

관측 자료와 RCP8.5 시나리오를 이용한 우리나라 극한기온의 월별 변화

김진욱[†] · 권원태 · 변영화

국립기상과학원 기후연구과

Monthly Changes in Temperature Extremes over South Korea Based on Observations and RCP8.5 Scenario

Kim, Jin-Uk[†], Kwon, Won-Tae and Byun, Young-Hwa

Climate Research Division, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration

ABSTRACT

In this study, we have investigated monthly changes in temperature extremes in South Korea for the past (1921~2010) and the future (2011~2100). We used seven stations' (Gangneung, Seoul, Incheon, Daegu, Jeonju, Busan, Mokpo) data from KMA (Korea Meteorological Administration) for the past. For the future we used the closest grid point values to observations from the RCP8.5 scenario of 1 km resolution. The Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)'s climate extreme indices were employed to quantify the characteristics of temperature extremes change. Temperature extreme indices in summer have increased while those in winter have decreased in the past. The extreme indices are expected to change more rapidly in the future than in the past. The number of frost days (FD) is projected to decrease in the future, and the occurrence period will be shortened by two months at the end of the 21st century (2071~2100) compared to the present (1981~2010). The number of hot days (HD) is projected to increase in the future, and the occurrence period is projected to lengthen by two months at the end of the 21st century compared to the present. The annual highest temperature and its fluctuation is expected to increase. Accordingly, the heat damage is also expected to increase. The result of this study can be used as an information on damage prevention measures due to temperature extreme events.

key Words : Climate Change, Extreme Index, ETCCDI, RCP8.5 Scenario, Heat Wave

1. 서 론

세계적으로 산업화가 시작된 이후 과도한 CO₂ 배출로 인하여 지구온난화와 기후변화가 진행되고 있다. 기후변화에 따른 이상기후현상에 의해 2011년 10월에 미국에서는 폭설로 12명이 사망하고, 330만 가구에 전기 공급이 중단되었으며, 2013년 태풍 하이옌의 영향으로 필리핀에서는 8천여 명의 인명피해가 발생하는 등 전 세계적으로 인명 및 재산피해가 발생하고 있다.

우리나라에서도 기후변화에 의해 수자원, 생태계, 산림, 농업, 산업, 에너지 등 다양한 영역에 걸쳐서 피해가 발생하고 있다(NIER, 2014). Kim *et al.*(2009)은 지난 40년(1968~2007)

간 우리나라 해수면 상승률은 2.16±1.71 mm/yr로 세계 평균인 1.8±0.5 mm/yr보다 높다고 밝혔고, Koo *et al.*(2001)에 따르면 지구온난화는 연안습지에 피해를 유발한다. Shim *et al.*(2008)은 기온상승에 의해 농작물에 피해를 주는 아열대성 병해충이 출현한다고 밝혔으며, Park *et al.*(2010)은 폭염이 노인층의 심박 수와 호흡양상, 근 기능에 미치는 영향을 분석하였다. 이처럼 기후변화가 사회 전반적으로 영향을 미치는 것이 명백한 상황에서 미래 기후변화에 대응하기 위해 극한기후의 변화를 정량적으로 분석하려는 노력이 계속되고 있다.

국립기상과학원에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서(the 5th Assessment Report: AR5)에서 채택된 온실가스배출 시나리오 RCP(Representative

[†] Corresponding author : E-mail: jukim86@korea.kr

Received May 8, 2015 / Revised June 8, 2015 / Accepted June 22, 2015

Concentration Pathway)를 기반으로 전 지구 및 지역기후변화 시나리오를 개발하였으며(NIMR, 2011), 이를 바탕으로 미래 극한기후변화에 대한 연구가 진행되고 있다. KMA(2012)에서는 RCP8.5 시나리오에서 21세기 후반에 남한의 폭염일수는 현재보다 약 4배 증가할 것이라고 전망했으며, JDI(2013)에서는 RCP8.5시나리오 상에서 21세기 후반 제주시의 여름일수는 현재보다 65.3일 증가하고, 서리일수는 23.1일 감소할 것으로 전망했다. 이러한 연구는 국외에서도 진행되고 있는데, Kharin *et al.*(2013)은 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 앙상블 모델 결과로 전 세계의 극한기후변화를 분석하여, RCP8.5 시나리오에서 현재에 비해 21세기말에 연 최고 기온과 연 최저기온이 각각 5.4°C, 6.2°C 상승하고, 연중 일 최대강수량은 30% 증가할 것으로 전망했다. Chen and Sun(2014)은 중국의 평균기온이 현재에 비해 1°C, 2°C, 3°C 상승한 시기의 미래 극한기온 및 강수지수 분석을 통해 극한 고온현상이 증가하고, 극한 저온현상은 감소하며, 호우가 중국 대부분의 지역에서 증가할 것으로 전망했다.

이처럼 국내·외에서 극한기후현상의 연간 발생빈도 변화에 대한 연구가 이루어져왔다. 그러나 Kim *et al.*(2012c)에서 밝힌 동해에 의한 농업작물의 피해나, Park *et al.*(2010)에서 주장한 폭염에 의한 노인층 근 기능 저하 등의 문제는 연간 발생 빈도 분석으로는 대응하기 어려운 부분이 있다. 이러한 피해들은 특정기간에 집중적으로 발생하기 때문에, 피해가 예상되는 시기를 예측하여 효율적으로 대응해야 한다. 따라서 계절이나 월별로 상세한 시간 규모의 분석을 통해 극한기후현상의 시작과 종료 시기 예측이 필요하다. 이 연구는 기후변화에 의해 나타나는 사회·경제적 피해에 대응하기 위하여 극한기후현상이 집중적으로 발생하는 시기와 기간, 발생 빈도를 파악하는 것을 목적으로 하며, 이를 위해 극한기후현상을 월별로 상세하게 분석하였다. 기상청 장기 관측 자료와 남한 상세 기후변화 시나리오를 사용하여 과거와 미래를 비교하였고, 정량적인 기후변화 분석을 위해 ETCCDI(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)의 기온관련 극한기후지수(폭염일수, 열대야일수, 여름일수, 서리일수, 결빙일수)를 사용하였다. 각 극한기후지수의 시작·종료 시기 및 월별 발생빈도의 변화와 지역별 특성을 분석하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 관측자료

이 연구에서 사용한 관측 자료는 기상청의 일 최고기온, 일 최저기온이며, 총 분석기간은 과거 90년(1921~2010)이다. 전

체 분석지점은 1921년 이전부터 관측 자료를 보유한 7개이다 (Table 1). 분석기간 중 한국전쟁이 일어난 1950년부터 1953년까지의 자료는 일부 지점에서 관측이 수행되지 않았기 때문에 분석에서 제외하였다.

