



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사 학위논문

한국 온대 산림의  
식물 계절 변화 분석

2019년 8월

서울대학교 대학원

환경계획학과

김 중 호

# 한국 온대 산림의 식물 계절 변화 분석

지도교수 정 수 중

이 논문을 도시계획학 석사학위논문으로 제출함  
2019년 4월

서울대학교 대학원  
환경계획학과  
김 중 호

김중호의 석사 학위논문을 인준함  
2019년 6월

위 원 장 이 동 수 (인)

부위원장 송 영 근 (인)

위 원 정 수 중 (인)

## 국문초록

식물계절 현상은 기온과 강수와 같은 기상인자에 민감하게 반응하기 때문에 기후변화의 지표로 널리 이용되고 있다. 식물계절과 기후간의 이해를 위한 연구들에 따르면 세계 각지에서 개엽일이 빨라지는 현상을 보이고 있으며, 이러한 개엽일은 지역별로 서로 나타나는 반응의 정도가 달랐다. 봄철 개엽 뿐만 아니라 가을철 낙엽과 식물생장기길이가 식물계절을 이해하는데 중요한 부분이라고 보고되고 있지만 개엽일에 관한 연구에 비해 부족한 실정이다. 한국에서도 역시 식물계절 연구가 시도되었으나 도시지역으로 한정되어있다. 또한, 장기적으로 지상관측한 자료를 이용한 연구의 부재로 인해 전체적인 한국의 식물계절을 이해하는데 어려움이 있다. 그러므로 한국에서도 전 지역을 포함하여 장기적인 식물의 성장 주기 변화를 통해 식물계절을 이해하는 것이 필요하다.

따라서, 본 연구는 국립수목원에서 2009년부터 2017년까지 관측된 개엽일, 낙엽일, 식물생장길이를 포함한 식물계절자료를 이용하여 한반도 산림에서의 식물계절 변화를 연구하였다.

본 연구에서는 총 10개 수목원을 포함한 50개 관측지에서 수집된 산림지역 식물계절 자료를 이용하였다. 자료는 총 256종의 식물을 2009년부터 2017년까지 12단계의 식물계절상을 구분하여 72,187개로 이루어져 있다. 이중 모든 지역에서 공통적으로 6년 이상 관측된 낙엽수 7종(진달래, 생강나무, 산철쭉, 당단풍나무, 개나리, 산수유나무, 백목련)의 개엽일과 낙엽수 2종(진달래, 생강나무)의 낙엽일을 선정하여 한국의 산림에서 발생하고 있는 식물계절의 변화를 파악하고 지역별 기온 자료를 이용하여 식물계절과 기온 간의 변화 관계를 분석했다.

중과 지역을 고려하여 개엽일과 낙엽일 그리고 식물생장길이를 분석하였다. 40개 관측지에서 6년 이상 관측된 143개의 자료 중 139개는 개엽일이 평균 1.37일씩 빨라지고 있는 것으로 나타났다. 종별로 보았을 때 산수유나무가 가장 민감하게 반응하여 1.82일씩 식물계절이 빨라졌고, 잎이 나는 백목련은 1.07일 씩 빨라져 변화가 이들 중 가장 둔하게 나타났다. 낙엽일의 경우 34개의 관측지에서 6년 이상 관측된 52개의 자료 중 38개는 낙엽일이 평균 0.34일씩 늦어지고 있는 것으로 나타났다. 낙엽일은 생강나무가 0.44일씩 늦어지고 있는 것으로 나타나 0.28일씩 늦어지고 있는 진달래보다 더 민감하게 반응했다. 개엽일과 낙엽일이 모두 관측된 총 32개의 관측지에서 49개의 자료 중 41개는 식물생장길이가 평균 1.77일 늘어나는 것으로 나타났다. 이중 생강나무의 평균이 1.99일로 1.60일인 진달래보다 생장길이가 길어진 것을 확인할 수 있었다. 수목원별로 식물계절과 위성관측자료를 비교해본 결과 수목원에서 연도별로 관측된 개엽일 중 가장 빠른 개엽일과 위성자료가 높은 상관관계를 보여줬다. 이는 경관단위로 접근하는 위성자료가 식물 중 관목류에서 잎눈이 나와 성장하는 시점을 식물생장기간의 시작일로 판단하는 것으로 보인다.

다음으로 개엽일과 낙엽일의 변화를 이해하기 위해 기상청에서 관측한 지역별 기상자료와 비교하여 상관성을 보았다. 개엽일과 낙엽일 모두 선행되는 계절과 가장 높은 상관성을 보였으며, 개엽일의 경우 봄 평균기온이 1℃ 상승함에 따라 4.20일씩 개엽일이 빨라지는 것으로 나타났다. 낙엽일의 경우 10월의 평균 기온이 1℃ 상승함에 따라 2.78일씩 낙엽일이 늦어지는 것으로 나타났다.

이를 기반으로 식물계절 현상이 발생하기 전까지의 누적된 기온과의 상관관계를 보기 위해 개엽일과 GDD(Growing Degree Days), 낙엽일

과 CDD(Cooling Degree Days)를 국립수목원의 관측자료에 적용하여 비교하였다. 종별 평균 GDD는 개엽일이 빠른 개나리가 173.08으로 가장 작았고, 개엽일이 늦은 백목련이 203.06으로 가장 크게 나타났다. 이를 기반으로 2009년부터 2017년까지 예측값을 산정하여 관측자료와 비교한 결과 70.63%의 설명력을 가져 누적된 기온이 식물의 개엽에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 겨울철 평균기온이 상승하게 되면 누적 온도 조건인 GDD를 빠르게 충족시키게 되어 개나리와 같이 GDD값이 작아 개엽일에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 보인다. 가을철 낙엽의 경우 진달래와 생강나무의 평균 CDD는 174.24로 낙엽일이 늦은 진달래의 203.52보다 작은 것으로 나타났다. 하지만 CDD를 이용한 예측은 폭염이 있던 2014년과 2016년에 조기낙엽의 발생으로 인하여 상관관계가 낮았지만, 조기낙엽의 경우를 제외하고 약 38% 정도의 설명력을 가지고 있었다. 그렇기 때문에 낙엽을 이해하기 위해 폭염, 가뭄과 같은 극한기상현상이 기온의 변화와 함께 고려되어야 한다.

