평가보고서의 표준 온실가스 경로는 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5의 4종임. 과거 IPCC 5차 평가보고서의 농도 경로는 4개 RCP 시나리오(RCP2.6/4.5/6.0/8.5)를 사용함(그림 II-1, 표 II-1).



[그림 II-1] 과거(1960~2005) 및 미래(2006~2100)에 대한 기후변화 시나리오의 온실가스 배출 경로. 과거(회색 실선), RCP(회색 파선), SSP(검정 실선). [자료 출처: RCP(<http://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb>), SSP(<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>)]



[표 II-1] RCP 시나리오와 SSP 시나리오 비교.

| RCP 시나리오 | | | SSP 시나리오 | |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------------------|---|---|
| ◆ IPCC 5차 평가보고서에 사용된 시나리오 | | | ◆ IPCC 6차 평가보고서에 사용되는 시나리오 | |
| ◆ 2100년 지구의 복사강제력을 기준으로 한 온실가스 시나리오 | | | ◆ RCP 시나리오에 미래 인구수, 토지이용 등 사회경제학적 요소까지 고려한 시나리오 | |
| 종류 | 의미 | CO ₂ 농도 (2100년) | 종류 | 의미 |
| RCP2.6 | 지금부터 즉시 온실가스 감축 수행 | 420ppm | SSP1-2.6 | 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 가정 |
| RCP4.5 | 온실가스 저감정책 상당히 실현 | 540ppm | SSP2-4.5 | 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정 |
| RCP6.0 | 온실가스 저감정책 어느 정도 실현 | 670ppm | SSP3-7.0 | 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정 |
| RCP8.5 | 현재 추세대로 온실가스 배출 | 940ppm | SSP5-8.5 | 산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정 |

※ RCP 시나리오 숫자 의미는?

- 태양복사에너지 중 지구흡수에너지는 약 238W/m²임. RCP 숫자는 온실가스로 인한 추가적인 지구흡수에너지량을 의미함.
- 즉, RCP8.5는 CO₂ 농도가 940ppm이 되면 태양에너지 8.5W/m²가 더 흡수됨을 의미하며, 현재 흡수되는 태양에너지량의 3.6%에 해당됨.

※ SSP 시나리오의 1번째 숫자는 기후변화 적응을 위한 사회·경제적 노력(그림 I-1), 2번째 숫자는 RCP 시나리오와 같이 2100년 기준의 복사강제력을 나타냄.

- SSP1과 SSP5는 사회가 발전되면서 온실가스 감축은 잘하거나(1), 못함(5) 경우
- SSP3과 SSP4는 사회 발전이 더디나 온실가스 감축을 잘하거나(4), 못함(3) 경우
- SSP2는 다른 사회경제경로의 중간단계 정도의 발전 및 감축을 이룬 경우



▣ 새로운 온실가스 경로(SSP)에 따른 21세기 후반기, 한반도 평균기온과 평균 강수량의 변화를 지난 시나리오(RCP) 결과와 비교.

| | RCP 시나리오 | SSP 시나리오 |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| 사용 모델 | 단일 모델 HadGEM3-RA | 4종 모델의 앙상블 평균 HadGEM3-RA / WRF CCLM / GRIMs |
| 입력 자료 (전지구 기후모델) | HadGEM2-AO | UKESM1 |
| 기준 기간 | 현재(1981~2010년), 21세기 후반기(2071~2100년) | |

- RCP 시나리오에 기반 한 한반도 미래 기후변화 전망은 「한반도 기후변화 전망분석서」(기상청, 2018)의 결과를 사용하였음.
 - SSP 시나리오를 사용한 한반도 미래 기후변화 전망도 RCP 시나리오와 동일한 기준 기간을 사용하여 분석하였음.
- 기존 시나리오(RCP)에 비해 인구수, 토지이용 등 사회경제학적 요소까지 반영된 새로운 시나리오(SSP)는 한반도 평균기온과 평균 강수량이 더 큰 폭으로 증가할 것으로 전망됨.