2.2 기후변화 시나리오

미래 기후변화를 분석하기 위해 1 km 해상도의 남한 상세 기후변화 시나리오(Kim *et al.*, 2012a)의 일 최고·최저기온을 사용하였으며, 기간은 90년(2011~2100)이다. 관측 자료와 기후변화를 비교하기 위해서 7개의 관측지점과 가장 가까운 위치에 있는 격자의 자료를 사용하였다. 이 연구에서는 AR5의 온실가스배출 시나리오 중 온실가스 감축 노력 없이 현재 추세대로 온실가스가 배출되어 미래 기후변화가 가장 클 것으로 전망되는 RCP8.5 시나리오를 사용하였다. RCP8.5는 복사강제력이 지속적으로 증가하여 2100년에 8.5 Wm⁻² 이상이 되며, CO₂ 농도는 940 ppm 이상이 되는 시나리오이다. IPCC(2013)에서는 RCP8.5의 경우, 전 지구 평균기온이 1986~2005년 대비 2081~2100년에 3.7(2.6~4.8)°C 상승할 것으로 전망했다.

1 km 해상도의 남한 상세 기후변화 시나리오는 크게 두 단계의 과정을 거쳐서 생산된다. 첫 번째는 약 135 km 해상도의 전 지구 기후변화 시나리오를 역학적 규모 축소 방법을 사용하여 12.5 km 해상도의 한반도 지역에 대한 시나리오를 생산하는 과정이며, 두 번째는 12.5 km 해상도의 시나리오를 통계적 상세화 방법을 적용하여 1 km 해상도의 남한지역 고해상도 기후변화 시나리오를 생산하는 과정이다. 이에 대한 자세한 내용은 아래와 같다.

- 1) RCP 온실가스 시나리오에 기반하여 전 지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO(Hadley Centre Global Environment Model version 2 - Atmosphere Ocean; Collins *et al.*, 2008)

Table 1. Information of weather stations used in this study

Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)
Gangneung	37.75	128.89	26.0
Seoul	37.57	126.97	85.8
Incheon	37.48	126.62	71.4
Daegu	35.89	128.62	64.1
Jeonju	35.82	127.15	53.4
Busan	35.10	129.03	69.6
Mokpo	34.82	126.38	38.0

로 모의한 약 135 km 해상도의 전 지구 기후변화 시나리오를 산출(Baek *et al.*, 2013). 이 자료는 IPCC AR5의 미래 기후 전망을 위한 CMIP5에 제공됨(IPCC, 2013).

- 2) 전 지구 기후변화 시나리오를 다시 HadGEM3의 대기모델에 기초한 국립기상과학원의 지역기후모델 HadGEM-3RA (Atmospheric Regional Climate model of Hadley Centre Global Environment Model version 3)를 사용하여 한반도 지역에 대한 12.5 km 해상도의 지역 기후변화 시나리오로 변환(Lee *et al.*, 2012).
- 3) 12.5 km 해상도 시나리오 자료를 객관 분석하여 1 km 해상도로 변환하고, 미래기간(2011~2100년)에서 현재기간(2000~2010년)의 기후 값을 제거하여 시나리오 편차 값을 산출.
- 4) 전국 537개의 기상 관측소 자료를 이용하여 통계적 상세화 기법인 MK-PRISM(Modified Korean - Parameter elevation Regressions an Independent Slopes Model)을 통해 현재기간(2000~2010년)의 1 km 해상도 격자형 기후자료를 생산(Kim *et al.*, 2012b).
- 5) 시나리오 편차 값에 MK-PRISM에 의해 생산된 기후자료를 결합하여 최종적으로 1 km 해상도의 남한 상세 기후변화 시나리오를 산출(Kim *et al.*, 2012a).

2.3 기후변화 분석

극한기온의 변화를 살펴보기 위해 우선 연 최고기온과 연 최저기온을 분석하였다. 과거 및 미래에 대해서 각각 처음 30년과 마지막 30년 평균 연 최고·최저기온의 편차를 통해 장기적인 변화경향을 분석하였고, 각각의 경년변동 분석을 통해 극한기온의 변동성을 비교 하였으며, 변동성을 정량화하기 위하여 식 (1)~식 (3)의 과정을 거쳤다. 단순 회귀모형을 통해 각 지점의 장기적인 기온변화 경향을 산출(식 (1)), 각 해의 기온에서 장기 기온변화 경향을 제거하여 편차 값(d_i)을 추출(식 (2)), 편차 값(d_i)을 사용하여 표준편차(s)를 산출하고, 이 값을 변동성으로 정의(식 (3))하였다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \tag{1}$$

$$d_i = y_i + \hat{y}_i \tag{2}$$

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 / (n - 1)} \tag{3}$$

우리나라 7개 지점의 과거 90년과 미래 90년의 극한기후 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 WMO(World Meteorological Organization)에서 제시하고 있는 ETCCDI(Peterson, 2005; <http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>) 극한기후지수를 사용하였다. ETCCDI 극한기후지수는 극한기후 분석을 위하여 KMA(2012), Sillmann *et al.*(2013) 등 국내·외에서 사용되는 지수이며, 온도관련 지수 16개와 강수관련 지수 11개, 총 27개로 구성되어 있다. 이 연구에서는 KMA(2012)에서 우리나라의 상황에 맞게 수정한 지수를 참고하여 총 5개의 온도관련 극한기후지수를 사용하였다(Table 2). 과거 90년과 미래 90년에 대해서 각각 처음 30년과 마지막 30년간의 극한기후지수 연간 발생빈도 편차를 통해 극한기후지수의 장기적인 변화를 분석하였으며, 현재(1981~2010), 21세기 중기(2031~2060), 21세기 말기(2071~2100)로 기간을 나누어 월별로 비교하였다.

3. 우리나라의 극한기후변화

3.1 연 최고, 최저기온의 변화

평균적인 상태의 기온변화보다는 극한기온의 변화가 우리의 삶에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 여름 최고기온과 관련된 열파는 우리의 건강에 영향을 주며, 겨울 최저기온과 관련된 한파는 스키장, 놀이공원 등 계절산업 수요와 관계되어 있다(KMA, 2012). 이러한 열파와 한파의 변화를 분석하기 위해 연 최고기온과 연 최저기온의 변화를 살펴보았다.

우리나라 평균 연 최고기온의 변화는 과거기간의 첫 30년과

Table 2. ETCCDI indices used in this study

Indicator	Definition	Units
HD (hot day)	Count of days when TX (daily maximum temperature) > 33℃	Days
SU (summer day)	Count of days when TX (daily maximum temperature) > 25℃	Days
TR (tropical night)	Count of days when TN (daily minimum temperature) > 25℃	Days
FD (frost day)	Count of days when TN (daily minimum temperature) < 0℃	Days
ID (icing day)	Count of days when TX (daily maximum temperature) < 0℃	Days

마지막 30년에 35.2°C, 34.7°C로 큰 변화가 없었으나, 미래기간의 첫 30년과 마지막 30년에는 35.5°C에서 40.0°C로 4.5°C 상승할 것으로 예상된다(Fig. 1). 지점별로 분류해도 과거에는 -1.1°C~0°C로 감소하거나 변화가 없지만, 미래에는 3.4°C~4.9°C로 증가한다. 연 최고기온의 변동성은 인천과 목포를 제외하고, 모든 지점에서 현재보다 미래에 커질 것으로 전망된다(Table 3). 변동성이 클수록 평균적인 상태에서 벗어난 이상 값이 발생할 가능성이 높아지므로, 미래에 연 최고기온이 상승하고, 변동성이 커짐에 따라 열파 발생이 증가할 것으로 예상된다.