종합적으로 아직까지 연구가 이루어지지 않은 한국의 산림을 대상으로 식물계절 변화를 설명하고, 식물계절과 기온간의 상관관계를 보여주었다. 특히 개엽일이 빠른 식물들이 겨울철 온도변화에 민감하였으며, 낙엽일은 극한 기상현상에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구는 한국 산림의 식물계절을 폭넓게 이해하는 기초 자료를 제공하며, 지속적인 식물계절 관측의 필요성과 식물계절과 기후와의 관계에서 기온뿐만 아니라 극한 기상과 함께 연구되어야 한다는 새로운 시사점을 도출하였다.

**주요어** : 식물계절, 온대산림, 지상관측자료, 국립수목원,  
개엽, 낙엽, 식물생장기간, 기온, 기후변화,  
**학 번** : 2015-24818

# 목 차

I. 서론 .....	1
1. 연구의 배경 및 목적 .....	1
2. 연구의 범위 .....	4
II. 선행연구 .....	5
1. 기후 변화에 따른 식물 계절의 변화 연구 .....	5
2. 식물 계절 자료와 지역별 수종별 차이 .....	6
3. 한국에서 식물 계절에 관한 연구 .....	9
III. 분석 자료와 연구 방법 .....	10
1. 한국 산림의 식물 계절 자료 .....	10
2. 환경변수로서의 온도 .....	15
3. 분석 방법 .....	18
III. 연구 결과 및 토의 .....	21
1. 한국의 종별 식물계절 분포 특성 .....	21
2. 2009~2017년까지 한국의 식물계절 변화 .....	24
3. 기온변화에 따른 한국의 식물계절 변화 .....	29
4. 기온을 이용한 한국의 식물계절 예측 .....	32
IV. 결론 .....	36
■ 참고문헌 .....	39

■ 부록 .....44



## 표 목 차

<표 2-1> 장기적 식물계절 변화 연구 결과 .....	8
<표 3-1> 선정된 7종의 개엽일 데이터와 2종의 낙엽일 데이터의 기초통계 .....	13
<표 3-2> 9개 수목원의 개엽일과 낙엽일의 평균과 표준편차 ..	14
<표 3-3> 종과 지역에 따른 개엽일의 변화 차이 연구 .....	16

## 그림 목 차

<그림 3-1> 본 연구의 식물계절 조사지 위치 .....	11
<그림 3-2> 10개 수목원에서 관측된 12단계로 구분된 자료 현황 .....	12
<그림 4-1> 2009-2017년 관측된 종별 개엽일 평균을 이용한 개엽일 분포 지도 .....	22
<그림 4-2> 2009-2017년 관측된 종별 낙엽일 평균을 이용한 낙엽일 분포 지도 .....	23
<그림 4-3> 2009-2017년 동안 한국의 식물 개엽일 변화 ..	25
<그림 4-4> 2009-2017년 동안 한국의 식물 낙엽일 변화 ..	25
<그림 4-5> 2009-2017년 동안 한국의 식물생장기간 변화 ..	25
<그림 4-6> 연도에 따른 선정된 7종의 개엽일 기록과 위성의 식물생장 시작일 비교 그래프 .....	27
<그림 4-7> 봄철 평균온도와 개엽일의 상관관계 .....	31
<그림 4-8> 10월의 평균온도와 낙엽일의 상관관계 .....	31

<그림 4-9> 10월의 평균온도와 식물성장기간의 상관관계 .....	31
<그림 4-10> 국립수목원의 개엽일 자료를 이용한 GDD와 평균선 .....	33
<그림 4-11> 국립수목원의 낙엽일 자료를 이용한 CDD와 평균선 .....	33
<그림 4-12> 개엽일과 낙엽일의 예측과 비교 .....	35

# I. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

식물계절학(Phenology)은 생물이 서식 환경에 반응하여 나타나는 생활사의 반복되는 생물학적 현상으로, 식물 계절은 기후 변화의 지표로 사용되고 있다(Chuine et al. 2004, Menzel et al. 2006, Parmesan 2007, Zhao et al. 2013, Ellwood 2013, Hufkens et al. 2012). 식물은 온도, 강수, 일사량 등 환경요소로 인해 영향을 받지만 반대로 식물은 광합성과 호흡을 통해 이산화탄소와 수증기 등 대기의 구성에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 물리적으로는 토지 표면 거칠기와 알베도 등에 영향을 미쳐 식물 계절 현상은 미기후에 영향을 준다(Richardson, 2013). 따라서 식물 계절연구는 식생과 환경조건 사이의 관계를 이해하고, 더 나아가 기후 변화의 지표로 생태계의 변화를 예측하는 중요한 역할을 할 수 있다.

식물계절연구는 전통적인 조사 방법인 지상 관측자료와 위성, 항공사진 등 촬영된 영상을 분석한 자료를 기반으로 한다. 현장에서 관측된 식물 계절 정보는 공간적, 경제적 한계가 있어서 최근 많은 연구들이 인공위성 자료를 이용하여 경관단위의 식물 계절을 분석해왔다(Jeong 2013, Fisher et al. 2006, Keenan et al. 2015, 이보라 외. 2018). 하지만 위성자료를 이용한 분석은 대기 환경에 따른 오차가 발생할 수 있으며, 생태계를 하나의 층으로만 판단하기 때문에 생태계의 다층 구조를 반영할 수 없다(David 2018). 따라서 식물 계절연구를 위해서는 기초적 자료로 지상 기반 식물계절 관측이 수반되어야 한다.

주기적으로 반복되는 식물계절의 연구로 식물생장이 시작되는 봄의 개엽현상은 뚜렷한 특징이 나타나기 때문에 많은 연구가 봄철의 개엽을 대상으로 이뤄져 왔다(Sparks et al. 2005, Liu and Hu 2012, Ho et al. 2006, 이보라 외. 2018). 지중해성 기후에서 지난 50년간 봄철의 개엽일이 약 16일 빨라지고 있었지만 서부 캐나다에서는 약 26일이 빨라졌다(Penuelas & Filella 2011). 식물계절의 반응의 정도는 다르지만, 식물 성장 시작이 빨라지고 있다는 방향성은 모든 북반구 지역에서 같게 나타났다(Fitshet et al. 2015). 반면 식물생장이 끝나는 가을의 단풍, 낙엽 일은 수집된 데이터가 적고 종마다 반응이 다르게 나타나기 때문에 봄철 식물계절 연구보다 수가 적고 밝혀진 바가 적다. 하지만 최근 연구에서 봄철 식물 계절의 변화보다 가을 식물 계절의 변화가 봄철의 변화보다 식물 성장 기간에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Jeong et al. 2011, Garonna et al. 2014). 식물 계절을 온전히 이해하기 위해서는 지역과 수종에 따라 봄철의 개엽부터 가을의 낙엽까지 식물성장기간을 포함한 연구가 필요하다.

