

Study Note

기후변화에 따른 수도권 생물계절 반응 변화에 관한 연구

박효민 · 김민경 · 이상돈

이화여자대학교 환경공학과

Adaption of Phenological Events in Seoul Metropolitan and Suburbs to Climate Change

Hyomin Park · Minkyung Kim · Sangdon Lee

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

요약: 산업의 발달로 인해 지구의 온도는 계속해서 상승하고 있으며, 우리나라의 수도권은 인구의 50.4%가 밀집해 있다. 그러므로 다른 지역에 비해 온실가스의 배출량이 많고 이로 인한 도시의 온도 상승이 높을 것으로 예상된다. 이러한 도시의 온도 상승은 도시 생태계 및 인간의 생활에 영향을 미치므로 이에 대한 대책 수립이 필요하다. 그러므로 본 연구는 수도권 7개 관측소(강화, 서울, 수원, 양평, 이천, 인천, 파주)에서 관측된 2-4월 평균온도와 매화(*Prunus mume*), 개나리(*Forsythia koreana*), 진달래(*Rhododendron mucronulatum*), 벚나무(*Prunus serrulate*), 복숭아(*P. persica*), 배나무(*Pyrus serotina*)의 개화일을 이용하여 과거부터 현재까지 도시화로 인한 식물계절의 변화를 분석하였다. 그리고 두개의 극단적인 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오인 RCP 2.6 및 RCP 8.5 시나리오를 이용하여 향후 수도권의 미래 기후를 예측하고 이에 따른 식물계절의 반응을 예측하여 온실가스 저감 정책의 차이에 따른 식물계절 개화 시기의 차이를 분석하였다. 그 결과 1900년대부터 2019년까지 식물계절은 앞당겨지고 있으며, 지금과 같은 온실가스의 배출이 이뤄질 경우 수도권의 FFD (first flowering date)는 현재보다 18-29일 앞당겨지고, 이는 전국 평균 FFD보다 더 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 수도권의 FFD는 더 빠를 것으로 예상되는데, FFD는 온도변화와 상관관계 높기 때문이다. 식물계절의 변화는 생태계에서 서로 상호작용하는 종들의 먹이사슬의 불일치를 야기하여 생태계의 파괴로 이어질 수 있다. 그러므로 도시화로 인한 온도 증가와 이로 인해 발생하는 FFD 변화에 대한 대책 마련이 필요하다.

주요어: 개화시기, RCP, 서울 및 수도권, 생물계절, 먹이사슬

Abstract: The rapid advance of technology has accelerated global warming. As 50.4 percent of South Korea's population is concentrated in the Seoul Metropolitan Area, which has become a considerable emitter of greenhouse gases, the city's average temperature is expected to increase more rapidly than in other areas in the country. A rise in the average temperature would affect everyday life and urban ecology; thus, appropriate measures to cope with the forthcoming disaster are in need.

First Author: Hyomin Park, Tel: +82-2-3277-3774, E-mail: hmpark@ewha.ac.kr, ORCID: 0000-0003-1128-8874

Corresponding Author: Sangdon Lee, Tel: +82-2-3277-3545, E-mail: lsd@ewha.ac.kr, ORCID: 0000-0002-3282-873X

Co-Author: Minkyung Kim, Tel: +82-2-3277-3774, E-mail: envicol@ewha.ac.kr, ORCID: 0000-0002-8954-456X

Received: 2 December, 2022. Revised: 9 January, 2023. Accepted: 2 February, 2023.

This study analyzed the changes in plant phenological phases from the past to the present based on temperatures (average temperature of Feb, Mar, April) observed in seven different weather stations near the Seoul Metropolitan Area (Ganghwa, Seoul, Suwon, Yangpyeong, Icheon, Incheon, and Paju) and the first flowering dates of Plum tree (*Prunus mume*), Korean forsythia (*Forsythia koreana*), Korean rosebay (*Rhododendron mucronulatum*), Cherry tree (*Prunus serrulate*), Peach tree (*Prunus persica*), and Pear tree (*Pyrus serotina*). Then, RCP (Representative Concentration Pathways) 2.6 and 8.5 scenarios were used to predict the future temperature in the Seoul Metropolitan Area and how it will affect plant phenological phases. Furthermore, the study examined the differences in the flowering dates depending on various strategies to mitigate greenhouse gases. The result showed that the rate of plant phenological change had been accelerated since the 1900s. If emission levels remain unchanged, plants will flower from 18 to 29 earlier than they do now in the Seoul Metropolitan Area, which would be faster than in other areas in the country. This is because the FFD (First Flowering Date), is highly related to temperature changes. The Seoul Metropolitan Area, which has been urbanized more rapidly than any other areas, is predicted to become a temperature warming, forcing the FFDs of the area to occur faster than in the rest of the country. Changes in phenology can lead to ecosystem disruption by causing mismatches in species interacting with each other in an ecosystem. Therefore, it is necessary to establish strategies against temperature warming and FFD change due to urbanization.

Keywords : First Flowering Date, RCP scenarios, Seoul metropolitan areas, Phenological events, Food chains

I. 서론

산업의 발달은 대기 중 온실가스를 증가시키며, 이는 지구의 기온 상승을 초래하였다. 지구의 온도는 2017년 기준 산업화 이전에 비해 1.0°C 상승하였고(IPCC, 2018), 1983년부터 2012년까지 북반구 지표 온도는 과거 1400년의 기간 중 가장 높았던 것으로 평가되었다(IPCC 2014). 북반구 중위도 지역에 위치한 우리나라의 경우 과거 100년간 세계 기온 증가율 대비 2.3배인 약 1.7°C 상승하였다(Kim et al. 2022). 향후 100년간 지구의 온도는 1.8–4.0°C 상승할 것으로 예측되고(IPCC 2007), 이러한 지구의 온도 상승은 생태계 및 생물의 서식에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다(IPCC 2007).