연 최저기온은 과거기간 첫 30년과 마지막 30년에 -13.4°C에서 -11.1°C로 2.3°C 상승했고, 미래기간 첫 30년과 마지막 30년에는 -9.2°C에서 -4.9°C로 4.3°C 상승하여 과거보다 미래에 약 2배 더 상승할 것으로 전망된다. 온난화에 의해 기

온은 상승함에도 최근 최저기온 관련 극한기온의 빈도가 많아지는 경향이 있는데, 이는 겨울철 최저기온이 PDO(Pacific Decadal Oscillation), NAO(North Atlantic Oscillation)와 같은 대기순환지수의 영향으로 변동성이 커졌기 때문이다(Pyeon, 2015). 미래의 연 최저기온 변동성은 모든 지점에서 과거에 비해 작아지고 기온이 상승하므로, 겨울철 극한현상이 줄어들어 한파로 인한 피해가 적어질 것으로 전망된다(Table 3).

3.2 기후극한지수의 변화

일 최고기온이 33°C를 초과하는 날인 폭염일(HD)은 1920년대부터 2020년대까지는 뚜렷한 변화를 보이지 않으나, 2030년대 이후에는 증가할 것으로 전망된다(Fig. 2). Park *et al.*(2013)에 따르면 폭염일이 계속 증가하여 2071~2100년에는 폭염일이 30일 이상 발생하는 지역은 우리나라 전체 면적의 85.3%로, 일부 산지를 제외한 대부분의 지역에서 연중 1개월 이상 발생할 것으로 전망된다. 지점별 폭염일 발생 빈도는 남부내륙에서 높게 나타나며, 과거기간(1921~2010)에는 대구에서 22.2일로 높았으나, 미래기간(2011~2100)에는 전주에서 50.8일로 가장 높을 것으로 예상된다.

월별 폭염일은 현재(1981~2010)는 모든 지점에서 주로 7월부터 8월까지 나타났으며, 21세기 말(2071~2100)에는 주로 6월부터 9월까지 나타난다(Fig. 3, Table 4). 21세기 말에 서울과 대구, 전주와 같이 내륙에 위치한 지점들은 해안에 위치한 지점들에 비해 전체적인 발생빈도가 높고, 발생하는 시기도 빨라져서 9월보다 6월에 많이 발생하며, 5월에도 2일 이상 발생한다. 반면에 강릉을 제외한 해안에 위치하는 지점들(인천, 부산, 목포)은 내륙과 반대로 5월과 6월에 발생빈도가 높지 않고, 7, 8, 9월에 집중적으로 발생한다. 내륙은 폭염일 발생 시작 시기가 빨라지고, 종료 시기는 늦어지며, 해안은 시작 시기는 큰 변화가 없고, 종료 시기만 늦어지는 특징을 보이는데, 이는 상대적으로 여름에 해안이 내륙에 비해 최 난월인 8월까지 기온이 느리게 상승하고, 하강도 느리게 진행되기 때

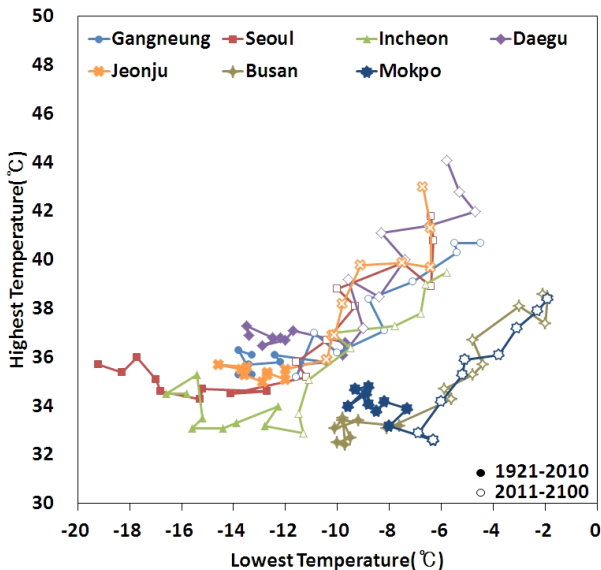


Fig. 1. Changes of the annual highest temperature and lowest temperature for past (1921~2010) and future (2011~2100) period.

Table 3. The range of fluctuation of annual highest temperature and lowest temperature for past (1921~2010) and future (2011~2100) period

	Period	Gangneung	Seoul	Incheon	Daegu	Jeonju	Busan	Mokpo
Annual highest temperature	1921~2010	1.30	1.41	1.55	1.45	1.24	1.29	1.37
	2011~2100	1.96	1.54	1.38	1.95	1.63	2.03	1.34
Annual lowest temperature	1921~2010	2.23	2.23	2.19	1.86	1.99	1.89	1.94
	2011~2100	1.75	1.69	1.68	1.82	1.93	1.40	1.48