이와 관련하여 국내의 식물 계절연구는 위성자료를 이용한 개엽일의 변화를 특정 식물 종이나 특정 지역을 대상으로 1~2년의 단기간을 분석한 연구가 이뤄졌다. 또는 기상청(KMA)의 도시지역을 중심으로 개화 관측자료를 중심으로 과실수와 관상용 식물을 대상으로 연구들이 이뤄졌다(Chung et al. 2008, Seo et al. 2016, Ho et al. 2006). 아직 한국 산림지역의 수종을 대상으로 식물 계절, 특히 가을의 식물계절을 포함한 연구는 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 최초로 한국의 온대 산림에서 발생하고 있는 식물 계절의 변화를 파악하기 위해 각 도에 위치한 10개 수목원에서 2009년부터 2017년까지 9년간 장기간 관측된 산림 식물 계절 자료를 기반으

로 기초자료를 구축하여 한국의 산림지역에서 발생하고 있는 식물계절의 변화를 증명하고 그 원인을 찾는 것을 연구의 목적으로 한다.

## 2. 연구의 범위

본 연구는 국립수목원에서 기후변화 취약 산림식물종 보전·적응사업 연구의 일환으로 수집된 2009년에서 2017년까지 관측한 자료를 기반으로 강원도화목원, 국립수목원, 물향기수목원 등을 포함한 10개 수목원을 중심으로 총 50개 조사소에서 관측한 256종의 식물 계절 자료를 대상으로 한다. 국립수목원에서 실시한 관측은 지역을 대표할 수 있는 수종 중 장기모니터링할 수 있는 개체가 선정되었다. 각 수목원의 조사자는 산림청의 조사 매뉴얼에 따라 관측을 수행하여 식물생장기간 중인 2월 20일부터 11월 28일까지는 최소 1주일에 1회 이상을 관측 기준으로 하되 생육 후기인 7~8월은 2주에 1회 이상 조사가 이뤄졌다. 개엽일의 경우 잎의 크기와 상관없이 구분할 수 있는 잎의 형태가 세 군데 이상에서 관찰되었을 때로 보았고 낙엽은 전체 나무에서 세 군데 이상 낙엽이 관찰된 것을 기준으로 하고 있다(산림청, 2009).

일반적으로 식물계절에 가장 영향을 미치는 요소로 기온, 강수량, 일사량이 논의되고 있다(Vittase et al. 2009). 하지만 국립수목원의 식물계절 관측지는 대부분 산림지역에 위치하기 때문에 강수량과 일사량의 관측은 잦은 결측값이 나타나 본 연구에서는 고려되지 않았다. 기온 자료는 기상청에서 관측한 종관기상관측장비(ASOS)와 방재기상관측장비(AWS)에서 2008년 12월부터 2017년 12월 31일까지 기록된 일평균 기온을 사용했다.

## II. 선행연구

### 1. 기후변화에 따른 식물 계절의 변화

생태계란 생물들이 오랜 기간 주어진 환경에 잘 적응하고 살아남을 수 있도록 최적의 조건을 선택하도록 진화한 결과이다. 생물 계절은 중간 관계뿐 아니라 서식 환경에 민감하게 반응한다(Zhao et al. 2013). 기후변화로 인한 미세한 환경조건변화들은 생물의 잘못된 전략 선택으로 이어져 생물에 피해를 미칠 수 있다. 예를 들어 기온 상승에 따라 봄철에 이른 개엽을 선택한 식물은 봄 서리로 인한 동해 위험성이 증가한다(Jeong et al. 2012). 이러한 개체의 잘못된 선택 결과는 생물 군집까지 영향을 미쳐 생물 다양성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 식물 계절 연구는 생태적 과정의 결과와 환경과의 관계를 분석한다.

또 식물 계절은 생태적 과정의 결과 기후 변화가 지표 생태계에 미치는 영향을 이해하는 데 필수적이다(Vitasse et al. 2011). 예를 들어 겨울이 지나고 식물의 생장이 시작되는 개엽은 경관단위에서 표면의 거칠기와 알베도를 변화시키며, 호흡으로 인한 증발산은 지표와 대기 사이의 물질, 에너지 교류를 영향을 미칠 수 있기 때문에, 식물계절 변화를 이해하는 것은 기후변화를 이해하고 예측하는 데 큰 도움이 될 수 있다(Chuine et al. 2000). 많은 연구들이 식물 계절을 관측자료와 위성자료, 실험자료를 기반으로 기후변화와 식물 계절의 관계를 모의하여 이른 개엽이 증발산 작용을 통해 계절적 온도와 탄소저감효과를 가지는 것으로 나타냈다(Chuine et al. 2000, Jeong et al. 2013, Jeong et al. 2014, Zhao et al. 2013, Cleland et al. 2007).

## 2. 식물계절 관측자료와 지역과 수종에 따른 차이

식물 계절연구자료는 인간의 관측을 기반으로 한 개체 단위의 지상 관측 자료, 군집단위의 관찰을 위한 영상(phenocam), 항공자료(UAV), 마지막으로 경관(landscape)단위를 볼 수 있는 위성 영상자료를 통해 얻을 수 있다. 각 자료는 모두 장단점이 있다. 개체단위의 지상 관측은 가장 전통적인 방법의 관측으로 특정 지역에서 특정 식물의 계절 변화를 기록하여 직관적인 식물계절 변화의 증거로 이용될 수 있다. 하지만 직접적인 관찰로 지리적, 경제적 한계가 있어 특정 개체와 지역만을 보여 줄 수 있으며 공간 분포가 불균형하며 관측자에 따라 식물계절 관측과 판단에 다른 기준이 적용될 수 있는 문제점을 가지고 있다. 하지만 최근 미국의 USA-NPN과 PEP-725와 같은 식물계절 네트워크를 통해 장기적이고 넓은 지리학적 범위의 데이터를 구성하여 한계점을 극복해 나가고 있다(Jeong et al. 2013, Fu et al. 2015, Melaas et al. 2015). 특히 스마트폰의 발달로 인해 시민 과학자(citizen science)들의 접근 가능성이 늘어나 더 많은 종과 더 넓은 지역을 대상으로 관측하여 한계를 단점을 극복해나가고 있다.