우리나라 7개 주요도시(서울, 인천, 강릉, 대구, 전주, 목포, 부산)의 90년간 평균기온은 세계 평균 기온의 약 2배 높은 1.5°C가 상승했으며(National Institute of Meteorological Science 2005), 이러한 기후변화의 원인 중 하나는 인간의 활동으로 인한 과도한 화석연료의 소비로 발생하고 있다. 전세계 온실

가스 70% 이상이 인간에 의해 배출되고 있으며(IPCC 2007), 온실가스 오염원 물질의 70%가 지구의 육지 면적의 불과 2%를 차지하는 도시지역에서 배출되고 있다(UN-Habitat 2011). 또한 수도권의 도시화는 도시의 지역 내 토지 피복을 변화로 인해 열 흡수 표면이 증가하여 도시의 온도가 증가하는 원인 중 하나이다(Lee et al. 2020).

온도 상승과 같은 기후변화는 생물계절 및 생물의 서식지 분포에 영향을 미친다. 그러므로 생물계절에 관한 연구는 지구 온난화로 인해 변화하는 환경을 나타내는 기후변화 지표로서 최근 그 중요성과 관심이 크게 증가하였다(Kim et al. 2020). 그 중 식물의 개화와 같은 식물계절에 관한 연구는 식물의 계절적 변화가 여러가지 기후변화의 영향을 나타낼 수 있기 때문에 수십년 전부터 전세계적으로 많은 연구들이 진행되고 있다(Neil & Wu 2006). 식물의 발아, 개화, 단풍, 낙엽 등의 식물계절 현상은 매년 반복되는 계절 변화를 반영한다. 그러므로 식물의 발아 및 개화 등 식물계절 변화의 장기 모니터링 데이터를 통해 계절 변화의 추세 및 기후 변화를 감지하는 중요한 정보

로 활용할 수 있다(Lee et al. 2009). 우리나라에서도 기후 변화에 따른 식물계절의 변화 경향에 관한 연구(Lee et al. 2009), 기후에 따른 식물계절 변화 예측(Lee et al. 2020) 등 기후변화와 식물계절과 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 한반도 전체를 대상으로 진행된 연구들이 대부분이며, 서울 및 수도권을 중심으로 진행된 연구는 전무한 실정이다.

우리나라의 수도권은 대한민국 인구의 50.4%가 수도권에 밀집해 있으므로(Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2022), 온실가스의 배출이 많고, 도시의 온도 상승이 높을 것으로 생각된다. 이러한 도시의 온도 상승은 도시 생태계 및 인간의 생활에도 영향을 미치므로 이에 대한 대책 수립이 필요하지만 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 그러므로 본 연구는 수도권의 7개 관측소(강화, 서울, 수원, 양평, 이천, 인천, 파주)에서 관측된 기상자료와 매화(*Prunus mume*), 개나리(*Forsythia koreana*), 진달래(*Rhododendron mucronulatum*), 벚나무(*P. yedoensis*), 복숭아(*P. persica*), 배나무(*Pyrus serotina*)의 개화일을 이용하여 과거부터 현재

까지 수도권의 도시화로 인한 식물계절의 변화를 분석하였다. 그리고 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오 중 RCP 2.6과 RCP 8.5 시나리오를 이용하여 향후 수도권 미래 기후에 따른 식물계절의 반응을 예측하고 온실가스 저감 정책의 차이에 따른 식물계절의 개화 시기 변화를 예측 및 분석하였다. 이를 통해 미래 수도권의 기후변화로 인한 도시 생태계의 변화에 대한 저감대책에 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지역

연구 대상지역은 우리나라에서 도시화가 가장 높은 수도권(서울특별시, 인천광역시, 경기도)을 연구대상 지역으로 선정하였다(Figure 1). 수도권은 대한민국에서 가장 도시화된 지역이며, 수도권의 면적은 2021년 기준으로 11,868km²로 우리나라 국토 면적의 약 11.8%를 차지하고 있으며, 수도권에 거주하는 인구는 26,023천명으로 대한민국 인구의 50.4%가 수도권에

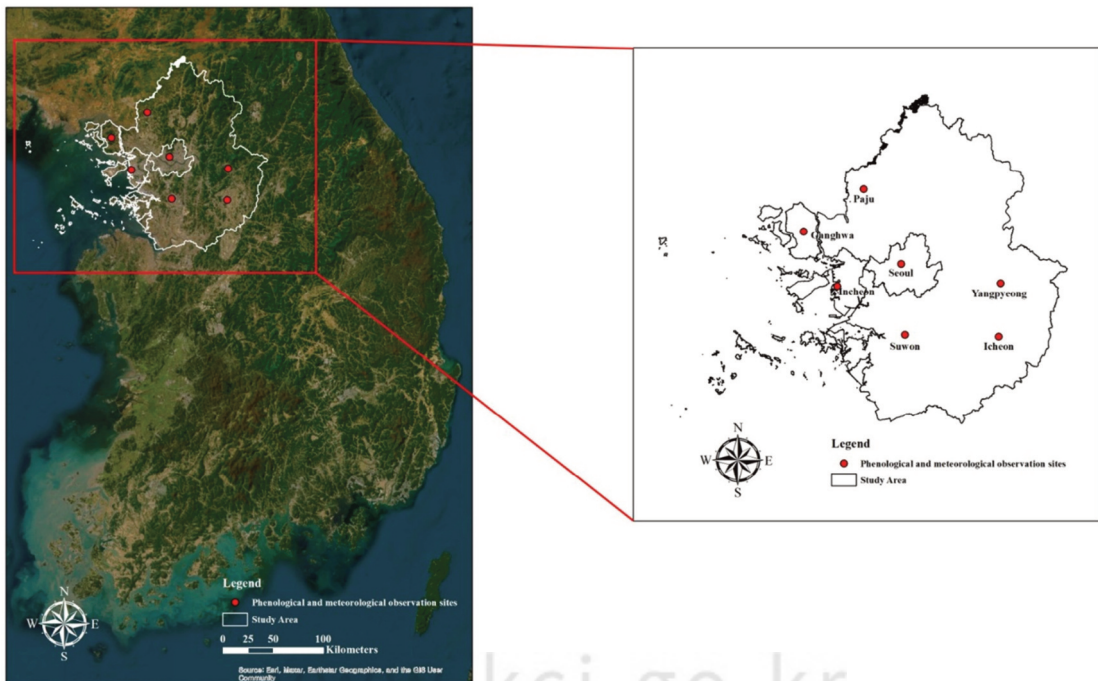


Figure 1. Research areas, plant phenological phases in those areas and the locations of weather stations