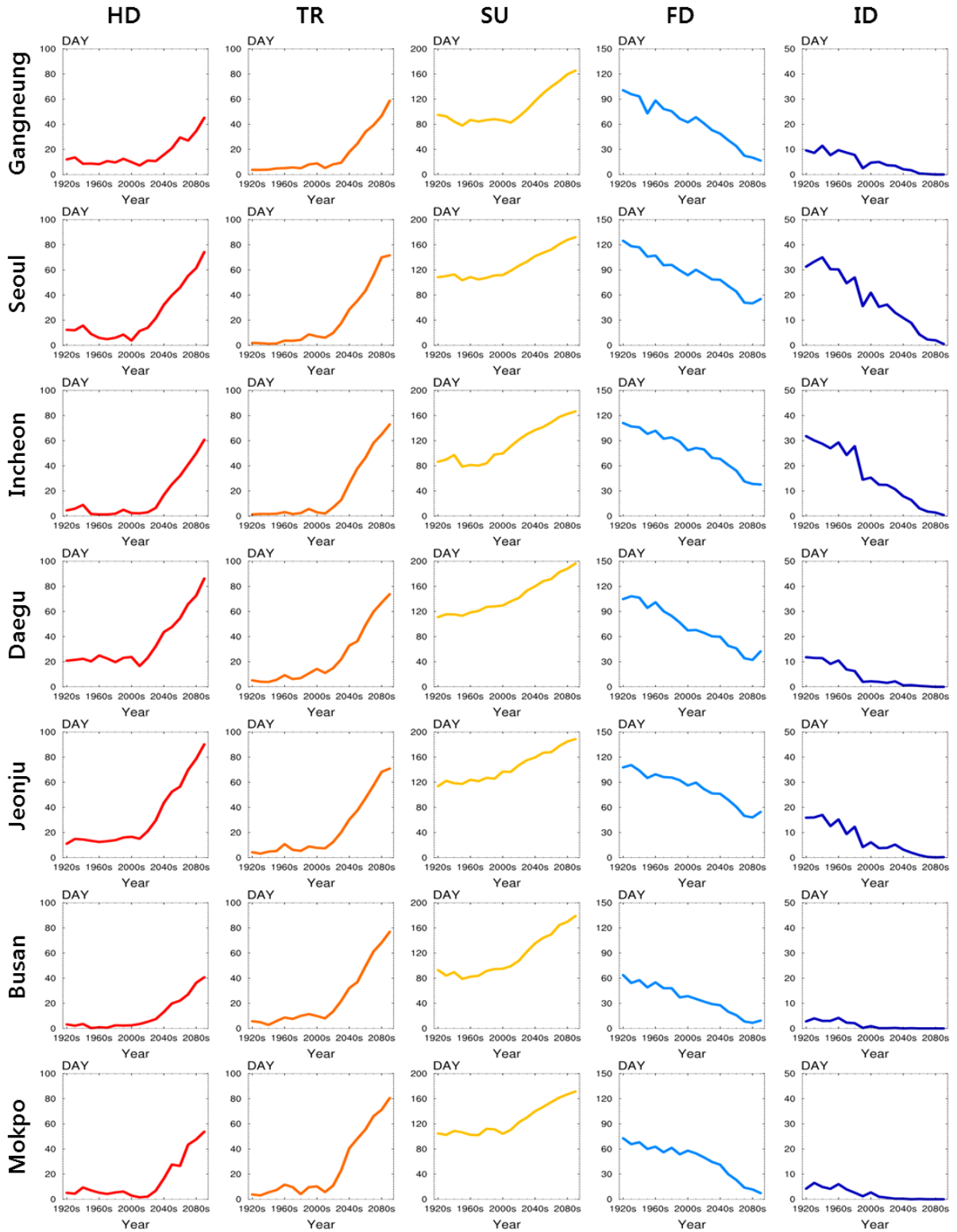


Fig. 2. Change of annual frequency (10-year average) of extreme temperature (HD, TR, SU, FD, ID) associated with warming in Korea (seven stations).

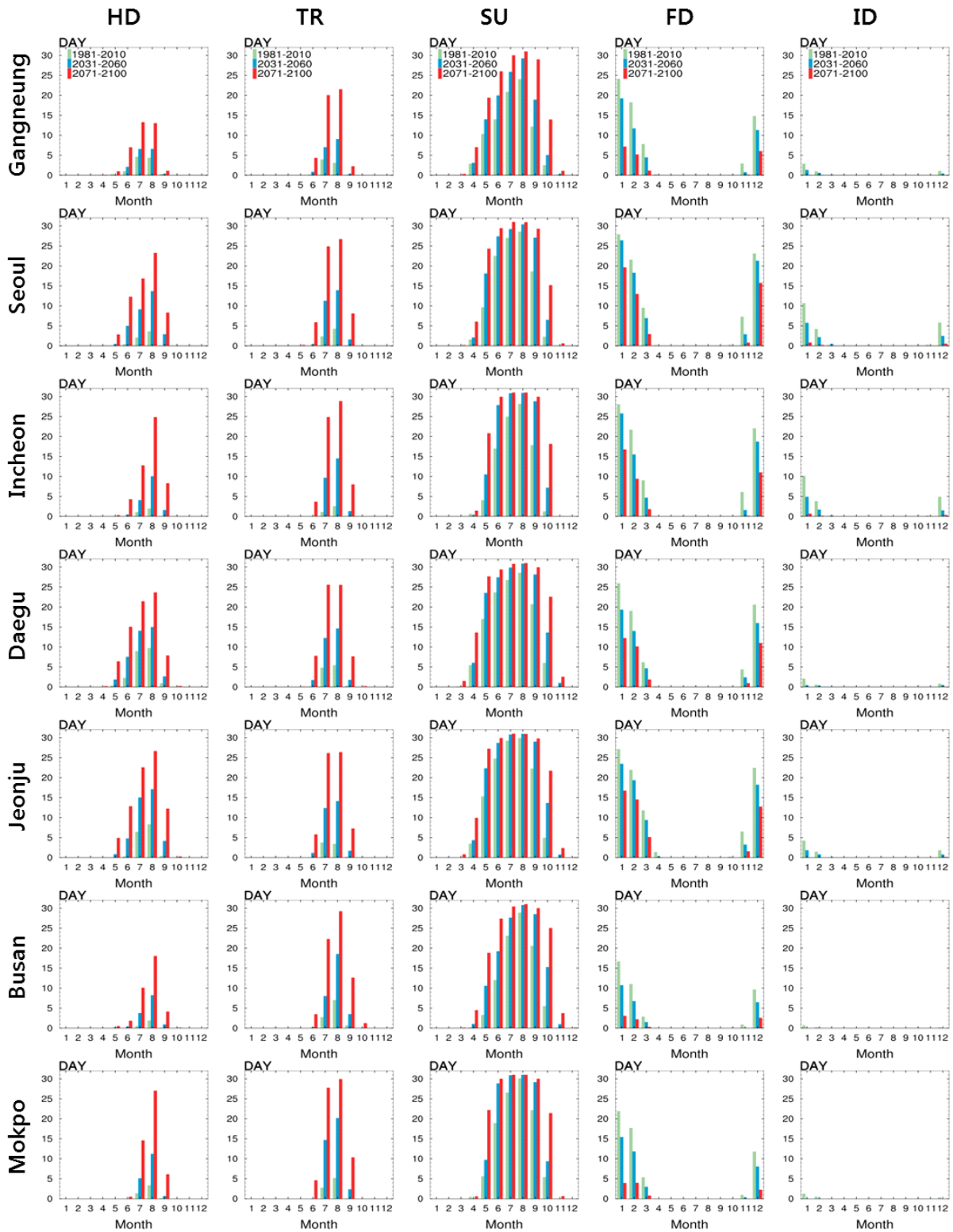


Fig. 3. Change of monthly frequency (30-year average) of extreme temperature (HD, TR, SU, FD, ID) associated with warming in Korea (seven stations).