[표 II-2] RCP와 SSP 시나리오에 의한 21세기 후반기의 한반도 기온, 강수량 전망.

| 극한기후지수 | 현재 (1981~2010) | 21세기 후반기 (2071~2100) | | | |
|-------------|-------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | | RCP2.6 | RCP8.5 | SSP1-2.6 | SSP5-8.5 |
| 평균기온 (℃) | 11.0 | 12.8 (+1.8) | 15.7 (+4.7) | 14.0 (+3.0) | 18.0 (+7.0) |
| 최고기온 (℃) | 16.6 | 18.4 (+1.8) | 21.5 (+4.9) | 19.6 (+3.0) | 23.7 (+7.1) |
| 최저기온 (℃) | 6.2 | 8.0 (+1.8) | 10.8 (+4.6) | 9.3 (+3.1) | 13.3 (+7.1) |
| 강수량 (mm) | 1162.2 | 1226.5 (+64.3) | 1314.7 (+152.5) | 1242.2 (+80.0) | 1367.1 (+204.9) |

※ 괄호 안의 숫자는 현재 대비 미래의 변화폭을 의미.



부록 III. 자료 및 분석 방법

III-1. 자료

▣ 기후변화 시나리오

◎ 본 보고서는 IPCC 6차평가보고서(AR6)의 최신 온실가스 경로(SSP, Shared Socioeconomic Pathways)에 따라 산출된 신규 동아시아 시나리오 4종 중 2종(SSP1-2.6, SSP5-8.5)에 대해 분석한 결과임.

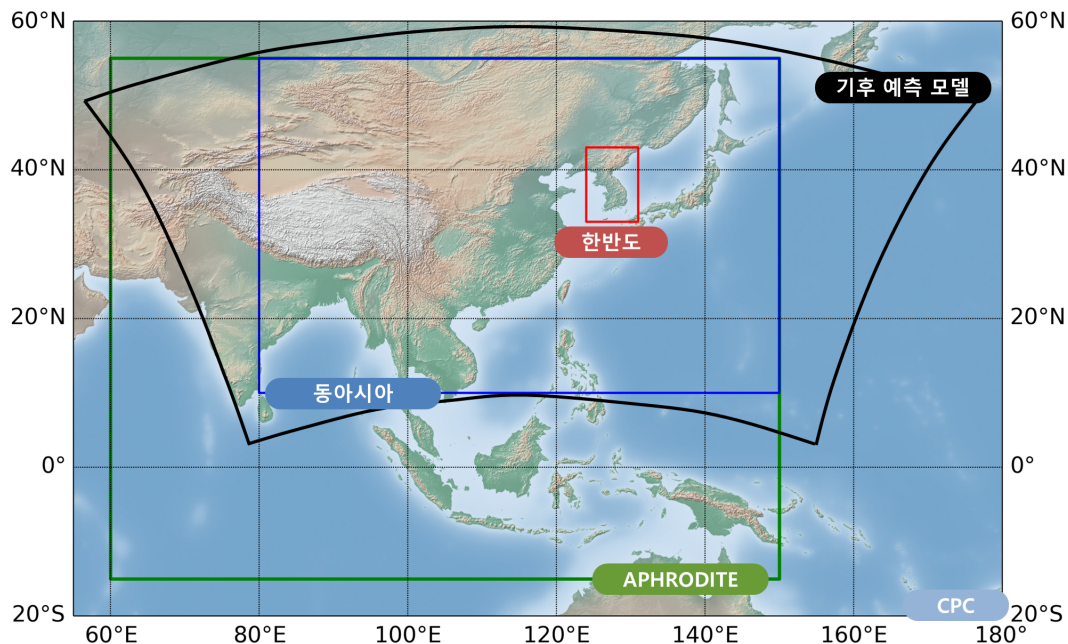
● 동아시아 기후변화 예측모델

- CORDEX-동아시아 2단계 프로젝트에 참여한 4종¹¹⁾ 모델의 앙상블 평균을 사용하였으며 모델의 수평해상도는 25km임.