군집단위 이상의 카메라, 항공, 위성 사진을 이용한 식물계절 연구는 관측지역을 촬영한 자료를 기반으로 정규화 식생지수(Normalized difference vegetation index, NDVI) 또는 Enhanced Vegetation Index(EVI)와 같은 녹색지수(Greenness Index)를 추출하고 시간에 따른 변화를 통해 식물의 성장을 시작하는 시기와 종료 시기를 유추해낼 수 있다. 위성자료는 구름, 눈, 수증기 등 관측 조건에 따라 결과가 영향 받는 문제점이 있지만, 지상 기반 관측자료로는 다루기 어려운 경관 규모 이상의 식물 계절을 자료를 얻을 수 있는 큰 장점이 있어서 최근 많



은 연구가 위성자료에서 추출한 데이터를 이용해 이뤄졌다.

장기간 기록된 지상관측과 위성자료의 데이터를 이용해 보여준 식물계절의 변화는 <표 2-1>과 같다. 각 연구는 북반구, 유럽, 유라시아, 동아시아 등 다양한 지역에서 짧게는 17에서 47년간의 변화는 최소 0.9일에서 28일까지 기간과 지역에 따라 다양하게 나타났다. 하지만 여기서 북반구의 모든 지역에서 그 정도는 다르지만 식물생장이 시작되는 봄이 오는 시기가 빨라지고 있었다. 많은 식물성장기간의 시작시점에 관한 연구와 달리 식물성장기간의 종료시점에 관한 연구는 개엽일에 비해 적었다. 그 이유는 휴면상태에서 식물생장을 시작하는 시점은 녹색지수의 변화를 통해 비교적 분명하게 찾아낼 수 있지만, 식물의 광합성과 식물생장이 종료되는 시점은 종에 따라 단풍의 색이 다르며, 다른 생존전략을 가지고 있어서 정확한 종료 시점을 파악하기 어렵기 때문이다. Menzel & Fabian(1999)은 유럽의 각지에서 1951년부터 1996년까지 관측된 지상관측자료를 기반으로 식물생장의 시작점이 6.3일씩 빨라지는 반면 식물생장의 종료시점이 4.5일 늦어지고 있어서 전체 식물성장기간이 10.8일 늘어나고 있음을 밝히며 단풍과 낙엽을 포함한 가을 식물계절의 필요성을 시사했다. 이외의 연구들에서도 식물의 성장기간의 시작이 빨라지고 있을 뿐 아니라 식물생장의 종료시점이 함께 늦어지며 식물성장기간이 늘어나고 있음을 밝혔다(Penuelas et al. 2002, Piao et al. 2006, Julien & Sobrino 2009).

모든 지역에서 식물성장기간의 시작이 빨라지고 종료가 늦어지는 공통적인 현상이 나타났지만, 지역과 수종에 따라 식물계절의 반응이 같은 기간에도 다르게 나타났다. 따라서 기후변화를 이해하고 생태계의 역할을 이해하기 위해서 한국에서 발생하고 있는 식물계절의 변화를 파악하기 위한 연구가 필요함을 시사한다.

<표 2-1> 장기적 식물계절 변화 연구 결과

구분	조사범위 (지역)	조사기간	식물계절변화 (days)			참고문헌
			시작	종료	길이	
1	북반구	1981-1991	-8		17	Myneni et al. (1997)
2	유럽	1951-1996	-6.3	4.5	10.8	Menzel & Fabian (1999)
3	45-75N	1982-1991	-6		4	Tucker et al. (2001)
4	45-75N	1992-1999	-2		0.4	Tucker et al. (2001)
5	유라시아	1981-1999	-7		18	Zhou et al. (2001)
6	북아메리카	1981-1999	-8		12	Zhou et al. (2001)
7	중앙,서유럽	1951-1998	-28			Ahas et al. (2002)
8	유럽	1951-1999	-10			Ahas et al. ( 2002)
9	유럽	1969-1998	-8			Chmielewski&Rotzer (2002)
10	스페인	1952-2000	-16	13	29	Penuelas et al. (2002)
11	유럽	1982-2000	-11		19.2	Stockli & Vidale (2004)
12	중국	1982-1993			17	Chen et al. (2005)
13	북미	1985-1999	-0.9			de Beurs &Henebry (2005)
14	유라시아	1985-2000	-6.7			de Beurs & (2005)
15	중국	1982-1999	-14	6.65	19	Piao et al. (2006)
16	미국	1955-2002	-4.8			Schwartz et al. (2007)
17	전구	1982-2003	-6.3	1.1	12.1	
18	동아시아	1982-2000	-7			Jeong et al. (2009)

### 3. 한국에서 식물 계절에 관한 연구

식물계절의 변화는 지역과 종에 따른 특수성을 가진다. 급격한 식물계절의 변화는 이른 개엽으로 인해 서리에 의한 식물 피해를 증가시키거나 잎에 의한 물리적 역할과 증발산을 통한 미기상 조절 기능 변화를 전반적인 생태계에 큰 영향을 줄 수 있다. 이러한 이유로 세계적 식물계절의 변화가 이뤄졌지만, 한국의 지역과 종을 고려한 데이터를 수집하고 연구할 필요가 있다.