Table 4. Comparison of frequency of HD and FD

Station	Period	HD												Ann
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Gangneung	1981~2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	4.6	4.4	0.3	0.0	0.0	0.0	10.7
	2031~2060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.1	6.6	6.6	0.3	0.0	0.0	0.0	15.8
	2071~2100	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	7.0	13.3	13.0	1.1	0.0	0.0	0.0	35.6
Seoul	1981~2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.1	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1
	2031~2060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	5.0	9.1	13.7	2.9	0.0	0.0	0.0	31.2
	2071~2100	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	12.3	16.8	23.3	8.3	0.0	0.0	0.0	63.6
Incheon	1981~2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1
	2031~2060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	4.1	10.1	1.6	0.0	0.0	0.0	16.2
	2071~2100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	4.3	12.8	24.8	8.3	0.0	0.0	0.0	50.5
Daegu	1981~2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.3	9.0	9.7	0.9	0.0	0.0	0.0	22.2
	2031~2060	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	7.5	14.1	15.0	2.6	0.0	0.0	0.0	41.2
	2071~2100	0.0	0.0	0.0	0.2	6.4	15.1	21.4	23.7	7.9	0.2	0.0	0.0	74.9
Jeonju	1981~2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	6.4	8.3	0.4	0.0	0.0	0.0	15.5
	2031~2060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	4.8	15.0	17.1	4.2	0.0	0.0	0.0	41.9
	2071~2100	0.0	0.0	0.0	0.1	4.9	12.8	22.6	26.6	12.2	0.3	0.0	0.0	79.5
Busan	1981~2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.9	0.1	0.0	0.0	0.0	2.4
	2031~2060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	3.8	8.3	0.9	0.0	0.0	0.0	13.5
	2071~2100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.8	10.1	18.0	4.1	0.1	0.0	0.0	34.7
Mokpo	1981~2010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	3.3	0.1	0.0	0.0	0.0	4.8
	2031~2060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	11.2	0.6	0.0	0.0	0.0	16.9
	2071~2100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	14.6	27.0	6.1	0.0	0.0	0.0	48.2
Station	Period	FD												Ann
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Gangneung	1981~2010	24.2	18.2	7.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	14.8	68.2
	2031~2060	19.2	11.7	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	11.3	47.5
	2071~2100	7.2	5.2	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	6.0	19.7
Seoul	1981~2010	27.9	21.6	9.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	7.3	23.1	89.7
	2031~2060	26.4	18.3	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	21.3	75.9
	2071~2100	19.6	13.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	15.7	52.1
Incheon	1981~2010	28.1	21.7	9.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	22.0	87.1
	2031~2060	25.8	15.5	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	18.7	66.2
	2071~2100	16.8	9.4	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	11.0	39.1

Table 4. Continued

Station	FD														
Daegu	1981~2010	25.9	19.0	6.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	20.6	76.3
	2031~2060	19.3	14.0	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	16.0	56.4
	2071~2100	12.2	10.1	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	11.0	36.2
Jeonju	1981~2010	27.1	21.9	11.8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	6.5	22.5	91.4
	2031~2060	23.5	19.4	9.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	18.2	74.0
	2071~2100	16.7	14.5	5.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	12.8	50.8
Busan	1981~2010	16.7	11.0	2.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	9.7	41.2
	2031~2060	10.7	6.8	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	6.5	25.6
	2071~2100	3.1	2.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	8.1
Mokpo	1981~2010	21.9	17.7	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	11.8	57.7
	2031~2060	15.4	11.8	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	8.0	38.5
	2071~2100	3.9	4.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	10.9

문이다. 강릉은 해안에 위치함에도 불구하고, 폭염일의 시작 시기가 빨라져서 대구, 전주와 같이 4월에도 발생할 것으로 전망된다. 현재 폭염 발생빈도가 4.8일로 매우 낮은 목포는 21세기 말까지 폭염 발생 빈도가 급격하게 늘어나, 8월에는 27일로 분석지점 중 가장 많이 발생하는 것으로 나타난다.

일 최저기온이 25℃를 초과하는 날인 열대야일(TR)은 과거 기간의 첫 30년(1921~1950)과 마지막 30년(1981~2010)간에 4.3일 증가했고, 미래기간의 첫 30년(2011~2040)과 마지막 30년(2071~2100) 간에는 53일 증가하여 미래에 급격하게 증가할 것으로 전망된다(Fig. 2). 열대야일은 위도, 해발고도, 해양과의 인접성, 인구밀도 등 다양한 기후인자의 영향을 받는다(Choi and Kwon, 2005). 과거 90년 동안 우리나라의 평균 열대야일은 7.7일인데, 남부내륙의 대도시인 대구는 10.7일로 도시열섬효과에 의해 비교적 많이 발생했고, 남부해안에 위치한 부산과 목포는 열용량이 높은 해양의 영향을 받아 야간에 기온냉각이 약화되어 각각 10.4일, 8일로 우리나라 평균보다 열대야 발생빈도가 높았다(Park and Suh, 2011). 반면에 서울과 인천은 대도시임에도 상대적으로 고위도에 위치하여 각각 6.7일, 3.7일로 발생 빈도가 낮았다. 영동 북부에 위치한 강릉은 유사편현상이 자주 발생하여 같은 위도대의 서해안 지역과는 다른 특성을 보인다(Choi and Kwon, 2005). 21세기 말에는 남부 내륙에 위치한 대구, 전주와 해안에 위치한 부산, 목포에서 각각 66.9일, 65.6일, 68.8일, 72.6일 발생하여 내륙에 비해 해안에서 더 많이 발생할 것으로 예상된다.

우리나라에서 전체적으로 열대야가 한 달에 1일 이상 발생하는 기간은 현재는 2개월(7~8월), 21세기 중기에는 3개월(7~9월), 21세기 말에는 4개월(6~9월)로 나타난다(Fig. 3). 발생기간은 폭염일과 유사하지만, 7월과 8월에 더 집중되는 경향을 보이는데, 이 시기에 북태평양 고기압의 확장으로 온난 다습한 공기가 다량 유입되어 야간 복사냉각이 약해지기 때문이며, 21세기 말에 모든 지점에서 7월과 8월에 20일 이상 발생할 것으로 전망된다. 21세기 말에 열대야일을 내륙(서울, 대구, 전주)과 해안(인천, 부산, 목포)으로 나누어 비교하면, 6월에는 내륙(5.9일, 7.8일, 5.8일)이 해안(3.7일, 3.5일, 4.6일)보다 많이 발생하지만, 9월에는 내륙(8.1일, 7.7일, 7.3일)보다 해안(8.0일, 12.6일, 10.3일)에서 비교적 많이 발생한다. 해안지역에서는 8월에 열대야가 각각 28.9일, 29.2일, 29.9일로 거의 매일 발생할 것으로 전망된다.

여름일(SU)은 일 최고기온이 25℃를 초과하는 날로 정의되며, 우리나라 평균 여름일은 분석기간 중 과거기간 첫 30년과 마지막 30년 간에 4.8일 증가했고, 미래기간 첫 30년과 마지막 30년간에 48.2일 증가하여, 미래에 급격하게 증가할 것으로 예상된다(Fig. 2). 여름일 발생빈도가 가장 높은 지점은 현재는 전주(129.9일)이고, 21세기 말에는 대구(189.1일)이며, 목포는 현재와 21세기 말에 각각 87일, 157.9일로 가장 적게 발생한다.

