기후변화 시나리오를 이용한 남한에서의 서리일수(첫/마지막 서리일)의 시공간 변동특성 연구

배철호¹·오석근²·서명석²

¹대전지방기상청·²공주대학교 대기과학과

(2017년 3월 7일 접수, 2017년 3월 29일 수정, 2017년 3월 29일 게재 확정)

A Study on the Spatio-Temporal Variations of Frost Days (First/Last Frost Date) in South Korea Using Climate Change Scenarios

Cheol-Ho Bae¹ · Seok-Geun Oh² · Myoung-Seok Suh²

¹Daejeon Regional Office of Meteorology

²Department of Atmospheric Science, Kongju National University

(Received 7 March 2017, Revised 29 March 2017, Accepted 29 March 2017)

Abstract : In this study, the spatio-temporal variations and trends of frost events (total frost days, first/last frost date) in South Korea were investigated using RegCM4.0 simulation data based on two RCP(4.5, 8.5) scenarios. To evaluate the performance of RegCM4.0 for the current (1981-2010) frost events, the daily minimum temperature of 49 observation sites in South Korea were used. Generally, the RegCM4.0 reasonably simulated the spatial characteristics of frost events, but the first (last) frost date was simulated by about 6.6 (3.3) days earlier (later) than that of the observation. As the results, the simulated number of the total frost days was 10.8 days greater than that of the observation. In the mid-21st century(2021-2050), the first(last) frost date was projected to be delayed (bring forwarded) by about 7.9(3.1) days in RCP4.5 and about 9.6(2.3) days in RCP8.5, respectively. And the first(last) frost date in the late 21st century(2071-2100) is projected to be delayed (bring forwarded) by about 14.5(15.0) days in RCP4.5 and about 22.2(23.5) days in RCP8.5, comparing to the current climate. These changes could induce a significant decrease of the number of total frost days by about 26.5(47.7) days in the late 21st century under RCP4.5(RCP8.5). And the interannual variability of frost events under RCP4.5(RCP8.5) was projected to be relatively higher(smaller) in the mid-21st century than in the late 21st. The results indicated that the extreme frost events is expected to increase in the mid-21st century under RCP4.5, while in the late 21st century under RCP8.5, comparing to the current climate.

Key Words : frost days, first/last frost date, RegCM4.0, RCP scenario, South Korea

주요어 : 서리일수, 첫/마지막 서리 발생일, RegCM4.0, RCP 시나리오, 남한

1. 서론

최근 과학기술의 발달로 기상현상의 원인을 분석하고 예측하여 기상재해로 인한 피해를 상당부분 줄일 수 있게 되었다(Kwon, 2006). 그러나 서리와 같이 국지적으로 발생하는 기상현상은 아직도 동해나 상해로 농작물의 생육에 있어 큰 지장을 주고 있다(Kwon *et al.*, 2008). 맑고 바람이 약한 날 밤 지표면의 기온이 복사냉각에 의하여 0℃이하로 내려갈 때 발생하는 서리는 농작물의 조직을 얼리고 그로 인하여 농작물의 추위에 약한 부분에 해를 입힌다. 최근 10년간(2004~2013년) 이러한 서리에 의한 농작물 피해면적(복구비용)은 37,274 ha(350억원)에 달한다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2014). 하지만 각 지역에 적합한 서리정보에 대한 구체적인 연구가 미흡한 관계로 농민뿐만 아니라 농업정책을 결정하는 기관들도 불편을 겪고 있다.

자연적·인위적인 요인에 의한 지구온난화의 영향으로 기후변화에 의한 기상현상의 특성변화가 현실화되고 있음이 밝혀지고 있다(Klein and Können, 2003; Yun *et al.*, 2012). 지구온난화에 의한 최저기온의 상승으로 서리일수가 감소한다고 하더라도 기후변화에 따른 이상 난동현상으로 작물의 개화시기가 앞당겨지고 있어 더 잦은 서리 피해가 발생될 수 있다(Chmielewski *et al.*, 2004). 또한 봄철에 불규칙한 저온 내습으로 개화기에 늦서리 피해가 증가될 것으로 예상되고 있다(Yoon, 2005). 특히 극한 기후 현상의 발생빈도와 강도가 과거에 비하여 강해짐에 따라 미래에는 인위적인 요인에 의해 지금보다 더 심각한 자연재해가 초래될 것으로 예상되고 있다(IPCC, 2007; Oh *et al.*, 2013). 따라서 서리와 같이 국지적 변동성이 큰 극한 기후 현상에 대해 효율적인 대응 및 적응 방안을 수립하기 위해서는 보다 상세한 미래 서리일수 변화

전망에 대한 예측정보가 필요하다. 대부분의 서리 현상은 전 지구적 규모에서보다 지역규모에서 발생하므로 효과적으로 기후변화에 대응하고 서리 발생에 따른 부정적인 영향을 줄이기 위해서는 지역규모에서 이러한 변화가 전망되어야 한다. 특히 극한 서리 현상은 지역적인 편차 및 변동성이 매우 크기 때문에 고해상도 지역기후모델을 이용한 연구의 필요성이 크며 신뢰성 있는 전구기후모델 자료를 경제조건으로 처방한다면 보다 상세한 미래 서리 발생 변화 정보를 생산할 수 있을 것이다(Suh and Lee, 2004; Zhai *et al.*, 2005; Oh *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2013; Lee and Hong, 2014).

서리에 대한 선행연구는 크게 세 가지로 분류된다. 첫째, 서리의 발생 및 특성에 관한 연구로 서리 발생일의 기상요소별 특성을 분석하여 서리가 발생할 수 있는 기상조건을 파악하거나 한반도에서 발생한 서리일의 분포에 관한 연구가 있으며(Kwon, 1995; Kwon *et al.*, 2008; Kim, 2013; Park, 2015), 둘째로는 서리의 시공간 변화에 관한 연구로 최근 지구온난화로 인한 최저기온 상승이 서리일수를 감소시키고 있다는 연구가 있다(Bonsal *et al.*, 2001; Frich *et al.*, 2002; Shim *et al.*, 2008). 그러나 지구 온난화에 의한 최저기온이 상승하여 서리일수가 줄어든다고 하더라도, 최근 전 지구적 온난화 현상으로 일부 작물들의 개화시기가 앞당겨짐에 따라 늦은 봄 마지막 서리에 의한 피해가 증가한다는 연구들도 있다(Yun *et al.*, 2001; Chmielewski *et al.*, 2004; Yarushnykov and Blanke, 2005). 마지막으로 미래에 나타날 기후변화 중 하나로 현재 대비 21세기 말에 저온 관련 극한 지수인 결빙일과 서리일이 전 지역에서 감소될 것으로 전망하는 연구들도 많이 수행되었다(Lee *et al.*, 2012; Yun *et al.*, 2012; Hong, 2014). 그러나 이러한 선행 연구들이 있음에도 서리에 대한 연구는 계속 연구될 여지가 많다. 대부분은 선행 연구

의 분석기간은 2000년 이전까지의 자료를 바탕으로 연구를 했기 때문에 최근의 변화를 반영하지 못했으며 기후변화에 따라 파생적으로 나타나는 미래 전망도 서리일수 및 무상일수의 변화에만 초점을 맞춘 연구가 많다. 서리 연구에 있어 서리의 특성분석과 단기 예측도 필요하나 작물의 생육주기에 있어 중요한 수확기에 발생하여 피해를 주는 첫 서리와 생육시기에 발생하여 큰 피해를 주는 마지막서리의 미래변화에 대한 연구가 많이 부족하다. 따라서 지역규모에서 변동성이 크게 나타나는 서리 현상에 대하여 국가적으로 효율적인 적응 및 완화대책을 세우기 위해서는 보다 상세한 서리일수와 첫/마지막 서리 발생일에 대한 변화 예측 정보가 필요하다.