● 사용기간 및 영역

- 현재 기후는 1995~2014년의 20년 평균을 사용함.
- 미래 기후 전망은 2015~2100년의 결과로서, 본 보고서에서는 미래 전반기(2021~2040), 미래 중반기(2041~2060), 미래 후반기(2081~2100)로 구분하여 기술함.
- 분석 요소 : 일 평균기온, 일 최고기온, 일 최저기온, 일 강수량.
- 분석 영역
 - 동아시아(10~55°N, 80~150°E) : 2종의 재분석 관측 자료와 4종의 기후변화 예측모델의 공통된 육지 영역(그림 III-1의 파란색 영역)
 - 한반도(33~43°N, 124~131°E) : 한반도 육지 영역(그림 III-1의 빨간색 영역)

11) HadGEM3-RA(국립기상과학원), WRF(부산대학교), CCLM(포항공과대학교), GRIMS(공주대학교)



[그림 III-1] 사용 자료의 영역과 분석 영역. 전체영역: CPC, 녹색 영역: APHRODITE, 검정색 영역: 기후 예측 모델, 파란색 영역: 동아시아, 빨간색 영역: 한반도.

■ 관측자료 - 동아시아

- 동아시아의 기후적 특성을 파악하기 위하여 고해상도이면서, 1995~2014년 (20년) 기간을 포함한 격자화된 재분석 관측자료 사용.
 - 기온: CPC¹²⁾ (해상도 0.5°x0.5°) 일 최고기온, 일 최저기온, 일 평균기온
 - 강수량: APHRODITE¹³⁾ (해상도 0.25°x0.25°) 일 강수량

■ 관측자료 - 한반도

- 한반도 현재 기후의 특성을 파악하기 위하여 1995~2014년(20년)의 기후 자료를 보유한 남한과 북한의 지상 관측소 총 72개 지점(남한 45개, 북한 27개) 자료를 사용함(표 III-1과 III-2).
 - 한반도 평균: 72개 관측소의 기후요소를 평균한 값.

12) CPC (Climate Prediction Center): 미국해양대기청(NOAA)의 기후예측센터

13) APHRODITE (Asian Precipitation Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of water resources)



[표 III-1] 한반도 기후분석에 사용된 45개 남한 관측지점 정보.

| 지점번호 | 지점명 | 위도(N) | 경도(E) | 해발고도(m) |
|------|-----|-------|--------|---------|
| 090 | 속초 | 38.25 | 128.56 | 18.1 |
| 101 | 춘천 | 37.90 | 127.74 | 77.7 |
| 105 | 강릉 | 37.75 | 128.89 | 26.0 |
| 108 | 서울 | 37.57 | 126.97 | 85.8 |
| 112 | 인천 | 37.48 | 126.62 | 68.2 |
| 114 | 원주 | 37.34 | 127.95 | 148.6 |
| 119 | 수원 | 37.27 | 126.99 | 34.1 |
| 129 | 서산 | 36.78 | 126.49 | 28.9 |
| 130 | 울진 | 36.99 | 129.41 | 50.0 |
| 131 | 청주 | 36.64 | 127.44 | 57.2 |
| 135 | 추풍령 | 36.22 | 127.99 | 244.7 |
| 138 | 포항 | 36.03 | 129.38 | 2.3 |
| 143 | 대구 | 35.89 | 128.62 | 64.1 |
| 146 | 전주 | 35.82 | 127.15 | 53.4 |
| 152 | 울산 | 35.56 | 129.32 | 34.6 |
| 156 | 광주 | 35.17 | 126.89 | 72.4 |
| 159 | 부산 | 35.10 | 129.03 | 69.6 |
| 165 | 목포 | 34.82 | 126.38 | 38.0 |
| 168 | 여수 | 34.74 | 127.74 | 64.6 |
| 170 | 완도 | 34.40 | 126.70 | 35.2 |
| 201 | 강화 | 37.71 | 126.45 | 47.0 |
| 211 | 인제 | 38.06 | 128.17 | 200.2 |
| 212 | 홍천 | 37.68 | 127.88 | 140.9 |
| 221 | 제천 | 37.16 | 128.19 | 263.6 |
| 226 | 보은 | 36.49 | 127.73 | 175.0 |
| 232 | 천안 | 36.78 | 127.12 | 21.3 |
| 235 | 보령 | 36.33 | 126.56 | 15.5 |
| 236 | 부여 | 36.27 | 126.92 | 11.3 |
| 238 | 금산 | 36.11 | 127.48 | 170.4 |
| 243 | 부안 | 35.73 | 126.72 | 12.0 |
| 245 | 정읍 | 35.56 | 126.87 | 44.6 |
| 260 | 장흥 | 34.69 | 126.92 | 45.0 |
| 261 | 해남 | 34.55 | 126.57 | 13.0 |
| 262 | 고흥 | 34.62 | 127.28 | 53.1 |
| 272 | 영주 | 36.87 | 128.52 | 210.8 |
| 273 | 문경 | 36.63 | 128.15 | 170.6 |
| 277 | 영덕 | 36.53 | 129.41 | 42.1 |
| 278 | 의성 | 36.36 | 128.69 | 81.8 |
| 279 | 구미 | 36.13 | 128.32 | 48.9 |
| 281 | 영천 | 35.98 | 128.95 | 93.6 |
| 284 | 거창 | 35.67 | 127.91 | 221.0 |
| 285 | 합천 | 35.57 | 128.17 | 33.1 |
| 288 | 밀양 | 35.49 | 128.74 | 11.2 |
| 289 | 산청 | 35.41 | 127.88 | 138.1 |
| 295 | 남해 | 34.82 | 127.93 | 45.0 |