국내 식물 계절 관측과 연구는 주로 도시 및 농업 지역의 관리를 목적으로 도시지역에 위치한 기상청에서 시행되었다. 기상청은 식물계절 관측은 꽃과 단풍을 중점적으로 1921년부터 꽃에 관한 식물계절 자료를 중점적으로 수집해왔다. 기상청은 식물의 단풍과 낙엽에 관한 정보를 추가해 1972년부터 지금까지 관측이 이뤄지고 있다. 기상청의 오랜 관측 데이터를 기반으로 Ho et al.(2006)은 서울에서 관측된 1922년부터 2004년까지 벚나무, 매화나무, 아카시나무의 개화일의 변화를 연구해서 10년마다 약 0.5~2.4일씩 빨라지고 있으며 평균기온 증가에 꽃이 피는 시기가 빨라지고 있는 것으로 나타났다. Jeong et al.(2018) 또한 기상청의 자료를 기반으로 한국 수도권에서 봄이 빨라지고 가을이 지연되는 경향이 나타났지만, 인구밀도가 높은 대도시일수록 식물계절의 변화가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 산림에서 발생하는 식물계절의 변화는 도시지역과는 차별성을 가질 수 있음을 시사한다.

하지만 도시지역과 구분되는 한국의 산림지역의 식물계절에 관한 연구는 1~2년 단위의 짧은 기간을 대상으로만 이뤄져 한국의 온대 산림지역의 식물계절 변화에 관한 추가적 연구가 필요하다.

### Ⅲ. 분석 자료와 연구 방법

#### 1. 한국 산림의 식물 계절 자료

해외의 연구들에서는 국가 간 네트워크를 통해 시공간적 한계를 극복해 나가며 기후변화에 의한 영향 연구가 이뤄지고 있다(Cleland et al. 2007). 하지만 기존의 한국을 대상으로 한 연구들은 기상청에서 관측한 도시지역의 일부 벚나무, 코스모스, 매화 등 꽃나무와 배나무, 복숭아와 같은 과실수를 중점적으로 다뤄지고 있었기 때문에 본 연구는 국립수목원을 중심으로 각 도립수목원이 참여하여 2009년부터 관측해온 장기 식물 계절 관측자료를 기반으로 한다. 국립수목원의 관측자료는 <그림 3-1>에 나타난 것과 같이 총 10개 수목원 50개 조사지역에서 정보가 수집되었으며 50개 조사지역의 위치는 <부록 표 1>에 나타냈다.

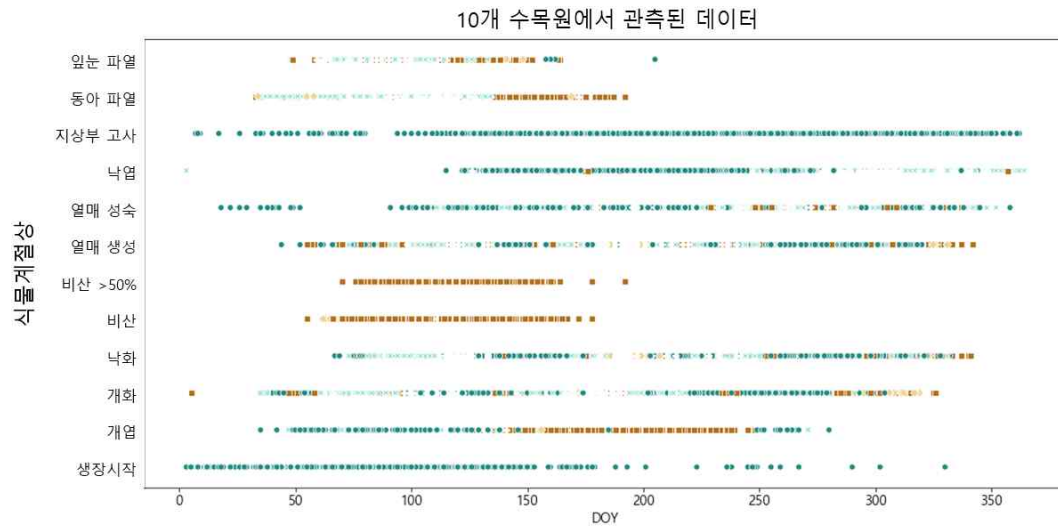
각 수목원에서 서로 다른 형식으로 수집된 자료를 사용하기 위해 하나의 형식으로 통합하는 과정이 필요하다. 각 수목원에서 수집된 자료들은 표준 학명을 사용하지 않고 일반적으로 불리는 국명에 따라 정리되어 있기 때문에 지역별로 다른 이름이 사용되었다. 서로 다른 이름을 사용했기 때문에 수목원별 현황 파악이 어렵고 수목원 간 식물계절을 비교하기 어려웠다. 따라서 학명에 따라 수목원의 식물들을 정리했다. 또 식물계절 관측 결과의 표기법도 다르게 되어있었다. 주기적으로 반복되는 식물계절 분석에 용이하며 1월 1일부터 몇 번째 날인지를 나타내는 줄리안 데이(julian day)로 나타냈다. 통합된 모든 수목원의 자료는 2009년부터 2017년까지 <그림 3-2>의 잎눈과열부터 개엽, 개화, 열매결실, 단

풍, 낙엽 등 총 12단계의 식물계절상으로 구분되어 총 256종의 총 72,198개의 관측값을 가지고 있다.



수목원	약어	위도	경도	고도		
				평균	최대	최소
강원도립화목원	KW	37.9489	127.7206	475	1455	83
국립수목원	KR	35.3977	128.0438	716	1600	57
물향기수목원	MHG	37.7487	127.1576	259	650	127
미동산수목원	MDS	35.9370	128.5985	175	520	48
금강수목원	KK	36.4365	127.2349	115	180	49
대아수목원	DA	35.83843	127.1414	314	747	84
대구수목원	DG	37.36923	127.1449	254	849	44
경상남도수목원	KN	36.63228	127.7756	379	682	251
완도수목원	WD	34.42319	126.663	372	809	110
한라수목원	HL	33.4294	126.4849	410	1321	11

<그림 3-1> 본 연구의 식물계절 조사지 위치



〈그림 3-2〉 10개 수목원에서 관측된 12단계로 구분된  
자료 현황

본 연구에서는 자료 선정하기 위해 잎의 성장과 노화(senescence), 관측 수와 시계열의 길이를 중요하게 고려했다. 잎의 성장과 노화(senescence)는 숲의 식물계절 변화를 시공간적 추세를 보여줄 수 있는 데이터로 많은 연구 들에서 기후변화의 지표로 사용되었다(Hanes et al. 2013). 식물 생장이 시작되는 봄철 식물계절을 보기 위해 잎의 형태가 완성되는 개엽일을, 식물 성장 기간이 종료되는 가을 식물계절을 보기 위해 잎이 떨어지는 낙엽일을 선택했다. 가을의 식물계절에 대한 연구는 봄철 식물계절 변화보다 연구가 적지만 최근의 연구들에서 낙엽일보다 단풍이 기존의 연구들에서 다루며 환경 변수들과의 높은 상관관계를 보여줬다(Jeong et al. 2018, Gill et al. 2015). 하지만 국립수목원의 관측자료의 경우 단풍에 대한 각 수목원의 관찰자의 기준에 따라 단풍을 정의가 달라졌기 때문에 단풍에 비해 주관성이 적은 낙엽자료를 선정했다. 또 식물의 활동기간을 나타내며 낙엽일과 개엽일의 차이를 식물 성장

기간으로 산정했다.