본 연구에서는 고해상도 지역기후모델의 모의자료를 이용하여 현재 30년(1981~2010년)에 대한 남한에서의 총 서리 일수 그리고 가을과 봄에 발생하는 첫/마지막 서리 현상의 시공간 발생 특성을 분석하였다. 그리고 현재 기간의 서리현상들에 대한 지역기후모델의 모의수준을 바탕으로 RCP(Representative Concentration Pathway) 2중(4.5, 8.5) 시나리오에 근거한 21세기 중반(2021~2050년)과 후반(2071~2100년)의 서리현상들의 변화를 전망하였다. 본 논문의 다음 절부터는 본 연구에서 이용한 자료 및 연구방법에 대해 소개하고, 정의된 현재 및 미래기간 동안의 서리현상들에 대한 연구결과를 제시하였다. 끝으로 본 연구의 결과를 요약하고 본 연구의 한계 및 향후 필요한 연구 방향들을 제시하였다.

2. 자료 및 연구방법

1) 서리현상의 정의

서리 현상은 맑고 바람이 없는 날 야간에 복사

냉각이 진행되면서 접지층 대기가 안정되고 지표면의 기온이 0℃ 이하로 하강하면서 수증기가 승화되어 발생한다(Kim, 2013). 즉, 서리현상은 다양한 기상요소(강수, 바람, 일 최저기온 등)들의 복합적인 물리과정을 통해 형성된다. 그러나 많은 선행연구들은 서리일수를 일 최저기온이 0℃ 이하인 날로 정의하여 이용하고 있다(Kwon *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2012). 특히, 지역기후모델의 모의자료를 이용한 서리현상에 대한 연구는 앞선 선행연구들처럼 일 최저기온에 대한 조건만을 이용한 연구들이 많이 이루어지고 있다(e.g., Lee *et al.*, 2012; Oh *et al.*, 2013). 이는 지역기후모델이 기온에 대한 모의수준은 관측과 비교할 만하나 강수와 바람에 대해서는 아직까지 큰 불확실성을 갖기 때문이다(Lee *et al.*, 2012; Oh *et al.*, 2013). 본 연구에서는 선행연구들과 마찬가지로 일 최저기온이 0℃ 이하인 날을 서리가 발생할 날로 정의하였다. 일반적으로 서리는 가을에 시작하여 이듬해 봄까지 발생하므로 첫 서리일은 그 해 가을에 처음으로 발생한 날을, 마지막 서리일은 첫 서리가 발생한 다음 해 봄에 마지막으로 서리가 발생한 날로 정의하였다. 따라서 총 서리일수는 첫 서리가 발생한 날부터 마지막 서리가 나타난 기간 중 서리 현상이 발생한 날의 수로 정의하였다.

2) 자료 및 연구방법

본 연구에서는 남한의 총 서리일수 및 첫/마지막 서리의 시공간적 발생특성 및 미래전망을 수행하기 위해 Suh *et al.*(2016)의 연구를 통해 산출된 지역기후모델 RegCM4.0(Regional Climate Model version 4.0, Giorgi *et al.*, 2012)의 일 최저기온 자료를 이용하였다. Figure 1과 Table 1은 Suh *et al.*(2016)에서 이용된 RegCM4.0의 모의영역과 모의환경을 보여준다. 모의영역은 동북아시아 영역으로 200×180(2,500km×2,250km)개의 수평격

Figure 1. Model domain and topography for the 12.5km grid spacing. Black box indicates the analysis domain, South Korea.

Table 1. The configuration of RegCM4.0 used in this study.

Content	Description
Domain	12.5km Horizontal resolution Central Lat. /Lon. :37.5°N, 127.5°E 200(Lon.)×180(Lat.)
Map projection	Lambert Conformal
Vertical layers(top)	23 vertical sigma levels (50hPa)
PBL scheme	Holtslag
Cumulus parameterization scheme	MIT-Emanuel
Land surface model	NCAR CLM3.5
Short/Longwave radiation scheme	NCAR CCM3
Boundary data	HadGEM2-AO
Spectral nudging	Yes
Simulation period	1, Present period: Jan.1981-Dec.2010 2, Future period: Jan.2021-Dec.2100

자로 이루어져 있다. 모델의 수평해상도는 12.5km이며 연직 좌표계는 23층의 시그마 좌표계로 구성되었다. 그리고 적운 모수화 방안으로 Emanuel (1991) 방안을, 행성경계층 모수화는 Holtslag *et*

al. (1990) 방안을, 복사전달은 NCAR(National Center for Atmospheric Research) CCM3(Community Climate Model version 3, Kiehl *et al.*, 1996) 방안을, 그리고 지면 모수화는 NCAR

CLM3.5(Community Land Model version 3.5, Oleson *et al.*, 2008)가 이용되었다. RegCM4.0의 측면 경계조건으로는 기상청/국립기상과학원에 서 제공한 HadGEM2-AO(Hadley Center Global Environmental Model version2 coupled with the Atmosphere-Ocean)의 6시간 간격의 모의자료가 이용되었다(Baek *et al.*, 2013).

미래기후 변화 전망 연구에서 필요한 복사강제력의 변화 시나리오는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서에서 사

용된 새로운 온실가스 농도 시나리오인 RCP 시나리오를 기반으로 하고 있다(IPCC, 2014). RCP 시나리오는 이산화탄소, 메탄, CFCs 등의 온실가스의 시간변화뿐만 아니라 태양복사와 화산폭발과 같은 자연 강제력 그리고 황, 바이오메스 등의 에어로졸과 오존 등을 종합적으로 고려한 시나리오이며 2100년까지의 복사강제력 크기에 따라 총 4종(RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 시나리오로 나누어진다(Moss *et al.*, 2008). 이때, RCP2.6 시나리오는 온실가스 저감정책을 최대한 수행했을 때를 가정한

Table 2. Observed stations by Korea Meteorological Administration (KMA) used in this study.