[표 III-2] 한반도 기후분석에 사용된 27개 북한 관측지점 정보.

| 지점번호 | 지점명 | 위도(N) | 경도(E) | 해발고도(m) |
|------|-----|-------|--------|---------|
| 003 | 선봉 | 42.32 | 130.40 | 3.0 |
| 005 | 삼지연 | 41.82 | 128.32 | 1386.0 |
| 008 | 청진 | 41.78 | 129.82 | 43.0 |
| 014 | 중강 | 41.78 | 126.88 | 332.0 |
| 016 | 혜산 | 41.40 | 128.17 | 714.0 |
| 020 | 강계 | 40.97 | 126.60 | 306.0 |
| 022 | 풍산 | 40.82 | 128.15 | 1206.0 |
| 025 | 김책 | 40.67 | 129.20 | 19.0 |
| 028 | 수봉 | 40.45 | 124.93 | 83.0 |
| 031 | 장진 | 40.37 | 127.25 | 1081.0 |
| 035 | 신의주 | 40.10 | 124.38 | 7.0 |
| 037 | 구성 | 39.98 | 125.25 | 99.0 |
| 039 | 희천 | 40.17 | 126.25 | 155.0 |
| 041 | 함흥 | 39.93 | 127.55 | 38.0 |
| 046 | 신포 | 40.03 | 128.18 | 19.0 |
| 050 | 안주 | 39.62 | 125.65 | 27.0 |
| 052 | 양덕 | 39.17 | 126.83 | 279.0 |
| 055 | 원산 | 39.18 | 127.43 | 36.0 |
| 058 | 평양 | 39.03 | 125.78 | 38.0 |
| 060 | 남포 | 38.72 | 125.37 | 47.0 |
| 061 | 장전 | 38.73 | 128.18 | 35.0 |
| 065 | 사리원 | 38.52 | 125.77 | 52.0 |
| 067 | 신계 | 38.50 | 126.53 | 100.0 |
| 068 | 용연 | 38.20 | 124.88 | 5.0 |
| 069 | 해주 | 38.03 | 125.70 | 81.0 |
| 070 | 개성 | 37.97 | 126.57 | 70.0 |
| 075 | 평강 | 38.40 | 127.30 | 371.0 |



III-2. 분석 방법

▣ 기후 통계 산출 방법

- 각 기후요소의 기후값 산출을 위한 통계 분석은 기상청 「기후통계지침」(기상청, 2019)에 기초하였음.
- 극한기후지수는 세계기상기구의 ETCCDI¹⁴⁾ 기후변화 지수에 기반 한 「전지구 기후변화 전망보고서」(국립기상과학원, 2020) 기준을 사용하였음(표 III-3).
- 동아시아 현재 기후는 재분석 관측자료(CPC와 APHRODITE)의 20년(1995~2014년) 평균 기후값으로 정의하며, 한반도 현재 기후는 남·북한 72개 관측소의 20년(1995~2014년) 평균값으로 정의함.
- 동아시아 및 한반도 평균은 각 격자 및 관측소 별로 기후요소(기온, 강수량, 극한기후지수 등)를 산출 후, 영역 평균한 값으로 정의함.