2009~2017년까지 최장 9년간의 관측 기록이 있는데 기상문제로 인한 결측값과 2009년 이후에 관측대상으로 추가된 종의 경우 연도에 따른 추세를 보기 위해 최소 6년 이상 관측된 종을 아래의 표<3-1>와 같이 선정했다. 금강수목원의 경우 2014년부터 관측이 시작되어 본 연구에서는 제외되었다.

<표 3-1> 선정된 7종의 개엽일 데이터와 2종의 낙엽일 데이터의 기초통계

개엽일					
구분	종	학 명	관측 수	평균	표준편차
1	진달래	Rhododendron mucronulatum	317	111.81	12.77
2	생강나무	Lindera obtusiloba	273	116.59	10.07
3	철쭉	Rhododendron yedoense	268	114.05	13.43
4	당단풍나무	Acer pseudosieboldianum	239	122.41	11.78
5	산수유나무	Cornus officinalis	94	105.35	9.01
6	개나리	Forsythia koreana	90	114.54	9.85
7	백목련	Magnolia denudata	83	116.12	7.82
낙엽일					
구분	종	학 명	관측 수	평균	표준편차
1	진달래	Rhododendron mucronulatum	344	317.01	12.54
2	생강나무	Lindera obtusiloba	272	309.94	12.44

관측된 수목별 모든 관측자료의 평균 개엽일은 <표 3-2>에 나타난 것과 같이 수목원 별로 관측된 개엽일의 평균은 108일부터 120일까지로 나타났으며 낙엽은 평균은 미동산수목원에서 관측된 낙엽일의 평균이 307.53일로 가장 빠르게 한라수목원에서 관측된 낙엽일의 평균이 328.50일로 가장 늦는 것으로 나타났다.

<표 3-2> 9개 수목원의 개엽일과 낙엽일의 평균과 표준편차

수목원명	약어	개엽		낙엽	
		평균	표준편차	평균	표준편차
강원도화목원	KW	120.05	10.12	308.07	10.83
국립수목원	KR	115.15	8.14	308.27	15.08
물향기수목원	MHG	116.29	8.90	311.14	11.60
미동산수목원	MDS	120.92	12.28	307.53	11.72
대아수목원	DA	108.77	6.27	315.87	6.93
대구수목원	DG	112.43	9.34	313.52	14.75
경남수목원	KN	116.12	12.82	312.97	10.69
완도수목원	WD	106.30	7.74	324.73	7.32
한라수목원	HL	115.35	20.25	328.50	10.01



## 2. 환경변수로서의 기온

겨울 동안 휴면기를 지나 잎눈이 나오기 위해서는 특정 온도의 임계점을 넘어야 하며, 어느 정도 차가운 공기에도 노출되어야 한다(Murray et al 1989). 식물마다 필요로 하는 열 요구량과 냉기 노출 조건은 다르지만, 일반적으로 0~10℃ 사이의 기온에 노출을 필요로 한다(Perry 1971). 하지만 한국의 온대 산림지역에서는 겨울 시기 동안 충분히 냉기에 노출되어 해마다 기온의 상승이 식물계절에 가장 큰 영향을 준다. 이러한 이유로 기온은 식물의 개엽을 가장 잘 설명해주는 변수로 많은 연구에서 활엽수의 봄철 식물 계절을 설명하기 위해 변수로 채택해왔다(Vitasee et al., 2011, Olsson & Jonsson, 2014). 봄철 식물계절 변화와 기온의 상관관계에 관한 기존의 연구결과들을 <표 3-3>에 정리했다. 기존의 연구들에서 보면 종과 조사지역에 따라 그 반응이 서로 다를 수 있다. 1960년대부터 2000년대까지 약 40년 동안 다른 지역인 영국에서 기온이 1℃ 증가할 때 사과와 개엽이 4.6일 빨리진 것에 비해 호주에서는 2.8~7.5일 빨라진 것으로 나타났다(Estrella et al. 2007, Darbyshire et al. 2012).

가을철은 온대 낙엽수림에서 나무의 성장 기간이 끝나는 시점을 말한다. 식물의 잎에서 영양분이 빠져나가며 잎의 색이 변하는 단풍을 거쳐 결국 떨어지는 과정을 거친다. 개엽과 달리 단풍과 낙엽에 관한 연구는 거의 이뤄지지 않아, 낙엽이 발생하는 원인에 대한 이해는 부족한 실정이다(Estrella & Menzel 2006). 기온의 하강 혹은 일주기의 감소가 낙엽의 원인으로 생각되었지만, 너도밤나무와 설탕단풍의 경우 온도의 감소가 낙엽의 변화를 가장 잘 설명해주는 것으로 나타났다(Richardson et al 2006). 따라서 본 연구에서는 개엽과 낙엽을 포함한 한국의 식물

계절 변화를 이해하기 위해서 가장 주요한 변수로 기온을 선택했다.