Table 1. Flowering dates of research species (Lee et al. 2020)

Species		First Flowering Date Observation Period
Common Name	Scientific Name	
Cherry tree	<i>Prunus yedoensis</i>	early March - late April
Korean forsythia	<i>Forsythia koreana</i>	late February - mid May
Korean rosebay	<i>Rhododendron mucronulatum</i>	early March - late April
Peach tree	<i>Prunus persica</i>	Mid-March - early May
Pear tree	<i>Pyrus communis</i>	late March - mid May
Plum tree	<i>Prunus mume</i>	late January - mid May

밀집해 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2022).

2. 데이터 수집

수도권의 기상 데이터 및 연구 대상종의 개화 시기에 대한 데이터는 서울특별시, 인천광역시, 경기도에 위치한 관측소 9개 중 대도시의 기온을 반영할 수 있는 7개의 관측소(강화, 서울, 수원, 양평, 이천, 인천, 파주)에서 수집된 데이터를 이용하였다(Figure 1, Table 1). 우리나라의 경우 국토면적이 작고 인구밀도가 높으며, 특히 인구가 많은 대도시들은 도시화로 인한 영향이 크게 나타나기 때문이다(Lee 2017). 연구 대상종은 기상청의 생물계절 관찰 중 중 FFD(first flowering date) 데이터를 갖는 식물을 선정하였다. FFD는 한 가지에 많은 꽃이 피는 식물의 경우 한 가지에 3개 이상의 꽃이 피었을 때를 말한다(Lee et al. 2020). 봄철 식물의 FFD는 기온에 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있으므로(Lechowicz 1995), 본 연구에서는 기상청의 생물계절 관찰 중 중 봄에 개화하는 식물인 매화, 개나리, 진달래, 벚나무, 복숭아, 배나무를 연구종으로 선정하였다. 기상청에서 생물계절 관찰을 위해 지정된 식물종은 매년 같은 장소에서 최대한 자연적으로 유지하고, 질병 예방을 위한 최소한의 관리만 하고 있으며(Lee et al. 2020), 개화 시기에 대한 데이터는 기상청에서 매년 같은 장소에서 동일한 방법으로 데이터를 관찰하여 수집하고 있다.

3. 연구방법

본 연구는 수도권 내 관측소(강화, 서울, 수원, 양평, 이천, 인천, 파주)에서 기록된 연구 대상종(매화, 개나

리, 진달래, 벚나무, 복숭아나무, 배나무)의 FFD와 온도와의 관계를 분석하여, 연구 대상종 별 FFD 변화에 대한 경향을 분석하였다. 그리고 미래 기후시나리오에 따른 2100년의 매화, 개나리, 진달래, 벚나무, 복숭아나무, 배나무의 개화 시기를 예측하였다. 연구 대상종의 FFD 데이터는 Julian 날짜로 변환하여 분석하였으며, 이는 2월의 경우 평년과 FFD 데이터 윤년이 존재하기 때문이다. 또한 관측소 별 누락된 FFD 데이터는 분석에서 제외하였다.

한편 기상데이터는 기상 관측소 별 월평균 온도 데이터를 이용하였다. 식물의 발아 및 개화, 단풍과 같은 식물계절은 토양, 유전, 질병, 기후 등 다양한 환경 요인에 영향을 받으며, 특히 봄철 식물계절은 기온에 민감하다(Lechowicz 1995). 봄철 식물계절 시기는 주로 겨울철 휴면 기간이 끝난 이후의 기온에 영향을 받으며, 많은 선행연구에서 봄 식물계절 시기와 기온과의 상관관계가 높은 것을 알 수 있었다(Fitter et al. 1995; Walkovszky 1998; Sparks et al. 2000). 그러므로 본 연구에서는 연구 대상종의 개화 시기에 가장 영향을 미치는 2월, 3월, 4월의 월평균 온도 데이터를 이용하여 선형회귀분석을 하였다.

2100년 미래의 온도는 미래 기후변화시나리오 중 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오를 이용하였다. RCP 시나리오는 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5가 있으며, RCP 2.6 시나리오는 지금부터 즉시 온실가스 감축 수행하여 2100년의 대기 중 CO₂ 농도가 420 ppm일 경우, RCP 4.5시나리오는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되어 대기 중 CO₂ 농도가 540 ppm일 경우, RCP 6.0 시나리오는 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실

현되어 대기 중 CO₂ 농도가 670 ppm일 경우, RCP 8.5시나리오는 현재 추세대로 온실가스를 배출하여 대기 중 CO₂ 농도가 940 ppm일 경우의 시나리오를 의미한다(Korea Meteorological Administration, 2022). 본 연구에서는 현재 대기 중 CO₂ 농도와 비슷한 RCP 2.6 시나리오와 CO₂를 저감하지 않았을 경우를 나타내는 RCP 8.5 시나리오를 이용하여 2100년 미래의 온도를 예측하였다. 그리고 IDW(inverse distance weighting)를 이용하여 수도권의 FFD 변화 경향을 분석하였다. IDW는 관측 지점의 관측 값과 위치 정보를 이용하여 관측되지 않은 일정 위치에서의 값을 추정하는 방법으로 각 관측지점으로부터 해당 미관측 지점까지의 거리에 반비례하게 가중치를 주어 미관측지점에서의 추정 값을 계산한다(Szolgay et al. 2009; Lee et al. 2016). 그러므로 미관측지점으로부터 가까운 곳에 위치한 관측 값일수록 더 큰 가중치를 적용하여 미관측지점의 추정치를 산출하는 방법이다. 이 모든 과정은 ArcGIS ver. 10.8.2를 이용하여 분석하였다.