▣ 미래 기후변화 전망자료 산출 방법

- 미래변화는 모델 전망값(전반기, 중반기, 후반기의 각 20년간 기후값)으로부터 모델의 현재 기후값(1995~2014)을 뺀, 모델 편차값(anomaly)으로 정의 함.
- 시나리오의 절대적인 전망값을 제공하는 경우에는 모델 편차값에 관측 기후값을 더하여 제시함. 강수량 그래프(그림 4, 5, 8, 9)의 경우에 모델 현재 기후값 대비 미래 기후값의 백분율을 계산하여 편차비(%)로 제시함.
- 미래 기후변화의 경향성은 미래 각 기간과 현재 관측 기후값의 차이를 10년당 변화 값으로 환산함.

$$\begin{aligned} \text{모델 편차값} &= \text{모델 전망값} - \text{모델 기후값} \\ \text{모델 편차비} &= \{(\text{모델 전망값} - \text{모델 기후값}) / \text{모델 기후값}\} \times 100 \% \end{aligned}$$

※ 강수 편차비와 10년당 변화 경향은 한반도 기후변화 전망분석서」(기상청, 2018)의 기준 사용.

14) ETCCDI (CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices)



[표 III-3] 극한기후지수의 정의 (WMO ETCCDI 기후변화지수 기반).

| 분 석 요 소 | 설 명 | 단 위 |
|------------------------------------|--|-----|
| 온난일 | 일 최고기온이 기준기간의 90퍼센타일(상위 10%)을 초과한 날의 연중 일수 | 일 |
| 온난야 | 일 최저기온이 기준기간의 90퍼센타일(상위 10%)을 초과한 날의 연중 일수 | 일 |
| 한랭일 | 일 최고기온이 기준기간의 10퍼센타일(하위 10%) 미만인 날의 연중 일수 | 일 |
| 한랭야 | 일 최저기온이 기준기간의 10퍼센타일(하위 10%) 미만인 날의 연중 일수 | 일 |
| 일 최고기온 연 최대값 | 일 최고기온의 연중(1월1일 ~ 12월31일) 최대값 | ℃ |
| 일 최고기온 연 최소값 | 일 최고기온의 연중(1월1일 ~ 12월31일) 최소값 | ℃ |
| 일 최저기온 연 최소값 | 일 최저기온의 연중(1월1일 ~ 12월31일) 최소값 | ℃ |
| 일 최저기온 연 최대값 | 일 최저기온의 연중(1월1일 ~ 12월31일) 최대값 | ℃ |
| 1일 최대 강수량 | 연속된 24시간(0~24시) 동안 기록된 최대 강수량 | mm |
| 5일 최대 강수량 | 연속된 5일 동안 기록된 최대 강수량 | mm |
| 99퍼센타일 강수일수 (상위 1% 극한강수일) | 일 강수량이 기준기간의 99퍼센타일(상위 1%)보다 많은 날의 연중 일수 | 일 |
| 95퍼센타일 강수일수 (상위 5% 극한강수일) | 일 강수량이 기준기간의 95퍼센타일(상위 5%)보다 많은 날의 연중 일수 | 일 |

※ 기준기간: 현재기간(1995~2014년)