여름일이 한 달에 15일 이상 발생하여 절반 이상을 차지하는 기간은 현재는 4개월(6~9월), 21세기 중기에는 5개월(5~9월), 21세기 말에는 6개월(5~10월)로 점차 늘어난다(Fig. 3).

모든 지점에서 현재에 비해 21세기 말에 여름일 발생기간이 늘어나고, 6월부터 9월까지의 여름일에 해당되지 않는 날이 드물 것으로 전망된다. 5월에는 해안에 위치한 인천과 부산, 목포에서 20.8일, 18.9일, 22.2일 발생하는 것에 비해, 내륙에 위치한 서울, 대구, 전주에서는 24.3일, 27.7일, 27.2일로 비교적 많이 발생한다. 남부내륙에 위치한 대구와 전주는 여름일 시작시기가 가장 빨라서 4월에도 각각 13.6일, 9.9일 발생할 것으로 전망된다. 종료 시기인 10월과 11월에는 중부지역에 비해 남부지역에서 더 많이 발생한다.

서리일(FD)은 일 최저기온이 0°C 미만인 날로 겨울철에 주로 발생하며, 우리나라에서 평균적으로 과거기간의 첫 30년과 마지막 30년간에 22.1일 감소했고, 미래기간의 첫 30년과 마지막 30년간에는 33.4일 감소하여 지속적으로 감소할 것으로 전망된다(Fig. 2). 서리일은 전 기간에 걸쳐 중부내륙에서 많고, 남부해안에서 적게 발생한다. 21세기 말에 서울에서는 서리일이 52.1일로 가장 많이 발생하여 가장 적게 발생하는 부산(8.1일)과 6배 이상의 차이가 있으며, 부산의 현재 서리일 발생일(41.2일)보다도 많을 것으로 전망된다(Table 4).

우리나라 평균 서리일이 한 달에 15일 이상 발생하여 절반 이상을 차지하는 기간은 현재는 3개월(12~2월), 21세기 중기에는 1개월(1월), 21세기 말에는 나타나지 않을 것으로 예상된다(Fig. 3). 전체적인 서리일 발생 기간은 현재는 7개월(10~4월), 21세기 중기와 말에는 5개월(11~3월)로 2개월 줄어들 것으로 예상된다. 남부 해안에 위치한 부산과 목포는 21세기 말에 연간 서리일 발생빈도가 8.1일, 10.9일로 가장 낮고, 서리일 발생 기간 또한 짧아서 4개월(12~3월)사이에만 나타난다. 21세기 말에 서울과 부산은 연간 서리일 발생빈도가 6배 이상 차이가 나지만, 발생기간은 각각 5개월과 4개월로 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 21세기 말의 서리일은 지역에 따라 발생 빈도의 차이는 크지만, 발생 기간은 유사하여 한 겨울(12~2월)에 얼마나 많이 발생하느냐에 따라 전체 발생 빈도가 달라진다는 것을 의미하며, 여름일 발생빈도가 한여름(6~9월)에 모든 지역에서 비슷한 발생빈도를 보이는 것과는 차이가 있다.

Lee(1979)의 계절 구분 기준에 의하면 여름시작일은 일 평균기온 20°C 이상, 일 최고기온 25°C 이상인 날이며, 겨울시작일은 일 최저기온 0°C 이하, 일 평균기온 5°C 이하인 날로 정의되기 때문에, 여름일과 서리일이 발생하는 기간을 각각 여름과 겨울로 볼 수 있다. 우리나라 전체에서 현재 여름일과 서리일이 각각 4~10월, 10~4월에 발생하므로 두 지수가 공통적으로 발생하는 4월과 10월을 계절이 급변하는 시기로 볼 수 있다. 21세기 말에는 여름일과 서리일이 각각 3~11월, 11~3월에 발생할 것으로 전망되므로, 3월과 11월을 환절기로 볼 수 있

다. 즉, 현재에 비해 21세기 말에 동절기에서 하절기로 넘어가는 시기는 1개월 앞당겨지고, 하절기에서 동절기로 넘어가는 시기는 1개월 늦어질 것으로 예상된다.

일 최고기온이 0°C 미만인 날로 정의되는 결빙일(ID)은 지속적으로 감소하여 21세기 말에는 0.4일로 거의 나타나지 않을 것으로 예상된다(Fig. 2). 현재는 중부지방인 서울과 인천에서 각각 21.2일, 19.2일로 가장 많이 발생하고, 남부 해안에 위치한 부산에서 1.1일로 가장 적게 발생한다. 21세기 말에는 모든 지점에서 2일 미만으로 거의 발생하지 않고, 강릉, 부산, 목포에서는 발생하지 않는 것으로 나타난다. 특히, 부산은 2010년대부터 결빙일이 발생하지 않거나, 연중 1회 발생하여 최고기온이 영하로 떨어지는 경우가 드물어진다.

월별 결빙일은 현재는 5개월(11~3월)사이에 발생하고, 21세기 말에는 3개월(12~2월)사이에 발생할 것으로 전망된다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 사회·경제적으로 큰 영향을 미치는 극한기후변화를 과거(1921~2010)부터 미래(2011~2100)까지 월별로 분석하였다. 과거는 전국 7개 지점에 대하여 기상청 관측일 최고·최저기온 자료를 사용하였으며, 미래는 1 km 해상도의 남한 상세시나리오 RCP8.5 자료 중 7개 관측지점과 가장 가까운 격자의 일 최고·최저기온을 사용하였다. 연 최고, 최저기온의 변화와 기온관련 극한기후지수의 월별 변화 분석을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 연 최고기온은 과거에 큰 변화가 없었으나, 미래에는 뚜렷하게 상승하며, 변동성은 과거에 비해 미래에 커질 것으로 예상된다. 미래에 연 최고기온이 상승하고 변동성이 커짐에 따라, 평균적인 상태에서 벗어난 이상 값이 나타날 가능성이 높아지므로 여름철 극한현상이 증가할 것으로 전망된다. 연 최저기온은 과거보다 미래에 약 2배 더 상승하며, 변동성은 모든 지점에서 작아진다. 미래에 연 최저기온이 상승하고 변동성이 작아져서, 겨울철에 최저기온 관련 극한현상 발생이 감소할 것으로 전망된다.
- 2) 폭염일(HD)은 과거에는 큰 변화가 없었으나, 미래에는 뚜렷하게 증가한다. Fig. 4의 파랑색과 붉은색 영역은 각각 현재(1981~2010)와 21세기 말(2071~2100)의 폭염일 발생 패턴을 보여주는데, 8월 폭염발생이 크게 증가하고 발생하는 기간이 늘어나는 특성이 나타난다. 현재는 2개월(7~8월) 동안 주로 발생하지만, 21세기 말에는 4개월(6~9월)로 발생기간이 늘어난다. 내륙(서울, 대구, 전주)은 주로 6월부터 9월까지 발생하여 시작은 빨라지고, 종료는 늦어지