III. 결과

1. 매화(*Prunus mume*)

2019년 수도권 매화의 FFD는 67-94일이며, 전년도 대비 인천은 16일, 수원은 17일, 서울은 23일 일찍 개화하였다. 2019년 현재 매화의 FFD가 가장 빠른 곳은 서울이었으며, RCP 2.6, RCP 8.5 미래 시나리오를 이용하여 수도권 매화의 FFD를 예측한 결과 수도권 중 매화의 FFD가 가장 빠른 지역은 RCP 2.6, RCP 8.5 미래 시나리오에서 모두 서울로 나타났다(Figure 2-1a).

RCP2.6 시나리오로 분석한 2100년 수도권 매화의 FFD는 83-97일이며, FFD가 가장 빠를 것으로 예상된 서울의 2100년 매화 FFD는 3월 중순-3월 말로 나타났다. 한편 RCP 8.5 시나리오로 분석한 2100년 수도권 매화의 FFD는 31-94일로 수도권의 매화의 FFD가 현재보다 빨라질 것으로 예측되었다. 개화가 가장 빠를 것으로 예상되는 2100년 서울의 매화 FFD는 1월 말이며, 이는 현재보다 FFD가 한달 이상 빨라

지는 것이며, 서울의 경우 다른 지역에 비해 FFD가 앞당겨지는 속도가 더 빠른 것을 확인할 수 있었다.

2. 개나리(*Forsythia koreana*)

2019년 수도권 개나리의 FFD는 80-94일로 나타났다. 전년도 대비 서울 6일, 인천 5일 일찍 개화하였다. RCP 2.6, RCP 8.5 미래 시나리오를 이용하여 수도권 개나리의 FFD를 예측한 결과 수도권에서 개나리의 FFD가 가장 빠른 지역은 두 시나리오 모두 서울로 나타났다(Figure 2-1b).

RCP 2.6 미래 시나리오를 이용하여 예측한 2100년 수도권 개나리의 FFD는 83-94일이며, FFD가 가장 빠를 것으로 예상된 2100년 서울의 개나리 FFD는 82.87 일로 2100년 서울의 개나리 FFD는 3월 중순-3월 말로 예측되었다. 그리고 RCP 8.5 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권 개나리의 FFD는 56-73일이며, 이때 서울의 개나리 FFD는 56일이었다. 그러므로 2100년 서울의 개나리 FFD는 2월 말까지 빨라지며, 수도권 내 다른 도시의 개나리 FFD도 20일 이상 앞당겨 질 것으로 예측되었다.

3. 진달래(*Rhododendron mucronulatum*)

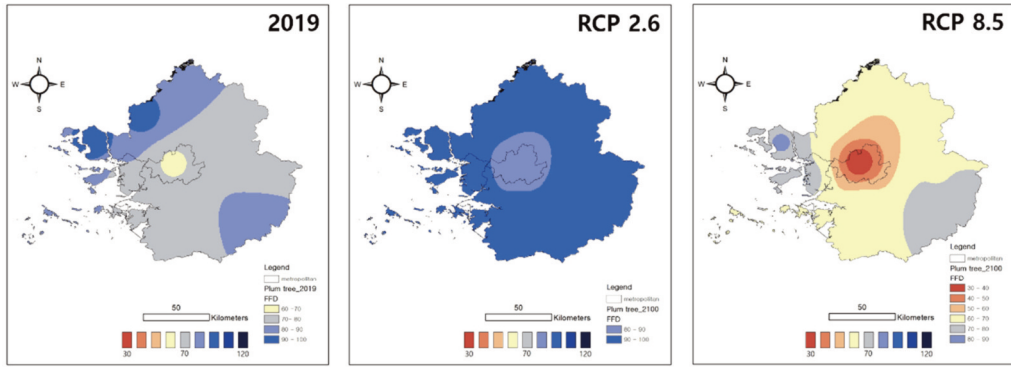
2019년 수도권 진달래의 FFD는 80-98일이며, 전년도 대비 서울 6일, 인천은 4일 일찍 개화하였다. RCP 2.6, RCP 8.5 미래 시나리오를 이용하여 수도권 진달래의 FFD를 예측한 결과 수도권 중 진달래의 FFD가 가장 빠른 지역은 두 시나리오 모두 서울로 나타났다(Figure 2-1c).

RCP 2.6 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권 진달래의 FFD 범위는 83-94일이며, FFD가 가장 빠를 것으로 예상되는 서울의 2100년 진달래 FFD는 3월 중순-3월 말로 나타났다. RCP 8.5 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권 진달래의 FFD 범위는 53-73일이며, 2100년 미래 서울의 진달래 FFD는 2월 말-3월 초까지 빨라질 것으로 예상되고, 다른 수도권의 진달래의 FFD도 13-20일 정도 빨라질 것으로 예측된다.