<표 3-3> 종과 지역에 따른 개엽일의 변화 차이 연구

구분	조사범위 (지역)	조사기간	종	개엽일의 반응	참고문헌
1	영국	1921-1950	사과	7-9 d/°C	Cannell and Smith (1986)
2	영국	1954-1989	267종	4-6 d/°C	Sparks & Carey (1995)
3	위스콘신	1976-1998	복합	2.7 d/°C	Bradley et al. (1999)
4	영국	1875-1947	11 수종	4 d/°C	Sparks et al. (2000)
5	독일	1961-2000	사과&체리	4.6~4.7 d/°C	Chmielewski et al. (2004)
6	메사츄세츠	1970-2002	닥나무, 아네모네	0.45~ 1.13 d/°C	Liu and Hu (2004)
7	베이징	1950-2004	아몬드, 라일락	2.19~2.88 d/°C	Liu et al. (2006)
8	유럽	1971-2000	542 종	2.5 d/°C	Menzel et al. (2006)
9	독일	1951-2004	20 농작물	4.3 d/°C	Estrella et al.(2007)
10	일본, 한국	1953-2005	, 민들레, 동백나무	4 d/°C	Primack et al(2009)
11	중국	1986-2005	비술나무	2.8 d/°C	Chen and Xu (2012)
12	호주	1963-2009	사과, 배	2.8-7.5 d/°C	Darbyshire et al.(2012)

기온 자료는 종관기상관측망(ASOS)과 방재기상관측망(AWS)에서 관측한 일 평균 기온 자료를 사용했다. AWS는 기상현상에 따른 자연재해를 파악하기 위해 관측된 자료로 전국 510여 곳에 설치되어 있어 대부분의 식물계절 관측지역과 가까운 지역의 자료를 얻을 수 있었다. 종관기상관측망의 자료의 경우 유인관측장비로 그 개소는 방재기상관측망보다 적지만 모든 관측소에서 같은 시간 관측을 함으로써 지역자료보다 오

차가 적고 신뢰도가 높아 각 지역의 대표지역에 가장 가까운 관측소를 선택할 수 있었다. 관측이 시작된 2009년의 겨울이 시작되는 2008년 12월 1일부터 2017년 12월까지의 일 평균기온을 기초 데이터로 사용했다.

### 3. 분석 방법

본 연구의 목적은 한국 온대 산림의 식물계절의 특성을 파악하고 지난 9년간 어떤 변화가 발생했는지를 확인하고, 식물계절의 변화가 발생한 원인을 밝히는 것이다. 이를 위해 본 연구는 크게 3단계로 구분되며, 단계별로 자세한 연구 방법은 다음과 같다.

첫 번째는 한반도 내에서 종에 따른 식물계절 분포 특성을 파악하고 한반도에서 발생하고 있는 식물계절 변화추세를 분석한다. 데이터가 많은 개엽일의 경우 내삽(interpolation)을 통해 관측지역 간 사이의 값들을 추정하여 한반도 내에서 위도와 고도에 따른 개엽일의 관계를 파악한다. 관측의 수가 적은 낙엽일은 산포도(scatter plot)를 이용하여 관측지역에서의 식물계절의 변화와 특성을 확인할 수 있도록 한다. 그리고 한반도에서 식물계절의 변화 추세를 확인한다. 식물계절의 변화를 확인하기 위해 관측된 종을 지역별로 구분하여 2009년부터 2017년까지 관측된 개엽일을 종속변수로 연도에 따라 선형회귀분석한다. 선형회귀분석 결과 나타난 최적선의 기울기를 통해 최근 9년간 개엽일, 낙엽일, 식물생장기간이 어떤 변화가 나타났는지를 확인할 수 있다. 지역에 따라 구분된 종을 선형회귀분석한 각 결과를 하나의 표본으로 간주한 히스토그램을 통해 한반도 전체에서 발생하고 있는 식물계절의 변화를 분석한다.

두 번째는 식물계절변화가 발생한 원인을 찾기 위해 낙엽 또는 개엽과 온대산림에서 가장 중요한 변수로 작용하는 기온을 설명변수로 선형회귀분석을 실시한다. 누적된 기온의 영향을 보기위해 개엽일과 낙엽일을 종속변수로 월별, 계절별 평균기온과의 선형회귀분석을 통해 기온의 상승에 따른 식물계절의 변화를 본다. 계절의 구분은 기상학적인 구분에 따

라 12월에서 2월까지를 겨울, 3월에서 5월까지를 봄, 6월에서 8월까지를 여름, 9월에서 11월까지를 가을로 정의했다. 기온의 상승에 따라 얼마만큼 식물계절이 영향을 받을 수 있는지, 또 종에 따라 얼마나 다르게 나타나는지 확인한다.

마지막으로 식물 계절의 변화를 설명하기 위해 두 가지 가설을 이용하여 식물계절의 예측값을 계산한 후 관측값과 비교한다. 두 경험식은 식물계절 현상이 관측된 날까지의 누적된 기온을 기반으로 식물계절 변화가 발생한 이후에 발생한 변화를 분리해서 볼 수 있다. 첫 번째는 잎이 나기 전까지 축적된 온도인 GDD(Growing degree days)가 식물의 개엽에 가장 중요한 환경변수라고 가정했다(Fu et al. 2015, Jeong et al. 2012, Ho et al. 2006, Vitasse et al., 2011). 월별, 혹은 계절별 평균온도는 식물계절 현상이 발생한시점 이후까지 포함할 수 있는 문제점이 있지만 GDD는 잎이 나기 전 날까지의 온도만 포함하기 때문에 이런 문제점을 개선하여 식물이 개엽을 위해 필요로 하는 열을 계산할 수 있다. GDD의 계산은 아래 방정식을 통해 얻을 수 있다(Eq. 1.). 이 식은 1월 1일부터 5℃ 이상인 날의 평균온도 T를 식물이 개엽하는 날인 t까지 적산한다. t일까지 적산된 열이 일정 역치를 넘으면 개엽현상이 발생한다고 가정하여 예측값을 얻는다. 예측값은 식물별로 계산된 GDD의 평균을 통해 식물이 필요로 하는 열을 구하고 기상자료를 이용하여 GDD까지 도달하는데 필요한 날의 수로 계산한다.

$$GDD(t) = \sum_{Jan 1}^t \max(T - 5^{\circ}C, 0) \quad (1)$$

t : 개엽일

T = 일평균온도(℃)