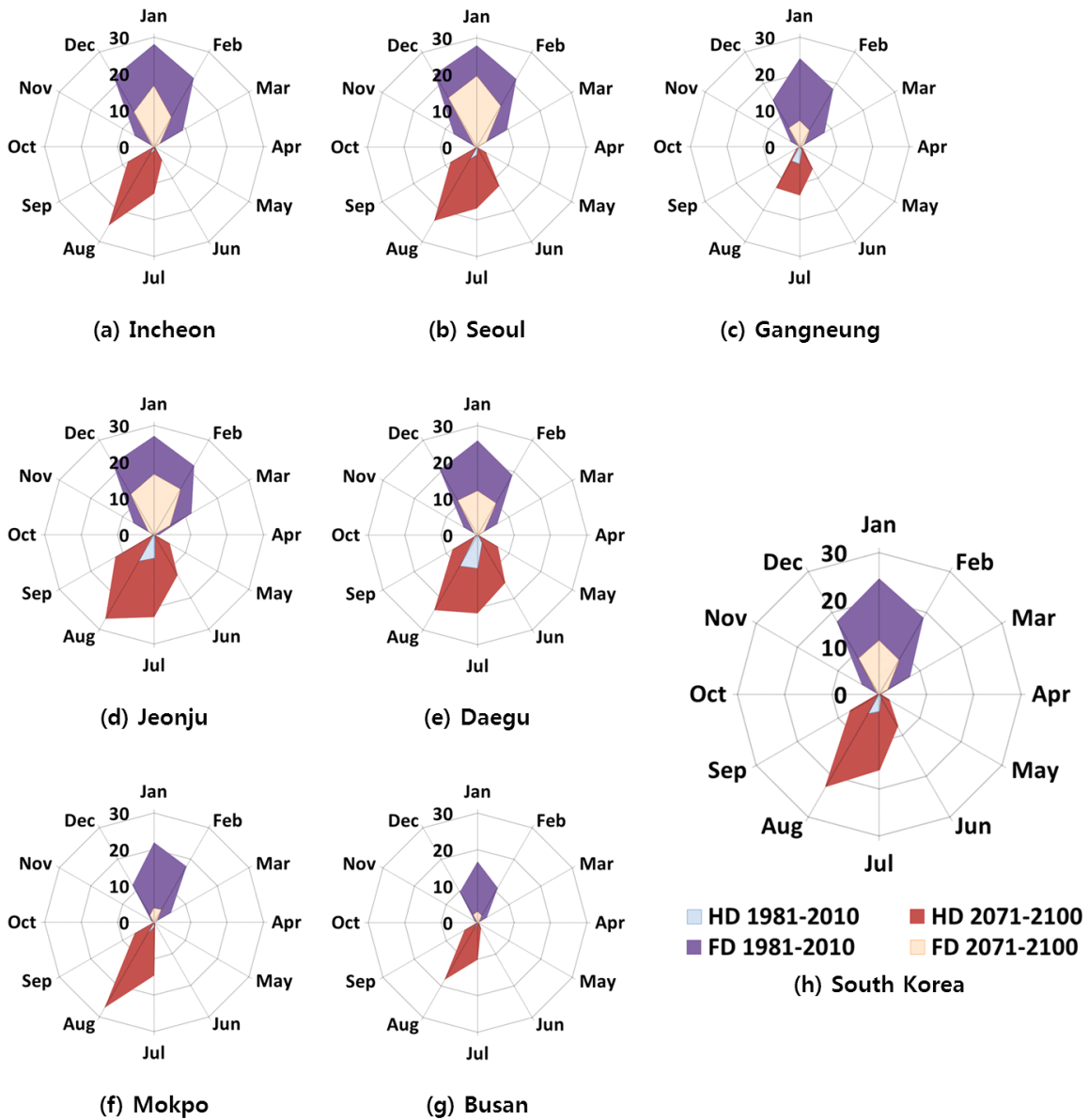


Fig. 4. Monthly frequency change of the temperature extreme indices (HW and FD) in current (1981~2010) and future (2071~2100).

며, 비교적 발생 빈도도 높다. 해안(인천, 부산, 목포)은 7~9월에 주로 발생하여 종료시기가 늦어진다.

3) 열대야일(TR)은 과거 첫 30년과 마지막 30년간에 4.3일 증가했고, 미래 첫 30년과 마지막 30년 간에는 53일 증가하여, 증가량이 과거의 12배 이상일 것으로 전망된다. 주 발생기간은 현재는 2개월(7~8월)이고, 21세기 말에는 4개월(6~9월)로 폭염과 유사하지만, 온난 다습한 공기가 다량 유입되어 복사냉각이 약해지는 7월과 8월에 더 집중되는

경향을 보인다. 연간 발생일은 위도의 영향을 받아서, 중부 지역보다 남부지역에서 더 많이 발생한다. 발생시기별로는 21세기 말에 6월에는 내륙이 해안보다 많이 발생하고, 9월에는 해안이 내륙보다 많이 발생할 것으로 예상된다.

4) 여름일(SU)은 과거기간에 4.8일 증가했고, 미래기간에 48.2일 증가하여 미래에 급격한 증가가 전망된다. 한 달에 15일 이상 발생하는 기간은 현재 4개월(6~9월)에서 21세기 말에는 6개월(5~10월)로 2개월 증가한다. 21세기 말에 여

름일 시작 시기인 4~5월에는 해안에 비해 내륙에서 많이 발생하고, 종료 시기인 10~11월에는 중부지역에 비해 남부지역에서 많이 발생할 것으로 예상된다.

- 5) 서리일(FD)은 과거와 미래에 각각 22.1일 33.4일 감소하며, 현재에 비해 21세기 말에는 전 지점 중 강릉과 목포에서 크게 감소한다. Fig. 4의 보라색과 주황색 영역은 각각 현재와 21세기 말의 서리일 발생 패턴을 보여주는데, 서리일 발생기간이 짧아지고, 전 기간에 걸쳐 발생빈도가 낮아지는 특성이 나타난다. 한 달에 15일 이상 발생하는 기간은 현재는 3개월(12~2월)이고, 21세기 말에는 나타나지 않으며, 전체 발생기간은 현재 7개월(10~4월)에서 21세기 말에 5개월(11~3월)로 2개월 줄어들 것으로 예상된다(Fig. 4). 21세기 말에 중부 내륙의 서울과 남부 해안의 부산의 발생기간은 각각 5개월, 4개월로 큰 차이가 없으나, 발생빈도는 52.1일, 8.1일로 6배 이상의 차이를 보일 것으로 예상된다. 이는 21세기 서리일 발생빈도는 발생기간의 길이보다 한 겨울(12~2월)에 얼마나 많이 발생하는가에 따라 달라진다는 것을 의미한다.
- 6) Lee(1979)의 계절 구분 기준에 따르면 여름일(SU)은 여름, 서리일(FD)은 겨울의 기준과 유사하다. 따라서 여름일과 서리일이 공통적으로 발생하는 시기를 계절이 급변하는 시기로 볼 수 있다. 현재는 4월과 10월에 공통적으로 발생하고, 21세기 말에는 3월과 11월에 공통적으로 발생하여, 동절기에서 하절기로 넘어가는 시기는 1개월 빨라지고, 하절기에서 동절기로 바뀌는 시기는 1개월 늦어질 것으로 예상된다.
- 7) 결빙일(ID)은 지속적인 감소로 21세기 말에는 거의 나타나지 않는다.