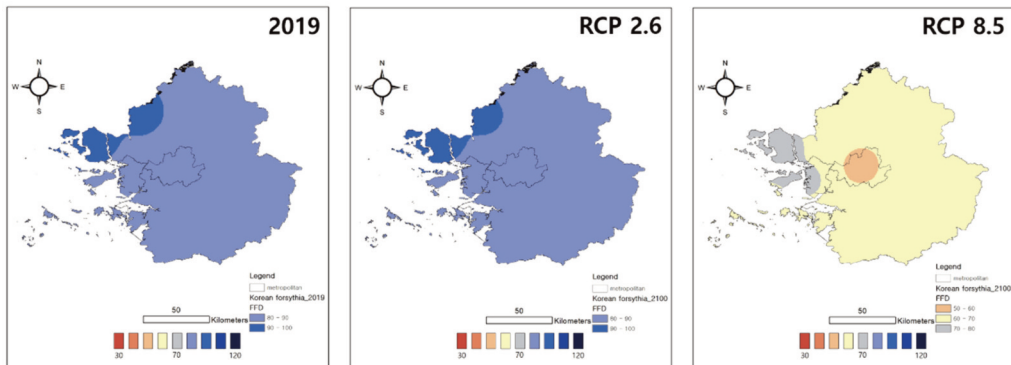
4. 벚나무(*Prunus yedoensis*)

2019년 수도권의 벚나무 FFD는 94~105일이며, 전년도 대비 서울 1일, 인천은 2일, 수원은 5일 늦게

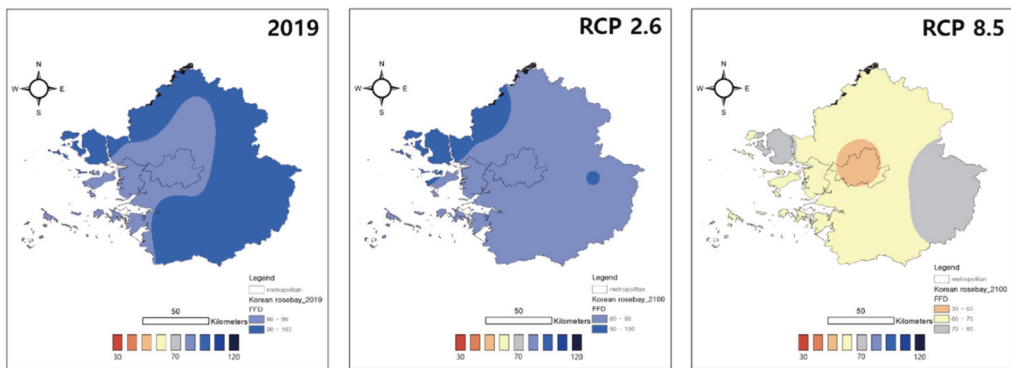
개화하였다. RCP 2.6, RCP 8.5 미래 시나리오를 이용하여 수도권 벚나무의 FFD를 예측한 결과, RCP 2.6 미래 시나리오에서는 이전의 FFD가 가장 빨랐



(a) Plum tree (*Prunus mume*)



(b) Korean forsythia (*Forsythia koreana*)



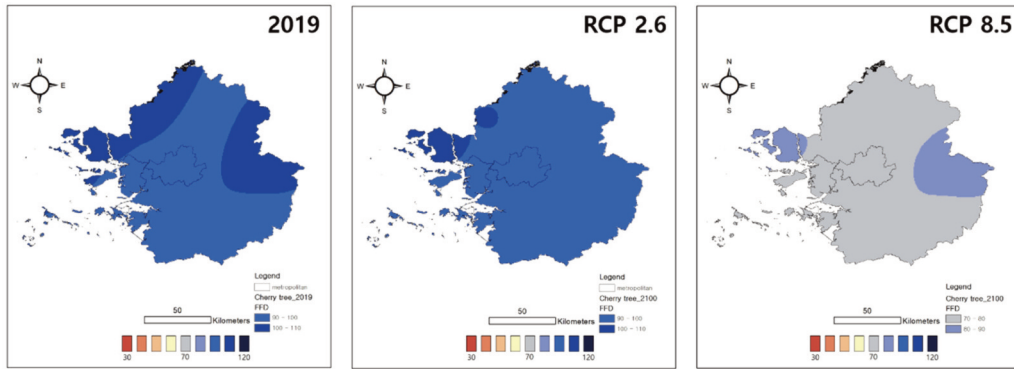
(c) Korean rosebay (*Rhododendron mucronulatum*)

Figure 2-1. The prediction of flowering dates of (a) Plum tree, (b) Korean forsythia and (c) Korean rosebay in the Seoul Metropolitan Area by using RCP scenarios: the FFD in 2019 (left), the future FFD in the 2100s predicted by using RCP 2.6 scenario (middle), and the future FFD in the 2100s predicted by using RCP 8.5 scenario (right)

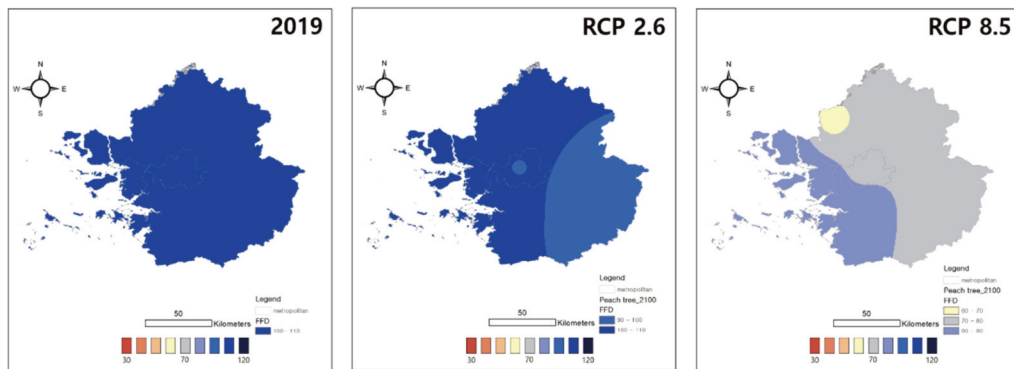
고, RCP 8.5 미래 시나리오에서는 수원의 FFD가 가장 빠른 것으로 나타났다(Figure 2-2d).