StnID	Lat.(°N)	Lon.(°E)	H(m)	Station name	Stn ID	Lat.(°N)	Lon.(°E)	H(m)	Station name
100	37,687	128,759	842,52	Daegwallyeong	226	36,488	127,734	174,1	Boeun
101	37,903	127,736	76,82	Chuncheon	232	36,78	127,119	24,89	Cheonan
105	37,751	128,891	25,91	Gangneung	235	36,327	126,557	15,29	Boryeong
108	37,571	126,966	86,02	Seoul	236	36,272	126,921	11,35	Buyeo
114	37,338	127,947	149,81	Wonju	238	36,106	127,482	171,26	Geumsan
119	37,272	126,985	33,58	Suwon	243	35,73	126,717	10,68	Buan
127	36,97	127,953	114,06	Chungju	244	35,612	127,286	246,85	Imsil
129	36,777	126,494	25,93	Seosan	245	35,563	126,866	44,11	Jeongeup
131	36,639	127,441	57,36	Cheongju	247	35,405	127,333	89,7	Namwon
133	36,372	127,372	68,28	Daejeon	256	35,075	127,239	74,38	Suncheon
135	36,22	127,994	242,54	Chupungnyeong	260	34,689	126,92	45,22	Jangheung
138	36,033	129,38	1,88	Pohang	261	34,554	126,569	13,74	Haenam
140	35,993	126,706	25,57	Gunsan	262	34,618	127,276	53,27	Goheung
143	35,885	128,619	57,64	Daegu	272	36,872	128,517	210,21	Yeongju
146	35,821	127,155	53,48	Jeonju	273	36,627	128,149	170,36	Mungyeong
156	35,173	126,892	70,53	Gwangju	277	36,533	129,409	41,23	Yeongdeok
162	34,845	128,436	31,7	Tongyeong	278	36,356	128,689	81,09	Uiseong
165	34,817	126,381	37,88	Mokpo	279	36,131	128,321	47,86	Gumi
168	34,739	127,741	66,05	Yoesu	281	35,977	128,951	94,1	Yeongcheon
192	35,208	128,119	21,32	Jinju	284	35,671	127,911	220,88	Geochang
202	37,489	127,494	47,01	Yangpyeong	285	35,565	128,17	32,66	Hapcheon
203	37,264	127,484	77,79	Icheon	288	35,492	128,744	12,6	Miryang
211	38,06	128,167	198,6	Inje	289	35,413	127,879	138,57	Sancheong
212	37,684	127,88	140,59	Hongcheon	295	34,817	127,926	44,41	Namhae
221	37,159	128,194	263,21	Jecheon	49 station				

시나리오이고, RCP8.5 시나리오로 갈수록 온실가스 저감정책을 상대적으로 적게 수행한 경우를 가정한 시나리오이다. 본 연구에서는 미래 기후변화 시나리오 중에서 2100년경에 복사강제력이 약 $4.5\text{W}/\text{m}^2$ 에서 안정화 되는 시나리오인 RCP4.5와 복사강제력이 $8.5\text{W}/\text{m}^2$ 를 넘는 RCP8.5 시나리오를 이용하여 산출된 모의자료를 이용하였다.

본 연구에서는 남한에서의 서리현상들에 대한 모의수준 분석 및 미래 전망을 수행하기 위해 현재 및 RCP 2종(RCP4.5, RCP8.5)시나리오에 따른 21세기 중·후반을 각각 30년간(현재: 1981~2010년, 21세기 중반: 2021~2050년, 21세기 후반: 2071~2100년)의 자료로 정의하였다. 그리고 현재기간 동안의 서리현상들에 대한 RegCM4.0의 모의수준을 분석하기 위해 남한의 49개 유인관측소의 일 최저기온 자료를 이용하였다(Table 2). 관측지점의 선정은 1981년부터 2010년 동안 일 최저기온에 대한 품질의 우수성과 자료의 연속성을 기준으로 하였다. 격자형태의 모의자료와 불규칙하게 분포되어 있는 관측 자료와의 공간일치를 위해 이중선형 보간법을 이용하여 RegCM4.0의 일 최저기온 모의자료를 관측지점의 위·경도에 위치하는 값으로 변환한 후 분석을 수행하였다. 이 때 모델 격자점들과 관측 지점간의 고도 차이에 따른 기온감률($\pm 0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$)을 적용하여 고도보정 또한 함께 실시하였다.

3. 연구 결과

1) 최저기온에 대한 모의수준

서리 연구에 있어서 일 최저기온의 분포가 가장 중요한 요인이기 때문에 먼저 남한의 일 최저기온의 공간분포에 대해 분석을 수행하였다. Figure 2는 최근 30년(1981~2010년) 자료 중 여름을 제외

한 전체일의 관측 자료와 RegCM4.0 자료의 평균 일 최저기온 그리고 모델과 관측간의 차이를 나타낸 것이다. 여름을 제외한 일 최저기온은 서리일수와 관련이 크며 전반적으로 높은 고도에 위치한 강원도 산간지역은 낮게 해안지역이나 도시 지역으로 갈수록 높게 나타나며, RegCM4.0은 이러한 일 최저기온의 공간분포 특성을 관측과 비슷하게 모의하고 있다. 그러나 RegCM4.0은 관측보다 평균 약 1.3°C 정도 일 최저기온을 낮게 모의하는 특성을 보이고 있으며 해안지역과 도시지역으로 갈수록 그 차이는 더 커지는 것을 볼 수 있다. Figure 3은 최근 30년(1981~2010년) 동안의 가을철 관측과 RegCM4.0의 평균 일 최저기온 그리고 모델과 관측간의 차이를 나타낸 것이다. 가을철 최저 기온은 첫 서리 발생과 관계가 있으며 전반적으로 Figure 2와 비슷한 공간 분포를 보이고 있다. RegCM4.0은 관측보다 평균 약 1.6°C 정도 일 최저기온을 낮게 모의하는 특성을 보였다. 마지막 서리 발생과 관련이 있는 봄철 일 최저기온의 모의특성을 관측과 비교해본 결과(Figure 4), 전반적으로 Figure 3과 비슷한 공간 분포를 보이며 RegCM4.0은 관측보다 평균 약 1.2°C 정도 일 최저기온을 낮게 모의하는 특성을 보였다.

위의 비교결과를 종합해 볼 때, 모델은 강릉, 포항, 울산, 통영, 여수 등의 동·남해안과 서울을 포함한 경기 북부, 대구와 문경 등의 경상내륙 일부, 그리고 전주와 광주 등의 서해안 내륙 등에서 관측보다 최저기온을 낮게 모의하는 특성을 보였다. 기온에 대한 모델의 이러한 계통적 편차는 이미 많은 연구들에서 밝혀진 바와 같이 주로 지역 기후모델에 처방되는 내·외부의 불완전성 등에 의한 것으로 보인다(Giorgi *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2012; Suh *et al.*, 2016). 따라서 미래 기후변화 전망에 대한 신뢰수준을 높이기 위해서는 기본적으로 모델의 모의수준 개선연구가 필요함을 제시한

Figure 2. Spatial distribution of the daily minimum temperature(°C) of a) Observation (Obs.), b) RegCM4.0 and c) their differences between RegCM4.0 and Obs. during all seasons in the current 30-year (1981-2010) except for summer (JJA).

Figure 3. Spatial distribution of the daily minimum temperature(°C) of a) Observation (Obs.), b) RegCM4.0 and c) their differences between RegCM4.0 and Obs. during autumn (SON) in the current 30-year (1981-2010).

Figure 4. Same as Figure 3 except for spring (MAM).

다(Giorgi and Shields, 1999; Oleson *et al.*, 2008).