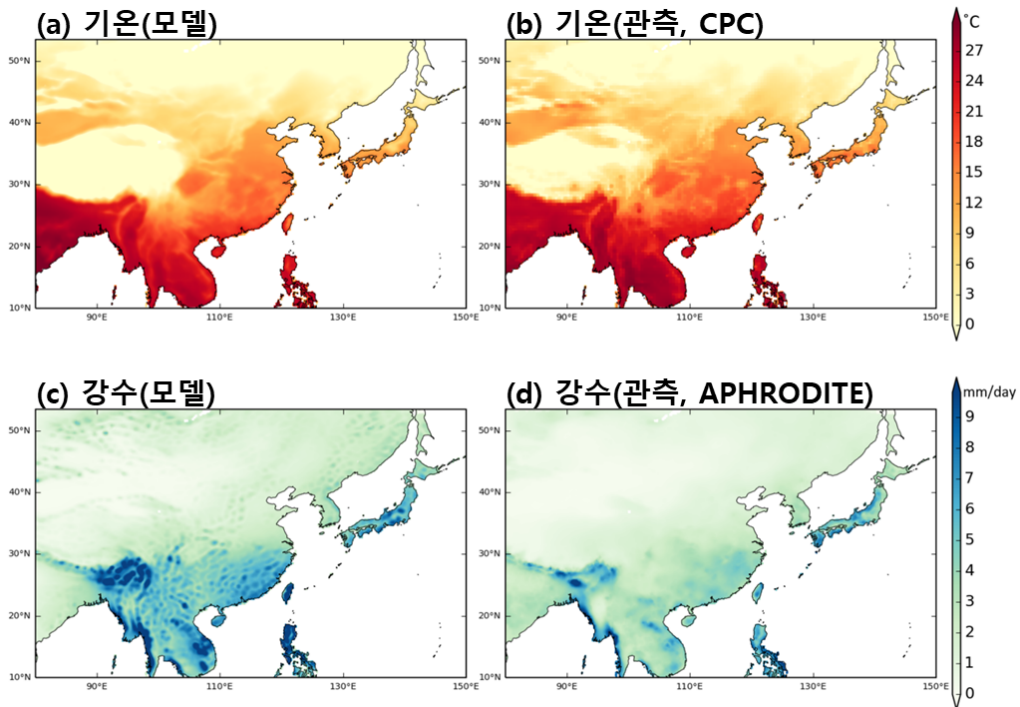
부록 IV. 동아시아 기후변화 예측모델의 성능 평가

▣ 예측모델의 기후모의 특성을 이해하기 위해 금번에 산출한 과거기후 (1995~2014년) 모의 자료를 관측자료와 비교함.

- 과거기후 모의자료는 4종의 지역기후 예측모델 앙상블 평균을 사용함.
- 모델 성능평가를 위한 관측 자료는 기온은 CPC (해상도 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)자료, 강수는 APHRODITE (해상도 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)자료를 사용함.

▣ 모델의 동아시아 기온과 강수량은 관측과 분포가 유사함(그림 IV-1).

- 동아시아에서 모델은 관측의 기온과 강수량의 공간 분포를 전반적으로 유사하게 모의하며, 기온은 대체로 과소 모의하고 강수량은 30°N 이남 지역에서 과대 모의함.