RCP 2.6 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권

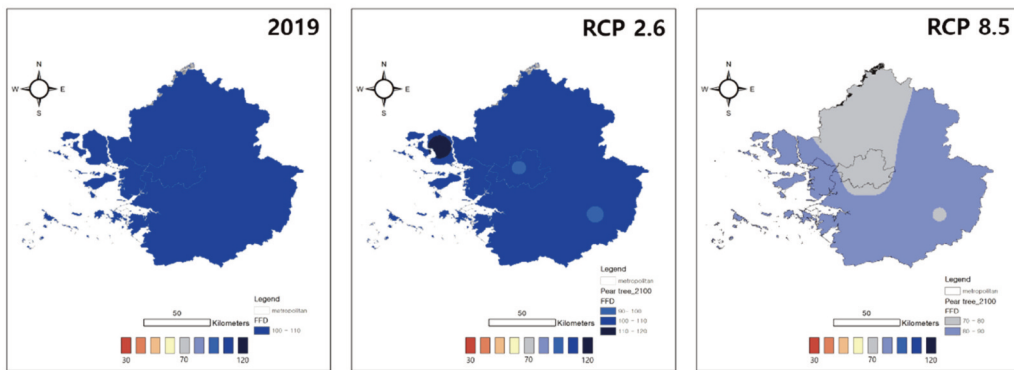
벚나무의 FFD는 94-103일이며, FFD가 가장 빠른 것으로 예상되는 2100년 이전의 FFD는 4월 초로 예측되었다. RCP 8.5 미래 시나리오로 분석한 2100년



(d) Cherry tree (*Prunus yedoensis*)



(e) Peach tree (*Prunus persica*)



(f) Pear tree (*Pyrus communis*)

Figure 2-2. The prediction of flowering dates of (d) Cherry tree, (e) Peach tree and (f) Pear tree in the Seoul Metropolitan Area by using RCP scenarios: the FFD in 2019 (left), the future FFD in the 2100s predicted by using RCP 2.6 scenario (middle), and the future FFD in the 2100s predicted by using RCP 8.5 scenario (right)

수도권 벚나무의 FFD는 73-86일이며, 이때 수원 벚나무의 FFD는 3월 중순까지 빨라질 것으로 예상되고, 다른 수도권 지역의 벚나무의 FFD도 20일 정도 앞당겨질 것으로 예측되었다.

5. 복숭아나무(*Prunus persica*)

2019년 수도권의 복숭아나무 FFD는 102-110일이며, 전년도 대비 강화도 4일, 인천 2일, 서울은 1일 일찍 개화하였다. RCP 2.6, RCP 8.5 미래 시나리오를 이용하여 수도권 복숭아나무의 FFD를 예측한 결과 FFD가 가장 빠른 지역은 RCP 2.6 미래 시나리오에서는 양평, RCP 8.5 미래 시나리오에서는 파주로 나타났다(Figure 2-2e).

RCP 2.6 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권 복숭아나무의 FFD는 97일-106일이며, 2100년 양평의 복숭아나무 FFD는 4월 초로 예측되었다. RCP 8.5 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권 복숭아나무 FFD는 67-87일이며, 2100년 파주의 복숭아나

무 FFD는 3월 초까지 빨라질 것으로 예측된다. 이는 현재의 FFD보다 43일 이상 빨라지는 것으로 파주 복숭아나무의 FFD가 수도권 다른 지역보다 더 빠르게 앞당겨질 것으로 예측된다.

6. 배나무(*Pyrus communis*)

2019년 수도권의 배나무 FFD는 102-110일이며, 전년도 대비 강화도 5일, 양평 3일 일찍 개화하였지만, 서울은 5일 늦게 개화하였다. RCP 2.6, RCP 8.5 미래 시나리오를 이용하여 수도권 복숭아나무의 FFD를 예측한 결과 FFD가 가장 빠른 지역은 RCP 2.6 미래 시나리오에서는 서울, RCP 8.5 미래 시나리오에서는 파주로 나타났다(Figure 2-2f).

RCP 2.6 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권 배나무 FFD의 범위는 100-106일이며, RCP 2.6 시나리오가 예측한 2100년 미래 서울의 배나무 FFD는 4월 초-4월 중순으로 나타났다. 또한 RCP 8.5 미래 시나리오로 분석한 2100년 수도권 배나무 FFD는