2) 서리 발생 특성에 대한 모의수준

Figure 5는 1981년부터 2010년까지 30년간 첫 서리시작부터 마지막 서리발생일 동안 RegCM4.0이 모의한 남한에서의 총 서리일수의 평균 공간분포를 관측과 함께 나타낸 것이다. 관측 서리일수는 내륙지역의 대부분에서 90~130일의 분포를 보이며 고도가 높은 산악지역에서는 140일 이상인 반면, 서울, 대전, 대구, 광주 등 대도시 지역은 약 88일, 포항, 통영, 여수 등 동·남해안 지역은 약 60일 이하의 분포를 보이고 있다. RegCM4.0 또한 고도가 높은 산악지역에서는 약 130일 이상으로 관측과 비슷한 분포를 모의한 반면 서울, 대전, 대구, 광주 등 대도시 지역은 약 110일, 포항, 통영,

여수 등 동·남해안 지역은 약 90일 이상으로 모의하면서 관측보다 많은 서리 발생일을 보이고 있다.

Figure 6은 1981년부터 2010년까지 남한에서의 30년간 첫 서리 발생일에 대한 RegCM4.0의 평균 공간분포를 관측과 함께 나타낸 것으로 발생일은 줄리안 데이(Julian day)로 나타내었다. 첫 서리일은 강원도 산간과 같이 고도가 높은 지역은 약 261일로 남한 평균 278일에 비해 일찍 나타났으며 서울과 같은 대도시지역은 약 287일, 포항, 여수 등 동·남해안은 약 302일로 늦게 나타났다. RegCM4.0의 모의결과 또한 마찬가지로 고도가 높은 지역에서 첫 서리일이 가장 빠르게(약 262일) 나타나고 있으며 대도시지역(약 268일)과 해안 지역(약 280일) 순으로 첫 서리 발생일이 모의되었

Figure 5. Spatial distribution of the total frost days of a) Observation (Obs.), b) RegCM4.0 and c) their differences between RegCM4.0 and Obs. for the current 30-year (1981-2010) period.

Figure 6. Same as Figure 5 except for the first frost date.

다. 관측과 비교할 때 모델은 고도가 높은 지역의 경우 약 1일 정도 관측보다 늦게 모의하나 다른 평야나 대도시 지역들에 비해 우수한 모의수준을 보였다. 반면 대도시지역은 약 19일 정도, 동·남해안은 약 22일 정도 관측보다 빠르게 모의함으로서 상대적으로 낮은 모의수준을 보였다.

마지막 서리 발생일에 대한 RegCM4.0의 모의수준을 Figure 7에 나타내었다. 관측의 경우 마지막 서리일은 강원도 산간을 중심으로 한 고도가 높은 지역에서는 약 116일로 남한 평균 96일에 비해 늦게 끝났으며 서울과 같은 대도시지역은 약 85일, 포항, 여수 등 동·남해안은 약 73일 내외로 일찍 끝나는 것으로 나타났다. RegCM4.0의 모의결과 또한 관측과 마찬가지로 고도가 높은 지역은 늦게(약 112일), 그리고 대도시지역(약 101일)과 해안지역(약 92일)의 순으로 서리 종료일을 늦게 모

의 하였다. 관측과 비교해보면 고도가 높은 지역에서는 마지막 서리 발생일이 약 4일 일찍 모의되었으나 상대적으로 다른 지역들에 비해 우수한 모의수준을 보였다. 반면 대도시지역은 약 16일 정도, 동·남해안은 19일 정도 관측보다 더 늦게 마지막 서리 발생일을 모의하여 상대적으로 낮은 모의수준을 보였다. 우리나라 평균 서리 현상에 대한 모의수준을 보다 정량적으로 분석해 본 결과(Table 3), 서리일수와 첫 서리 발생일에 대한 공간 상관계수는 각각 0.72와 0.73로 높게 나타난 반면, 마지막 서리 발생일의 공간 상관계수는 0.59로 상대적으로 낮게 나타났다. 편의(bias)의 경우 첫 서리일 약 6.6일 정도 빠르게 모의하였고 마지막 서리일의 경우 약 3.3일 늦게 모의하여 결과적으로 서리일수를 약 10.8일 많게 모의하는 특성을 보였다. 따라서 공간변동성 측면에서 보았을 때

Figure 7. Same as Figure 5 except for the last frost date.

Table 3. Simulation skills of RegCM4.0 for the frost events over South Korea.

Extreme events (units)	Bias	RMSE	Spatial corr.
Frost days (day)	10.8	20.9	0.72
First frost date (Julian day)	-6.6	10.3	0.73
Last frost date (Julian day)	3.3	9.6	0.59

RegCM4.0은 총 서리일수와 첫 서리 발생일에 대한 모의수준이 마지막 서리 발생일 모의 보다 우수하지만 발생 빈도 또는 발생 시작 일에 대한 시기 측면에서는 마지막 서리 발생일 모의에서 상대적으로 더 나은 모의수준을 보였다.

Figure 8과 Table 4는 현재 30년(1981~2010년) 동안의 관측과 RegCM4.0이 모의한 우리나라 서리현상들의 경년변동을 나타낸 것이다. 관측과 RegCM4.0 모두 우리나라의 서리일수는 1981년부터 2010년 동안 계속해서 줄어드는 경향을 보이고 있으며 평균적으로 관측은 0.41일/년 감소를, 모델은 0.19일/년 감소를 보였다. 또한 RegCM4.0은 관측보다 서리일수의 경년변동성을 상대적으로 작게 모의하는 특성을 보였다(Variance Ratio: 0.75). 첫 서리 발생일은 현재 30년 동안 관측 및 모의자료 모두 늦어지는 경향을 보이고 있으며 평균적으로는 관측은 0.24일/년, RegCM4.0은 0.09일/년 정도 늦어지는 것으로 모의하였다. 이 때 RegCM4.0은 관측보다 경년변동성을 더 크게 모의하는 특성을 보였다(Variance Ratio: 1.15). 반면 마지막 서리 발생일의 경우 관측 및 모의자료 모두 빨라지는 경향을 보이고 있으며 평균적으로 관측은 0.25일/년, RegCM4.0은 0.21일/년 빨라지는 것으로 모의하였다. 이 때 분산비(Variance Ratio)는 1.48로 RegCM4.0이 관측보다 마지막 서리 발생일의 경년변동성을 더 크게 모의함을 알 수 있다. 전반적으로 RegCM4.0은 관측에서 나타나는 현재 30년 동안 우리나라 서리일수의 감소 추세와

첫/마지막 서리의 늦어짐과 빨라지는 변동경향 특성을 비교적 잘 모의하고 있음을 알 수 있다.