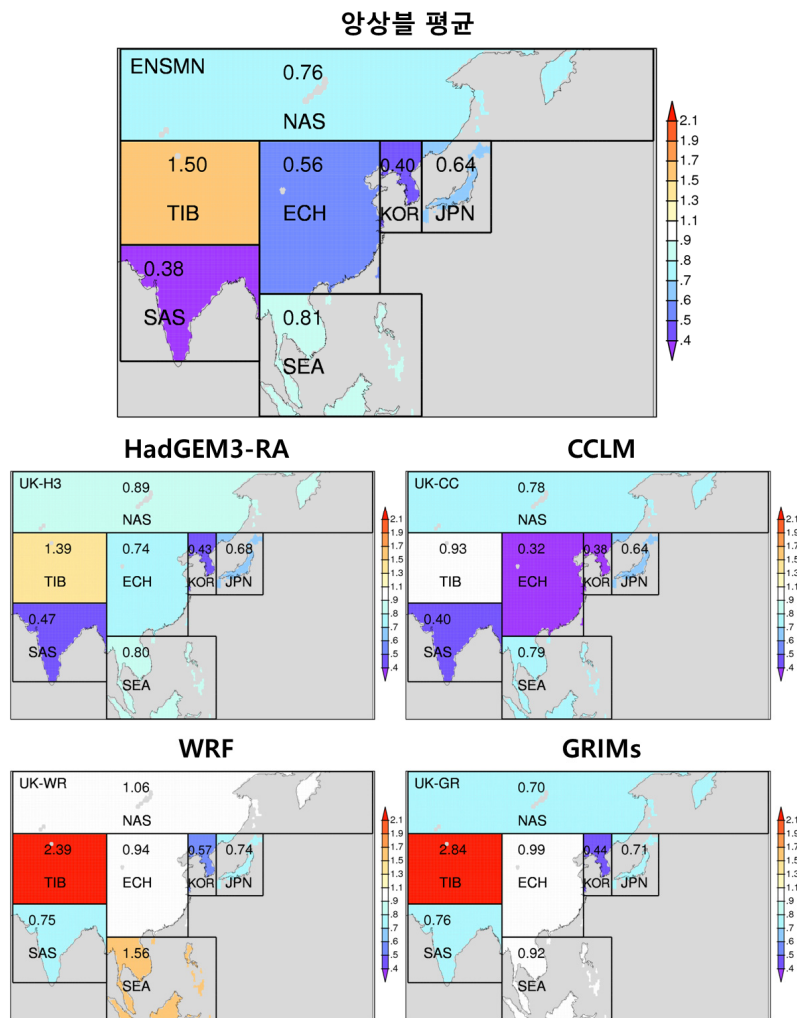


[그림 IV-1] 1995~2014년 동안 평균된 동아시아 영역의 기온(상)과 강수량(하)의 공간분포. 앙상블 평균된 기후모델의 분포(좌), 관측자료의 분포(우).



▣ 개별 기후예측 모델과 앙상블 평균의 모의 성능을 지역별로 비교함.

- 그림 IV-2에서 파란색 영역은 모의결과가 관측 자료와 유사하고 성능이 높음을 의미함.
- 앙상블 평균의 성능이 전반적으로 높으며, 4종 모델 중 국립기상과학원의 HadGEM3-RA의 성능이 비교적 높은 편에 속함.
- 모든 모델은 한반도를 포함한 극동아시아의 기온과 강수를 잘 모의함.



[그림 IV-2] 1995~2014년 동안 지역기후모델의 기온, 강수에 대해 관측 자료와 비교하여 모의 성능을 평가한 그림. 지역별로 파란색이 나타날수록 모델의 모의성능이 관측 자료와 유사함을 의미.



부록 V. 자료 다운로드

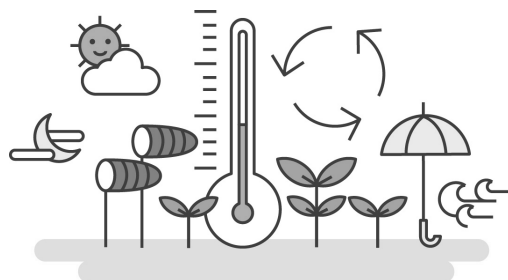
▣ 신규 동아시아 기후변화 시나리오 자료는 2020년 말부터 다음의 방법으로 단계적으로 제공되고 있음.

- 기상청 기후정보포털 (<http://www.climate.go.kr>)
 - 간단한 신청정보 입력 및 이메일 인증 후 자료 다운로드

| | |
|------|--|
| 종류 | 동아시아 과거기후 및 미래 시나리오(SSP1-2.6, SSP5-8.5) |
| 형식 | NetCDF (국제표준규격) |
| 기간 | 과거기후(1979~2014년), 미래기후(2015~2100년) |
| 제공요소 | 변 수: 평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량, 상대습도, 풍속 해상도: (시간) 월평균 및 일평균 (공간) 약 25km 해상도(0.25°×0.25°)의 501×241개 격자 (직각좌표계) |
| 비고 | 양상불 자료의 평균값으로 제공. 자료 기간 검색과 이미지 표출 지원 |

- CORDEX ESGF노드 (<https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/>)
 - 로그인 계정 생성 후 자료 다운로드

| | |
|------|--|
| 종류 | 동아시아 과거기후 및 미래 시나리오(SSP1-2.6, SSP5-8.5) |
| 형식 | NetCDF (국제표준규격) |
| 기간 | 과거기후(1979~2014년), 미래기후(2015~2100년) |
| 제공요소 | 변 수: 기온, 강수, 복사, 비습 등 대기·지면자료 약 40여 종 해상도: (시간) 3시간, 일평균, 월평균 ※변수에 따라 시간해상도가 다름 (공간) 25km 해상도의 374×229개 격자 (rotated coordinates) |
| 비고 | 개별 양상불 멤버별 자료 제공. |



한반도 기후변화 전망보고서 2020

- SSP1-2.6/SSP5-8.5에 따른 기후변화 전망 -

발행일 2020년 12월

발행처 국립기상과학원 미래기반연구부

작 성 김도현, 김연희, 김진욱, 김태준,
문혜진, 변영화, 변재영 (가나다 순)

국립기상과학원

63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

<http://www.nims.go.kr>

한반도 기후변화 전망보고서 2020