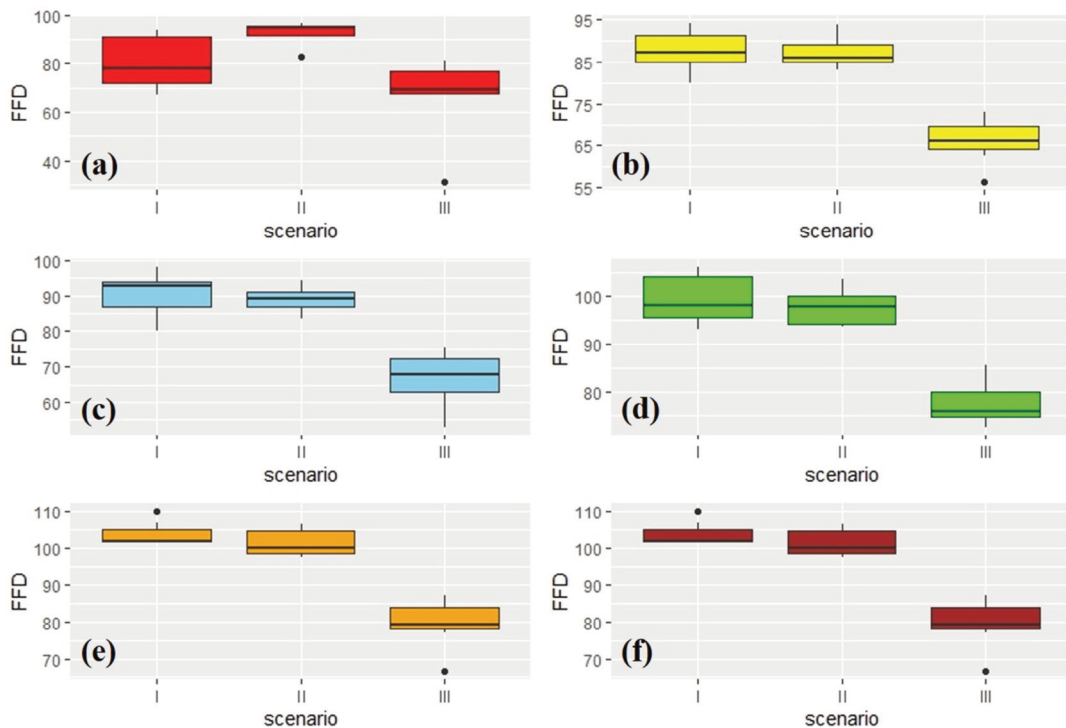


Figure 3. The change in the FFD of research species in the Seoul Metropolitan Area predicted by using RCP scenarios (I. 2019 as of now; II. RCP future scenario 2.6; III. RCP future scenario 8.5): (a) *Prunus mume*, (b) *Forsythia koreana*, (c) *Rhododendron mucronulatum*, (d) *Prunus yedoensis*, (e) *Prunus persica*, and (f) *Pyrus communis*.

71-90일이며, 2100년 파주의 배나무 FFD는 3월 초까지 빨라질 것으로 나타났다. 이는 현재보다 FFD가 39일 이상 빨라지며, 수도권 다른 지역은 FFD가 20일정도 앞당겨지는 것으로 나타났다. 또한 파주의 경우 다른 지역에 비해 더 빠른 속도로 배나무가 개화할 것으로 예측된다.

7. RCP 시나리오 별 수도권 식물의 FFD 비교

2100년 미래기후시나리오를 바탕으로 봄철 식물계절 대표종에 대한 FFD를 분석한 결과 모든 식물의 FFD가 앞당겨지고 있으며, FFD 시기가 빠른 종일수록 FFD 기간이 짧아지는 것을 알 수 있었다(Figure 3). RCP 2.6시나리오 분석을 통해 지금부터 즉시 온실가스 감축방안이 수행되어 2100년에도 대기 중 CO₂ 농도가 420 ppm일 경우 연구종들의 FFD는 지금의 수준과 비슷한 것을 알 수 있었다. 그러나 현재 추세대로 온실가스를 배출하여 대기 중 CO₂ 농도가 940 ppm을 가정한 RCP 8.5시나리오의 경우 2100년 수도권 식물종의 평균 FFD가 앞당겨지며, 매화 25.64일, 개나리 21.01일, 진달래 22.15일, 벚나무 19.88일, 복숭아나무 22.02일, 배나무 21.94일로 FFD가 앞당겨질 것으로 예측되었다. 우리나라 전체를 대상으로 RCP 2.6 시나리오와 RCP 8.5 시나리오로 2100년 식물의 FFD를 분석한 결과 두 시나리오의 차이는 12-22일이었으며(Lee et al. 2020), 본 연구의 대상지인 수도권의 경우 RCP2.6 시나리오와 RCP8.5 시나리오의 2100년 식물의 FFD 차이는 16일-32일로 전국의 FFD보다 훨씬 더 빨라지는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 고찰

과거부터 현재까지의 식물계절 시기의 변화 경향을 파악하기 위해 전국 14개 장기관측지점의 매화, 개나리, 진달래, 복숭아, 배나무, 벚꽃의 FFD를 분석한 결과, 1980년대 이후 FFD가 점차 앞당겨지고 있으며(Lee et al. 2009), 본 연구 결과에서도 RCP 8.5를 바탕으로 추정된 2100년 수도권 평균 FFD는 2019년에 비해 18-29일 앞당겨질 것으로 예상되었다. 또한

선행연구를 통해 RCP 8.5를 통해 추정된 전국의 평균 FFD는 2019년에 비해 10-15일이 앞당겨질 것으로 예상되었다(Lee et al. 2020). 한편 본 연구 결과에서 RCP 2.6 시나리오로 예측한 매화의 FFD는 2019년 수도권 전체 평균 FFD 대비 12일정도 늦어지는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 2019년의 서울, 수원, 인천의 FFD가 전년대비 16일, 23일, 17일로 급격하게 빨라졌기 때문이며, 각 지역의 과거 평균 FFD와 비교했을 때 RCP2.6 시나리오로 예측한 매화의 FFD는 빨라지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과를 통해 수도권의 FFD는 전국의 FFD보다 더 빠르게 앞당겨지는 것을 확인할 수 있었으며 이와 같은 결과는 선행연구를 통해서도 확인할 수 있었다. 우리나라의 대도시(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 수원)는 다른 지역에 비해 식물계절 현상과 기후요인의 변화가 두드러졌으며(Lee 2017), 북미와 유럽, 중국의 다양한 생태계에서 도시화된 환경에서 봄에 개화하는 식물이 도시화 되지 않은 지역보다 개화시기가 더 빠른 경향을 나타냈다(Neil & Wu 2006). 이와 같이 FFD를 앞당기는 봄철 온도 상승의 원인으로는 지구 온난화 현상 및 겨울과 이른 봄의 도시 열섬 효과가 있으며, 이로 인해 이른 봄철의 기온 상승이 뚜렷하게 나타나고 평균 개화일이 빠른 식물들의 개화일이 더 빠르게 앞당겨지고 있다(Lu et al. 2006; Neil & Wu 2006).

인간의 활동으로 인해 발생하는 온실가스는 수도권과 같은 대도시에서 더 많이 배출되고 있으며, 이러한 온실가스는 지구 온난화의 가장 큰 원인 중 하나이다. 또한 수도권의 도시화는 도시의 토지 피복을 변화시켜 녹지 공간이 줄어들고 콘크리트와 아스팔트, 포장도로 및 건물로 인해 열 흡수표면이 증가하여 국지적으로 열 특성의 변화 및 온도가 증가하는 원인 중 하나이다(Lee et al. 2020). 그러므로 현재의 추세대로 수도권의 도시화가 계속 진행된다면 도시에서 발생하는 온실가스는 더욱더 증가하여 2100년에는 FFD에 영향을 미치는 늦겨울부터 봄의 기온 변화가 지금보다 더 클 것으로 예상된다. 또한 겨울철 온난화로 인해 야기되는 FFD의 차이는 식물 군집의 관계에 영향을 미칠 수 있으며(Miller-Rushing and

Primack 2008), 식물의 FFD와 같은 식물계절의 변화는 생태계에서 서로 상호작용하는 종들의 불일치를 야기하고 그 결과 생태학적 상호작용의 구조가 근본적으로 파괴될 수 있다(Fitter et al. 1995; Chen 2011). 그러므로 생태계 보전을 위해서는 도시화로 인해 야기되는 기온 증가와 이로 인해 발생하는 FFD 변화에 대한 대책 마련이 필요하다.