3) RCP 시나리오에 따른 서리 발생 특성 변화 전망

Figure 9는 현재(1981~2010년)와 RCP시나리오 별(4.5, 8.5) 미래(2021~2100년)기간 동안 서리 현상들의 경년변동 변화를 나타낸 것이다. 그리고 Table 5는 21세기 중반(2021~2050년)과 후반(2071~2100년)으로 구분하여 각 미래 기간 별 현재 대비 서리현상들의 변화 특성을 정리한 것이다. 전반적으로 현재 기간 동안에 나타나는 각 서리 현상들의 변화 경향 특성이 미래에도 계속해서 나타날 것으로 전망되었다. 특히 RCP4.5 시나리오의 경우 21세기 중반까지는 서리일수 감소, 첫 서리 늦어짐, 그리고 마지막 서리가 빨라지는 추세가 뚜렷하게 나타나지만 21세기 후반에 접어들수록 변화 추세가 완만해지는 것을 알 수 있다. 반면 RCP8.5 시나리오의 경우 모든 기간에 서리 현상들의 변화 추세가 크며 특히 후반으로 갈수록 더 커지는 것으로 전망하였다. 세부적으로 살펴보면 서리일수의 경우 21세기 중반까지는 RCP4.5 시나리오(-0.41일/년)가 RCP8.5(-0.31일/년) 보다 더 큰 감소 추세를 보이지만 21세기 후반으로 갈수록 RCP4.5 시나리오는 감소 추세가 약해지는 반면(-0.18일/년), RCP8.5에서는 계속해서 감소 추세(-0.38일/년)가 뚜렷하게 나타났다. 첫 서리 발생일은 미래 기간 동안 계속해서 늦어질 것으로 전망되었다. RCP4.5 시나리오의 경우 21세기 중반에

Figure 8. Inter-annual variations of frost days, first frost date, last frost date of observation and simulation results of RegCM4.0 in South Korea for the current 30-year (1981-2010) period.

Table 4. Trend and variance ratio of the frost events over South Korea for current 30-year (1981-2010) period.

Extreme events		β (day/year)	VR (Mod./Obs.)
Frost days	Obs.	-0.41	0.75
	Mod.	-0.19	
First frost date	Obs.	0.24	1.56
	Mod.	0.09	
Last frost date	Obs.	-0.25	1.48
	Mod.	-0.21

Figure 9. Inter-annual variations of frost days, first frost date, last frost date of simulation results of RegCM4.0 in South Korea for current and future climate based on RCP scenarios (4.5, 8.5).

는 0.28일/년 정도 늦어질 것으로 전망되나 21세기 후반에는 0.07일/년 늦어질 것으로 전망되어 서리 일수 변화와 마찬가지로 21세기 후반에는 늦어지는 추세가 약화 될 것으로 보인다. 반면, RCP8.5 시나리오의 경우 21세기 중반(0.25일/년)과 후반(0.39일/년) 모두 첫 서리 발생일이 점차 늦어질 것으로 전망되었으며 상대적으로 21세기 후반으로 갈수록 이러한 추세가 강해질 것으로 보인다. 마

지막 서리 발생일의 경우 현재기간의 추세처럼 계속해서 빨라질 것으로 전망되었다. RCP4.5 시나리오에서는 21세기 중반(-0.23일/년)이 21세기 후반(-0.17일/년)보다 더 큰 변화가 전망된 반면, RCP8.5 시나리오에서는 21세기 중반(-0.19일/년)보다 21세기 후반(-0.36일/년)에 상대적으로 더 큰 변화를 전망하였다. 경년변동성 측면에서 살펴보면, RCP4.5 시나리오의 서리현상들에

Table 5. Trend and variance ratio of the frost events over South Korea according to the RCP scenarios (4.5/8.5) for the mid and late 21st century.

Extreme events			β (day/year)	VR (Fut./Cur.)
Frost days	RCP4,5	Period (2021–2050)	–0.41	1.17
		Period (2071–2100)	–0.18	0.66
	RCP8,5	Period (2021–2050)	–0.31	1.21
		Period (2071–2100)	–0.38	1.40
Frist frost date	RCP4,5	Period (2021–2050)	0.28	1.03
		Period (2071–2100)	0.07	0.53
	RCP8,5	Period (2021–2050)	0.25	1.02
		Period (2071–2100)	0.39	0.86
Last frost date	RCP4,5	Period (2021–2050)	–0.23	1.12
		Period (2071–2100)	–0.17	1.02
	RCP8,5	Period (2021–2050)	–0.19	1.27
		Period (2071–2100)	–0.36	1.64

관계없이 21세기 중반이(총 서리일수의 분산비: 1.17, 첫 서리일수의 분산비: 1.03, 마지막 서리일수의 분산비: 1.12) 21세기 후반(총 서리일수의 분산비: 0.66, 첫 서리일수의 분산비: 0.53, 마지막 서리일수의 분산비: 1.02)보다 변동성이 상대적으로 더 크게 나타나 21세기 중반에 서리현상의 경년 변동성이 현재보다 더 크게 발생될 것으로 예상된다. 반면 RCP8.5 시나리오에는 첫 서리 발생일을 제외한 모든 서리현상들의 경년 변동성이 21세기 후반에 상대적으로 더 클 것으로 전망되었다. 즉, 21세기 후반의 총 서리일수와 마지막 서리 발생일의 경년 변동성이 현재보다 각각 약 1.40배, 1.64배 더 증가될 것으로 전망되어 서리현상의 경년변동성이 현재보다 더 커질 것으로 예상된다.

Figure 10은 현재(1981~2010년)대비 RCP 시나리오 별(4.5, 8.5) 21세기 중반(2021~2050년)과 후반(2071~2100년) 동안의 서리일수의 평균 변화를 공간분포로 나타낸 것이다. 전반적으로 RegCM4.0는 RCP 시나리오에 관계없이 모든 모의영역에서 서리일수가 줄어들 것으로 전망하고

있으며 상대적으로 남서쪽 해안의 감소가 좀 더 클 것으로 전망하고 있다. 21세기 중반(2021~2050년)의 경우 중부 내륙 일부지역을 제외하고 시나리오 별 차이가 크지 않을 것으로 전망하고 있다. 평균적으로 두 시나리오 모두 약 15.0~15.9일 정도 감소할 것으로 보인다. 고도가 높은 산악지역은 시나리오에 따라 약 15.7일(RCP4.5)에서 16.5일(RCP8.5) 정도 감소하고, 서울과 대전 등 대도시지역은 각각 약 15.1일(RCP4.5)에서 16.3일(RCP8.5) 정도, 포항과 통영 등 동해안지역은 약 13.0일(RCP4.5)에서 14.0일(RCP8.5), 목포와 여수 등 남해안지역은 약 17.8일(RCP4.5)에서 18.4일(RCP8.5) 정도 감소하는 것으로 전망하고 있다. 반면 21세기 후반(2071~2100년)의 경우 시나리오 별 차이가 크게 나타나는데 평균적으로 약 26.5일(RCP4.5)에서 47.7일(RCP8.5) 정도 감소하는 것으로 전망되고 있다. 고도가 높은 산악지역은 약 27.3일(RCP4.5)에서 47.3일(RCP8.5) 정도 감소할 것으로, 서울과 대전 등 대도시지역은 약 26.3일(RCP4.5)에서 47.0일(RCP8.5), 포항과 통영

Figure 10. Change of spatial distribution of total frost days over South Korea in the mid (2021-2050) and late (2071-2100) 21st century according to RCP scenarios (4.5, 8.5) compared to current climate (1981-2010).

등 동해안지역은 약 24.7일(RCP4.5)에서 45.6일(RCP8.5), 목포와 여수 등 남해안지역은 약 29.1일(RCP4.5)에서 53.1일(RCP8.5) 정도 감소할 것으로 보인다.