여름철 극한기후현상의 발생빈도와 지속기간은 증가는 폭염 취약계층에 더욱 위협적인 요소로 작용할 수 있다. 따라서 이 연구의 결과는 피해방지를 위한 보건대책을 수립할 때 집중적으로 대비하는 기간을 결정하는데, 있어서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 전망된다. 하절기에 최대전력수요는 기온이 25℃ 이상인 경우에 발생하므로(Park, 2012), 여름일수 및 열대야일수의 변화 분석을 통해 에너지 수요 예측에 있어서도 중장기 계획 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 또한 겨울철 극한기후현상의 발생빈도와 지속기간의 감소는 눈 녹음 양과 시기의 변화와 연계하여 하천 유입량에 변화를 야기할 수 있으며, 이에 따라 수자원 관리 계획수립에 주요 자료로 활용될 수 있을 것이다(KMA, 2012). 이 연구에서는 한 가지의 모델 결과(RCP8.5)만 사용하여 결과에 대한 불확실성을 클 수 있다. 향후 불확실성을 평가하고, 여러 모델을 복합적으로 사용하여 불확실성 문제를 해결해야 할 것이다.

사 사

이 연구는 “NIMR-2012-B-2(기후변화 예측기술 지원 및 활용연구)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baek HJ, Lee J, Lee HS, Hyun YK, Cho C, Kwon WT, Marzin C, Gan SY, Kim MJ, Choi DH, Lee J, Lee J, Boo KO, Kang HS, Byun YH. 2013. Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pac J Atmos Sci* 49:603-618.
- Chen H, Sun J. 2014. Change in climate extreme events in China associated with warming. *Int J Climatol* DOI: 10.1002/joc.4168.
- Choi G, Kwon WT. 2005. Spatial-temporal patterns and recent changes of tropical night phenomenon in South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 40(6):730-747. (In Korean with English abstract).
- Collins WJ, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, Gedney N, Hinton T, Jones CD, Liddicoat S, Martin G, O'Connor F, Rae J, Senior C, Totterdell I, Woodward S. 2008. Evaluation of the HadGEM2 model, Hadley Centre Technical Note 74:47pp. [<http://www.metoffice.gov.uk/learning/library/publications/science/climate-science>].
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. 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, P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JDI(Jeju Development Institute). 2013. The expected changes in Jeju island in RCP8.5 scenario. page 19 (In Korean).
- Kharin VV, Zwiers FW, Zhang X, Wehner M. 2013. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Clim Change* 119:345-357. DOI: 10.1007/s10-584013-0705-8.
- Kim KH, Shin J, Koh EH, Koh GW, Lee KK. 2009. Sea level rise around Jeju island due to global warming and movement of groundwater/seawater interface in the eastern part

- of Jeju island. *J. Soil & Groundwater* 14(3):68-79. (In Korean with English abstract).
- Kim JU, Kim MK, Kim S, Kim YH, Han MS, Lee WS. 2012a. High-resolution climate change scenarios in South Korea using PRIDE MODEL. *Korean Meteorological Society, Proceedings of the Spring Meeting of KMS 2012*, 127-128. (In Korean).
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG. 2012b. Production technique of observation grid data of 1km resolution. *Journal of Climate Research* 7(1):55-68. (In Korean with English abstract).
- Kim SO, Kim DJ, Kim JH, Yun JI. 2012c. Freeze risk assessment for three major peach growing areas under the future climate projected by RCP8.5 emission scenario. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 14(3):124-131. (In Korean with English abstract).
- KMA(Korea Meteorological Administration). 2012. The prospect report of climate change in Korean peninsular. (In Korean).
- Koo KA, Park WK, Kong WS. 2001. Dendrochronological analysis of *Abies Koreana* W. at mt. Halla, Korea: Effects of climate change on the growths. *Korean J Ecol* 24:281-288. (In Korean with English abstract).
- Lee BS. 1979. A study of natural seasons in Korea. *Geography, Korean Geographical Society* 20:1-11. (In Korean with English abstract).
- Lee IH, Park SH, Kang HS, Cho CH. 2012. Regional climate projections using the HadGEM3-RA. 3rd International Conference on Earth System Modeling, Vol., 3ICESM-236-2, 2012.
- NIER(National Institute of Environment Research). 2014. Korean climate change assessment report 2014 - climate change impact and adaptation -. (In Korean).
- NIMR(National Institute of Meteorological Research). 2011. Development and application of methodology for climate change prediction (III). (In Korean).
- Park S, Lee CH, Back SO, Shin YU, Kim JS, Cho YW, Lee YJ. 2010. Effect of heat stress of extreme heat lever on muscle function and muscle injury markers in elderly women. *Journal of the Korean Gerontological Society* 30(3):793-802. (In Korean with English abstract).
- Park WS, Suh MS. 2011. Characteristics and trends of tropical night occurrence in South Korea for recent 50 years (1958-2007). *Atmosphere, Korean Meteorological Society* 21(4):361-371. (In Korean with English abstract).
- Park KS. 2012. The effect of changes in temperature on energy consumption. *KEEI Basic Research Report 2012* (12). (In Korean with English abstract).
- Park CY, Choi YE, Kwon YA, Kwon JI, Lee HS. 2013. Studies on changes and future projections of subtropical climate zones and extreme temperature events over South Korea using high resolution climate change scenario based on PRIDE model. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers* 19(4):600-614. (In Korean with English abstract).
- Peterson TC. 2005. Climate change indices. *WMO Bulletin* 54(2):83-86.
- Pyeon D. 2015. The study on the magnitude, change and variability of monthly extreme temperatures over the Republic of Korea. Dissertation, Konkuk University. (In Korean with English abstract).
- Shim KM, Kim GY, Roh KA, Jeong HC, Lee DB. 2008. Evaluation of agro-climatic indices under climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 10(4):113-120. (In Korean with English abstract).
- Sillmann J, Kharin VV, Zwiers FW, Zhang X, Bronaugh D. 2013. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *J Geophys Res Atmos* 118:2473-2493. doi:10.1002/jgrd.50188. <http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>