V. 결론

본 연구는 우리나라 수도권을 대상으로 봄철 대표 식물 6종의 FFD와 온도 자료를 이용하여 과거부터 현재까지 수도권 온도 변화에 따른 식물계절의 FFD 변화를 분석하고, RCP 미래 시나리오를 통해 수도권의 미래 기후를 예측하고 기후변화에 따른 식물계절의 FFD을 변화를 예측하여 분석하였다.

그 결과 1900년대부터 2019년까지 식물계절은 앞당겨지고 있으며, 지금과 같은 온실가스의 배출이 이뤄질 경우 수도권 봄철 대표 식물의 FFD는 현재보다 20-26일 앞당겨지고 전국 평균의 FFD보다 더 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 식물계절의 변화는 생태계에서 서로 상호작용하는 종들의 불일치를 야기하여 생태계의 파괴로 이어질 수 있으므로 생태계 보전을 위해서는 도시화로 인한 기온 증가와 이로 인해 발생하는 FFD 변화에 대한 대책 마련이 필요하다. 그러므로 본 연구는 미래 수도권의 기후변화로 인해 야기되는 도시 생태계의 변화의 기초자료를 제공했다는 점에서 큰 의미가 있다.

그러나 본 연구는 봄 개화에 영향을 미치는 수많은 환경인자 중 온도를 고려하여 연구를 진행하여 다양한 환경적 변수를 고려하지 못했다는 점에 한계가 있으므로, 향후 다양한 환경 변수를 고려한 식물 개화 시기에 대한 연구가 진행된다면 보다 정확한 수도권의 기후변화로 인한 도시 생태계 변화에 대한 대책을 수립할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 한국연구재단(KRF-2021R1A2C101

1213), 서울녹색환경지원센터(SGEC-2022) 및 한국 환경산업기술원(MOE-2021003360002, 2020002990006, and 2022003640003)의 지원으로 연구되었습니다.

References

- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD. 2011. Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science* 333: 1024-1026.
- Fitter AH, Fitter RSR, Harris ITB, Williamson MH. 1995. Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England. *Functional Ecology*: 55-60.
- IPCC Climate Change. 2007. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC Climate change. 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland: Cambridge University Press.
- IPCC Climate Change. 2018. Global warming of 1.5°C. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.
- Kim JH, Yun EJ, Kim DJ, Kang D, Seo, BH, Shim KM. 2020. Evaluation of Regional Flowering Phenological Models in Niitaka Pear by Temperature Patterns. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 22(4): 268-278. [Korean Literature]
- Kim M, Lee J, Sung K, Lim C, Hwang W, Hyun

- S. 2022. Potential Impacts of Climate Change on Water Temperature of the Streams in Han-River Basin. *Journal of Korean Society on Water Environment* 38(1): 19-30. [Korean Literature]
- Kim S, Kim TK, Yoon S, Jang K., Lim H, Lee WY, Won M, Lim JH, Kim HS. 2021. Recent changes in bloom dates of *Robinia pseudoacacia* and bloom date predictions using a process-based model in South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 110(3): 322-340. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration. 2022, climate change scenario, [cited 2022 Nov 11]. Available from: <http://www.climate.go.kr/> [Korean Literature]
- Lechowicz MJ. 1995. Seasonality of flowering and fruiting in temperate forest trees. *Canadian Journal of Botany* 73(2): 175-182.
- Lee HK, Lee SJ, Kim MK, Lee SD. 2020. Prediction of plant phenological shift under climate change in South Korea. *Sustainability* 12(21): 9276.
- Lee J, Ahn JB, Jeong HG. 2016. A Study on the Method for Estimating the 30 m-Resolution Daily Temperature Extreme Value Using PRISM and GEV Method. *Atmosphere* 26(4): 697-709. [Korean Literature]
- Lee K, Kim Y, Sung HC, Ryu J, Jeon SW. 2020. Trend analysis of urban heat island intensity according to urban area change in Asian mega cities. *Sustainability* 12(1): 112.
- Lee KM, Kwon WT, Lee SH. 2009. A study on plant phenological trends in South Korea. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers* 15(3): 337-350. [Korean Literature]
- Lee SD. 2017. Global warming leading to phenological responses in the process of urbanization, South Korea. *Sustainability* 9(12): 2203.
- Lu P, Yu Q, Liu J, Lee X. 2006. Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 138: 120-131.
- Miller-Rushing AJ, Primack RB. 2008. Global warming and flowering times in Thoreau's Concord: a community perspective. *Ecology* 89(2): 332-341.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2022. Metropolitan Area Status.
- National Institute of Meteorological Science. 2005. 100-Year Changes in Climate on the Korean Peninsula and Future Prospects.
- Neil K, Wu J. 2006. Effects of urbanization on plant flowering phenology: a review. *Urban Ecosystems* 9(3): 243-257.
- Sparks TH, Jeffree EP, Jeffree CE. 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology* 44(2): 82-87.
- Szolgay J, Parajka J, Kohnová S, Hlavčová K. 2009. Comparison of mapping approaches of design annual maximum daily precipitation. *Atmospheric Research* 92(3): 289-307.
- UN-Habitat. 2011. *Cities and Climate Change*. Stylus Pub Llc, Washington.
- Walkovszky A. 1998. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. *International Journal of Biometeorology* 41(4): 155-160.