RCP 시나리오에 따른 첫 서리 발생일의 평균변화의 공간분포를 Figure 11에 나타내었다. 전반적으로 RegCM4.0는 RCP 시나리오에 상관없이 모든 모의 영역에서 첫 서리일이 늦어지며 특히 남해안 지역의 변화가 클 것으로 전망하고 있다. 21세기 중반(2021~2050년)의 경우 평균적으로 약 7.9일(RCP4.5)에서 9.6일(RCP8.5) 정도 늦어질 것

으로 전망된다. 고도가 높은 산악지역은 약 7.2일(RCP4.5)에서 10.0일(RCP8.5) 정도 늦어지고, 서울과 대전 등 대도시 지역은 약 8.5일(RCP4.5)에서 11.0일(RCP8.5), 포항과 통영 등 동해안지역은 약 6.7일(RCP4.5)에서 7.8일(RCP8.5), 목포와 여수 등 남해안지역은 약 13.7일(RCP4.5)에서 12.0일(RCP8.5) 정도 늦어지는 것으로 전망된다. 반면 21세기 후반(2071~2100년)에는 평균적으로 약 14.5일(RCP4.5)에서 22.2일(RCP 8.5) 정도 늦어질 것으로 전망된다. 고도가 높은 산악지역은 약 14.0일(RCP4.5)에서 23.3일(RCP8.5), 서울과 대

Figure 11. Same as Figure 10 except for the changes of the first frost date.

전 등 대도시 지역은 약 15.8일(RCP4.5)에서 23.7일(RCP8.5), 포항과 통영 등 동해안지역은 약 11.5일(RCP4.5)에서 20.7일(RCP8.5), 목포와 여수 등 남해안지역은 약 19.5일(RCP 4.5)에서 25.9일(RCP8.5) 정도 늦어질 것으로 보인다.

마지막 서리 발생일의 평균변화의 공간분포를 살펴보면(Figure 12), RegCM4.0은 RCP 시나리오에 상관없이 대부분의 모의영역에서 마지막 서리 발생일이 빨라지는 경향을 보이는데 21세기 중반 일부 지역에서 변화가 없거나(0.0일) 오히려 늦어지는 지역이(+1.1일) 나타났다. 그러나 평균적으로 21세기 중반(2021~2050년)에는 시나리오

에 따라 약 3.1일(RCP4.5), 2.3일(RCP8.5) 정도 마지막 서리 발생일이 빨라질 것으로 전망된다. 고도가 높은 산악지역은 약 4.1일(RCP4.5)에서 6.7일(RCP8.5) 빨라지고, 서울과 대전 등 대도시 지역은 약 4.0일(RCP4.5) 그리고 2.1일(RCP8.5) 정도 빨라질 것으로 예상된다. 포항과 통영 등 동해안지역의 경우 약 3.4일(RCP4.5)과 1.6일(RCP8.5) 정도, 목포와 여수 등 남해안지역은 약 1.1일(RCP4.5)과 1.6일(RCP8.5) 정도 시나리오에 따라 빨라질 것으로 전망된다. 반면 21세기 후반(2071~2100년)에는 평균적으로 약 15.0일(RCP 4.5)에서 23.5일(RCP8.5) 빨라질 것으로 전망된다. 고도가

Figure 12. Same as Figure 10 except for the changes of the last frost date.

높은 산악지역은 약 16.5일(RCP4.5)에서 25.9일(RCP8.5) 정도 빨라지고, 서울과 대전 등 대도시 지역은 약 14.9일(RCP4.5)에서 23.3일(RCP8.5), 포항과 통영 등 동해안지역은 약 14.3일(RCP4.5)에서 22.6일(RCP8.5), 목포와 여수 등 남해안지역은 약 13.5일(RCP4.5)에서 22.2일(RCP8.5) 정도 빨라질 것으로 전망된다. 전반적으로 서리현상들의 미래의 변화는 현재와 같은 방향으로 감소 그리고 늦어지거나 빨라지는 경향이 예상된다. RCP4.5 시나리오의 경우 21세기 중반까지 더 뚜렷한 변화가 나타날 것으로 전망되는 반면, RCP8.5 시나리오에서는 21세기 중반과 후반 모두

뚜렷한 변화가 예상되며 상대적으로 21세기 후반으로 갈수록 변화의 경향이 더 강화될 것으로 전망된다.

Figures 13부터 15는 21세기 중반(2021~2050년)과 후반(2071~2100년)의 RCP 시나리오 별 서리현상들의 변화에 대한 각 지역 별 변화경향을 공간분포로 나타낸 것이다. 이때 변화경향이 유의수준 5%에서 유의한 지역의 경우 '+' 표식으로 나타내었다. 전반적으로 21세기 중반에는 시나리오에 상관없이 전 지역에서 감소 경향을 보이며, 특히 남부 및 서해안 지역과 강원도 산간지역에서 감소가 뚜렷할 것으로 전망된다. 반면 21세기 후반에는

A. RCP4.5

a) Mid-21st century (day/year)

b) Late-21st century (day/year)

B. RCP8.5

a) Mid-21st century (day/year)

b) Late-21st century (day/year)

Figure 13. Change of spatial distribution in trend of total frost days over South Korea for the mid and late 21st century according to the RCP scenarios (4.5, 8.5).

RCP4.5 시나리오의 경우 전라남도 산간지역을 중심으로 감소가 둔화될 것으로 전망되며, RCP8.5 시나리오의 경우 전 지역에서 감소 경향이 뚜렷할 것으로 보인다. 이러한 변화경향은 대부분 지역에서 유의수준 5%에서 유의할 것으로 나타났다. 첫 서리 발생일의 경우 21세기 중반에는 시나리오에 상관없이 전 지역에서 늦어질 것으로 전망되며 이는 유의수준 5%에서 유의한 결과로 나타났다. 그러나 21세기 후반에는 시나리오에 따른 큰 차이를 보였다. 즉, RCP4.5의 경우 강원도 및 산간지역에서는 21세기 중반과 유사하게 첫 서리 발생일

이 늦어질 것으로 전망되었으나 해안가 지역(보령 연 0.1일, 목포 연 0.03일, 해남 연 0.08일 등)에서 늦어지는 추세가 약화되는 것을 알 수 있다. 이는 RCP4.5 시나리오에서 기온의 온난화 추세가 해안가를 중심으로 21세기 후반에는 약화됨을 보였던 NIMR(2012) 연구결과와 일치한다. 반면, RCP8.5 시나리오의 경우 21세기 후반으로 갈수록 첫 서리 발생일이 더 늦어지는 추세가 강화될 것으로 보이며 일부지역들(춘천, 인제, 홍천, 영덕, 합천, 밀양)을 제외한 대부분의 지역에서 유의한 변화가 전망된다. 마지막 서리발생일의 경우 전반적으로 모

A. RCP4.5

a) Mid-21st century (day/year)

b) Late-21st century (day/year)

B. RCP8.5

a) Mid-21st century (day/year)

b) Late-21st century (day/year)

Figure 14. Same as Figure 13 except for the first frost date.

든 지역에서 더 빨라지는 경향을 보이는데 상대적으로 해안보다는 내륙에서 더 큰 변화가 예상된다. 21세기 중반에는 RCP4.5 시나리오에서는 전 지역에서 빨라지며, RCP8.5 시나리오에서는 서해안(보령 연 0.1일)과 남해안(장흥 연 0.2일)의 일부 지역을 제외하고 대체로 빨라질 것으로 보인다. 21세기 후반의 경우 RCP4.5 시나리오에서 일부 지역들(보은 연 0.18일, 남원 연 0.12일)을 제외하고 전 지역에서 현재보다 더 빨라질 것으로 전망되며, RCP8.5 시나리오에서는 모든 지역에서 더 뚜렷한 변화 추세가 전망되었다. 본 연구에서의 첫/

마지막 서리 발생일이 각각 늦어지고 빨라질 것으로 전망된 연구결과는 현재보다 미래에 남한에서의 여름일수가 더 증가할 것으로 전망한 선행연구들(Lee *et al.*, 2012; Jeung *et al.*, 2013)의 연구결과들과 유사하다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 남한에서의 서리현상들(서리일수, 첫/마지막 서리 발생일)에 대한 시공간 변동

A. RCP4.5

a) Mid-21st century

(day/year)

b) Late-21st century

(day/year)

B. RCP8.5

a) Mid-21st century

(day/year)

b) Late-21st century

(day/year)

Figure 15. Same as Figure 13 except for the last frost date.

특성 및 미래 변화 전망을 조사하기 위해 고해상도 지역기후모델 RegCM4.0(수평해상도: 12.5km)이 모의한 현재(1981~2010년) 및 미래(2021~2100년)기간의 일 최저기온 자료를 이용하였다. 이 때 현재기간 동안의 서리현상들에 대한 RegCM4.0의 모의수준을 평가하기 위해 기상청에서 제공하는 남한 49개 관측지점의 일 최저기온 자료를 이용하였다. 현재 대비 미래 서리 현상들의 변화를 전망하기 위해 2021년부터 2050년을 21세기 중반으로, 2071년부터 2100년을 21세기 후반으로 정의하였고, RCP4.5와 8.5시나리오에 따라 시공간 특성 변화를 분석하였다. 이때, 격자형태의 모의자료는

이중선형보간법을 이용하여 49개 관측지점의 위경도 값으로 재 산출 하였으며 이때 고도보정($\pm 0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) 또한 함께 수행하였다.

현재 기간 30년(1981~2010년) 동안의 일 최저기온에 대한 모의수준 평가 결과, 전반적으로 RegCM4.0은 관측에서 나타나는 지리 및 지형적 위치에 따른 일 최저기온의 공간분포 특성을 각 계절 별로 비교적 잘 모의하였다. 그러나 관측과 모델의 차는 강원도 산간지역은 낮게, 해안지역이나 도시지역으로 갈수록 큰 차이를 보였다. 이러한 일 최저기온에 대한 모의수준 특성은 서리일수 모의에 영향을 주었다. 평균적으로 보았을 때,

RegCM4.0은 관측보다 약 10.8일 정도 서리일수를 더 많이 모의하는 특성을 보였으며 첫 서리 발생일의 경우 약 6.6일 정도 관측보다 빠르게, 마지막 서리 발생일의 경우 약 3.3일 정도 느리게 모의하는 특성을 보였다. 또한 RegCM4.0은 관측에서 나타나는 서리일수의 감소 경향을 비교적 잘 모의하고 있으며 상대적으로 관측보다는 감소경향을 약하게 모의하는 특성을 보였다(관측: -0.41 일/년, RegCM4.0: -0.19 일/년). 첫 서리 발생일의 경우 관측 및 RegCM4.0 모두 늦어지는 경향을 보였으며 관측은 0.24 일/년을, RegCM4.0은 0.09 일/년 늦어짐을 보였다. 반면, 마지막 서리 발생일의 경우 현재 30년 동안 관측과 RegCM4.0 모두 빨라지는 경향을 보였다(관측: -0.25 일/년, RegCM4.0: -0.21 일/년).

RCP 시나리오에 따른 남한에서의 미래의 서리현상의 변화는 전반적으로 현재 기간 동안에 나타나는 각 서리 현상들의 변화 특성이 미래에도 지속해서 나타날 것으로 전망되었다. RCP4.5 시나리오의 경우 21세기 중반까지는 총 서리일수 -0.41 일/년, 첫 서리 0.28 일/년, 마지막 서리 -0.23 일/년의 변화경향이 전망되었고 21세기 후반에는 서리일수 -0.18 일/년, 첫 서리 0.07 일/년, 마지막 서리 -0.17 일/년의 변화경향을 보여 상대적으로 21세기 후반으로 갈수록 각 서리현상들에게서 나타나는 변동경향이 약화될 것으로 전망되었다. 반면, RCP8.5 시나리오의 경우 21세기 중반과 후반의 변화가 각각 서리일수 연 $-0.31/-0.38$ 일, 첫 서리 연 $0.25/0.39$ 일, 마지막 서리 연 $-0.19/-0.36$ 일의 변화를 보여 21세기 중반보다는 후반으로 갈수록 변화경향이 더 강화될 것으로 전망된다. 경년 변동성 측면에서 살펴보면, RCP4.5 시나리오는 서리현상들에 관계없이 21세기 중반이 후반보다 상대적으로 더 큰 변동성이 전망되어 현재보다 21세기 중반에 서리현상의 경년 변동성이 증가될 것

으로 예상된다. 반면, RCP8.5 시나리오에서는 첫 서리 발생일을 제외한 모든 서리현상들의 경년 변동성이 21세기 후반에 상대적으로 더 클 것으로 전망되었다.

본 연구에서는 고해상도 지역기후모델을 이용하여 우리나라에서의 서리현상들의 시공간 변동 특성 및 RCP 시나리오에 따른 미래 변화를 살펴보고자 하였다. 본 연구에서 제시한 서리일수 및 첫/마지막 서리 발생일의 시공간 변화 결과는 일상생활을 포함한 농업, 건설업, 냉난방기 사업 등 다양한 산업에서 향후 중장기 계획 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히, 본 연구에서 제시한 첫/마지막 서리 발생일의 변화정보는 기후변화와 관련하여 나타날 농작물의 재배시기의 변화를 보다 효율적으로 파악하는 데 매우 유용한 정보로 활용될 것으로 판단된다. 그러나 지역기후모델에 제시하는 전망자료는 이용하는 모델과 모의 환경, 그리고 시나리오에 따라 큰 영향을 받기 때문에 보다 다양한 조건하에서 산출된 다수의 지역기후모의 정보를 활용할 필요가 있다. 그리고 편의 보정 및 앙상블 기법 연구를 통한 모의수준 개선과 불확실성 감소를 위한 연구가 또한 함께 수행되어야 할 것이다. 앞에서 서리일수 정의 방법에서 언급했듯이 서리현상은 일 최저기온뿐만 아니라 강수의 발생유무, 그리고 바람에 의한 연직 혼합 등과 같은 다양한 기상요소에 복합적으로 영향을 받는다. 따라서 보다 현실적인 기상조건을 고려한 서리현상 정의 방법을 이용한다면 본 연구보다 향상된 서리현상에 대한 지역기후모델의 모의수준 평가 및 미래 전망 정보를 제시할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 한국기상산업진흥원(KMIPA2015-2084)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Back, H. J., Lee, J. H., Lee, H. S., Hyun, Y. -K., Cho, C. -H., Kwon, W. -T., Marzin, C., Gan, S. Y., Kim, M. -J., Choi, D. -H., Lee, J. -H., Lee, J. -H., Boo, K. -O., Kang, H. -S., and Byun, Y. -H., 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(5), DOI:10.1007/s13143-013-0053-7.
- Bonsal, B. R., Zhang, X., Vincent, L. A., and Hogg, W. D., 2001, Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada, *Journal of Climate*, 14, 1959-1976.
- Chmielewski, F-M., Muller, A., and Bruns, E., 2004, Climate change and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000, *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 69-78.
- Emanuel, K.A., 1991, A scheme for representing cumulus convection in large-scale models, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, 2313-2335.
- Frich, P., Alexander, L. V., della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A., and Peterson, T., 2002, Global changes in climatic extremes during the 2nd half of the 20th century, *Climate Research*, 19, 193-212.
- Giorgi, F. and Shields, C., 1999, Tests of precipitation parameterization available in the latest version of the NCAR regional climate model (RegCM) over the continental United States, *Journal of Geophysical Research*, 104, 6353-6375.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuneoglu, T. T., Cozzini, S., Guttler, I., O'Brien, T. A., Tawfik, A. B., Shalaby, A., Zakey, A. S., Steiner, A. L., Stordal, F., Sloan, L. C., and Brankovic, C., 2012, RegCM4.0: Model description and preliminary test over multiple CORDEX domains, *Climate Research*, 52, 7-29.
- Holtzlag, A. A. M., De Bruijn, E. I. F., and Pan, H. L., 1990, A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, *Monthly Weather Review*, 118, 1561-1575.
- Hong, S. Y., 2014, Future projection of extreme climate simulated by RegCM4.0 with a high resolution based on the RCP scenarios in the Republic of Korea, *Department of Atmospheric science Graduate School Kongju National University*, 1-87 (in Korean).
- Hong, S. Y., Oh, S. G., Suh, M. S., Lee, D. K., Ahn, J. B., and Kang, H. S., 2013, Future Climate Changes over North-East Asian Region Simulated by RegCM4.0 Based on the RCP Scenarios, *Journal of Climate Research*, 8(1), 27-44 (in Korean).
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007, Synthesis report*, Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) *IPCC (in Geneva, Switzerland)*, 104pp.
- IPCC, 2014, *Climate Change, 2014: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups, I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K., and Meyer, L. A. (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
- Jeung, S. J., Sung, J. H., and Kim, B. S., 2013, Change

- Projection of Extreme Indices using RCP Climate Change Scenario, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(11), 1089-1001 (in Korean).
- Kiehl, J. T., Hack, J. J., Bonan, G. B., Boville, B. A., Briegleb, B. P., Williamson, D. L., and Rasch, P. J., 1996, Description of NCAR Community Climate Model (CCM3), *NCAR Technical Note NCAR/TN-420+STR*, 152pp.
- Kim, J. A., 2013, Spatial Distributions and Long-term Variability of the Latest Frost Days in Korea, *Department of Environmental Atmospheric Sciences, Graduate School, Pukyong National University*, 1-44.
- Klein Tank, A. M. G. and Können, G. P., 2003, Trend in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe 1946-99, *Journal of Climate*, 16, 3665-3680.
- Kwon, Y. A., 1995, The Climatological Characteristics of Frost in Korea, *Master's Program in Geography Graduate School of Kon-Kuk University*, 1-55 (in Korean).
- Kwon, Y. A., 2006, The Spatial Distribution and Recent Trend of Frost Occurrence Days in South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 41(3), 361-372 (in Korean).
- Kwon, Y. A., Lee, H. S., Kwon, W. T., and Boo, K. O., 2008, The Weather Characteristics of Frost Occurrence Days for Protecting Crops against Frost Damage, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(6), 824-842 (in Korean).
- Lee, J. W. and Hong, S. Y., 2014, Potential for added value to downscaled climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model, *Theoretical and applied climatology*, 117(3-4), 667-677.
- Lee, K. M., Baek, H. J., Park, S. H., Kang, H. S., and Cho, C. H., 2012, Future Projection of Changes in Extreme Temperatures using High Resolution Regional Climate Change Scenario in the Republic of Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 47(2), 208-225 (in Korean).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2014, *Preventing and Responding to Agricultural Disasters Caused by Climate Change*, 1-248.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamargue, J. F., Mannig, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., Van Vuuren, D., Weyant, J., Wibanks, T., Van Ypersele, J. P., and Zurek, M., 2008, *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies, Technical Summary*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 25pp.
- NIMR, 2012, *Global Climate Change Report for Response to IPCC 5th Assessment Report 2012*, National Institute of Meteorological Research, 100p.
- Oh, S. G., Suh, M. S., and Cha, D. H., 2013, Impact of lateral boundary conditions on precipitation and temperature extremes over South Korea in the CORDEX regional climate simulation using RegCM4.0, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(4), 497-509.
- Oh, S. G., Suh, M. S., Cha, D. H., and Choi, S. J., 2011, Simulation Skills of RegCM4 for Regional Climate over CORDEX East Asia driven by HadGEM2-AO, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32(7), 732-749 (in Korean).
- Oleson, K. W., Niv, G. Y., Yang, Z. L., Lawrence, D. M., Thornton, P. E., Lawrence, P. J., Stöckli, R., Dickinson, R. E., Bonan, G. B., Levis, S., Dai, A., and Qian, T., 2008, Improvements to the community land model and their impact on the hydrological cycle, *Journal of Geophysical Research*, 113,

- G01021, doi:10.1029/2007JG000563.
- Park, C. Y., 2015, The classification of extreme climate events in the Republic of Korea, *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 21(2), 394-410 (in Korean).
- Shim, K. M., Kim, G. Y., Roh, K. A., Jeong, H. C., and Lee, D. B., 2008, Evaluation of Agro-Climatic Indices under Climate Change, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 10(4), 113-120 (in Korean).
- Suh, M. S. and Lee, D. K., 2004, Impact of land use/cover changes on surface climate over East Asia for extreme climate cases using RegCM2, *Journal of Geophysical Research*, 109, 1984-2012.
- Suh, M.-S., Oh, S.-G., Lee Y.-S., Ahn, J.-B., Cha, D.-H., Lee, D.-K., Hong, S.-Y., Min, S.-K., Park, S.-C., and Kang, H. S., 2016, Projection of high resolution climate change for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 1: Surface air temperature, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52(2), doi:10.1007/s1314-016-0017-9.
- Yarushnykov, V. V. and Blanke, M. M., 2005, Alleviation of frost damage to pear flowers by application of gibberellin, *Plant Growth Regulation*, 45, 21-27.
- Yoon, S. T., 2005, Effect of Global Warming and Coping with Vulnerability of Agricultural Production, *Journal of the Korean Society of international Agriculture*, 17(3), 199-207.
- Yun, K. S., Heo, K. Y., Chu, J. E., Ha, K. J., Lee, E. J., Choi, Y., and Kitoh, A., 2012, Changes in climate classification and extreme climate indices from a high-resolution future projection in Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 48(3), 213-226.
- Yun, S. H., Im, J. N., Lee, J. T., Shim, K. M., and Hwang, K. H., 2001, Climate Change and Coping with Vulnerability of Agricultural Productivity, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 3(4), 220-237 (in Korean).
- Zhai, P., Zhang, X., Wan, H., and Pan, X., 2005, Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China, *Journal of Climate*, 18, 1096-1108.

책임편집: 장동호

영문교열: 이은걸