두 번째 낙엽일은 연중 기온이 가장 높은 여름기간이 지나고 평균기온이 일정 수준 밑으로 떨어지는 날이 늘어나게 되며 낙엽이 발생하기 때문에 CDD(Cooling Degree Days)가 낙엽을 설명할 수 있을 것이라 가정했다. CDD도 GDD와 마찬가지로 개엽현상이 발생하기 전까지만의 온도를 적산하기 때문에 기존의 평균온도와의 분석의 문제점을 개선할 수 있다. CDD를 계산하기 위해 아래의 경험식을 사용하여 180일을 기준으로 일평균기온 T가 20℃보다 낮은 온도만 낙엽이 발생한 t일 까지 적산한다(Eq. 2.). t일까지 20℃보다 낮은 온도가 일정 역치를 도달하면 낙엽현상이 발생한다고 가정하여 예측값을 얻는다. 예측된 낙엽일은 180일 이후로 기상자료를 이용하여 관측된 식물 자료마다 필요로 했던 종별 평균 CDD값을 넘는 첫날로 하였다.

$$CDD(t) = \sum_{t=180}^t \max(0, -(T-20)) \quad (2)$$

t : 개엽일

T = 일평균온도(℃)

## IV. 연구 결과 및 토의

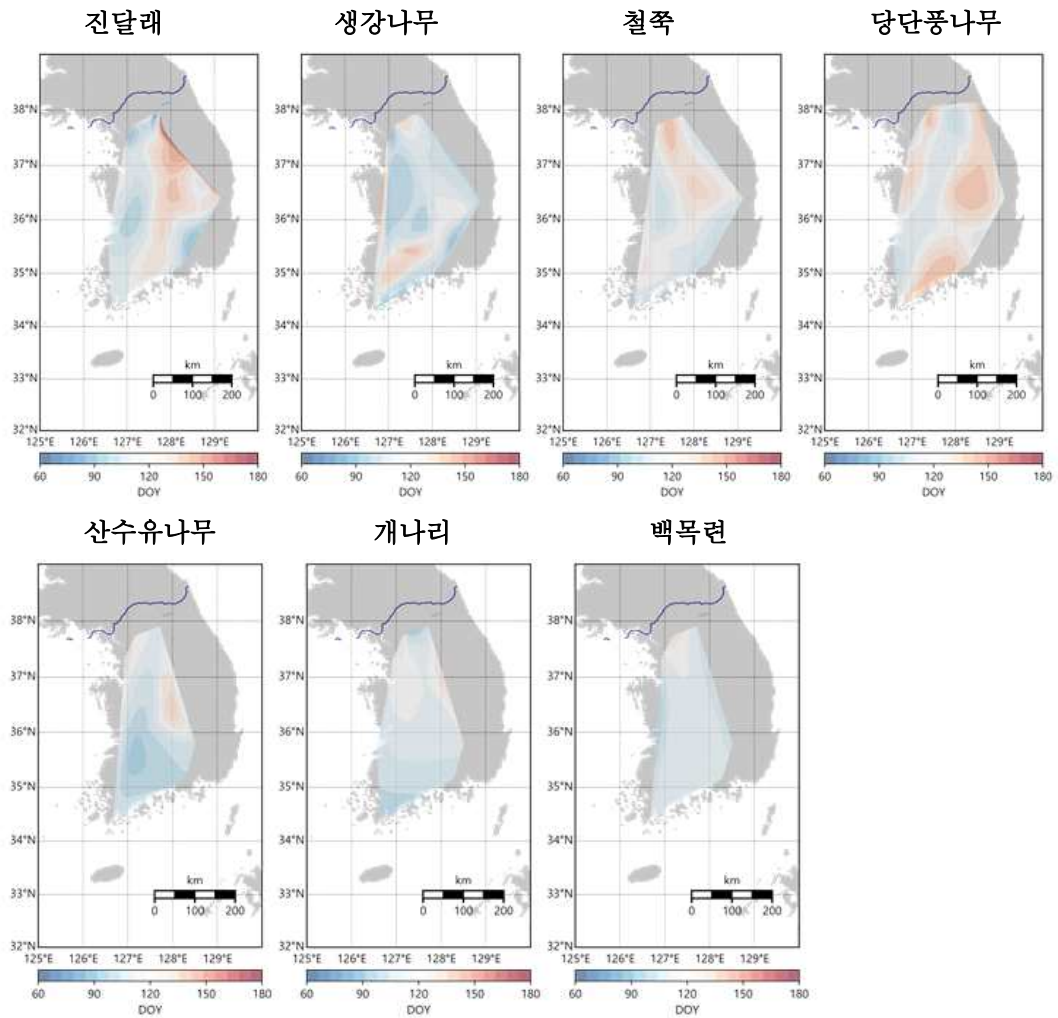
### 1. 한국의 종별 식물계절 분포 특성

한반도의 식물계절 분석에 앞서 각 수목원의 데이터를 학명과 식물계절현상이 발생한 날을 1월 1일을 기준으로 몇 번째 날인지를 의미하는 줄리안데이터로 통합했다. 통합된 데이터에서 식물의 성장기간에 집중하기 위해 온대산림의 식물계절 변화를 잘 보여줄 수 있는 개엽일과 낙엽일을 선정하여 모든 수목원에서 관측지별로 6년 이상의 관측이 있는 데이터를 분석 대상으로 선정하였다. 개엽과 낙엽의 변화를 보여줄 관측 종은 각각 7종, 2종이 선정되었다<표 3-1>. 선정된 종별 개엽일과 낙엽일의 분포를 각각 <그림 4-1>과 <그림 4-2>에 나타냈다. 각 그림에서 위도가 높은 지역일수록 개엽일은 늦어지고 낙엽일은 빨라지는 것을 보이며, 고도가 높은 산지에서 관측된 값들이 주변의 값들보다 개엽일이 늦어지며 낙엽이 빨라지는 모습을 보이고 있었다.

관측된 종 중 개나리의 경우 평균 개엽일이 105.43일로 가장 빠른 것으로 나타났다. 한반도의 중부에 위치한 강원도화목원부터 미동산 수목원까지 각 전시원에서 관측된 개나리의 평균 개엽일은 110일에 가까운 109일부터 111.25일까지 나타났다. 이보다 위도가 낮은 한반도의 남부 지역인 대구와 경남수목원에서는 각 101일과 103번째 날 개엽이 발생했으며 최남단인 한라수목원의 전시원에서 관측된 개나리의 경우 평균 92.13일로 가장 개엽일이 빠르게 나타났다. 또 강원도에서 관측된 당단풍나무를 보면 고도가 낮은 지역에 위치한 전시원에서 관측된 당단풍나무의 개엽일의 평균이 113.29 일인 것에 비해 고도가 높은 지역인 광덕

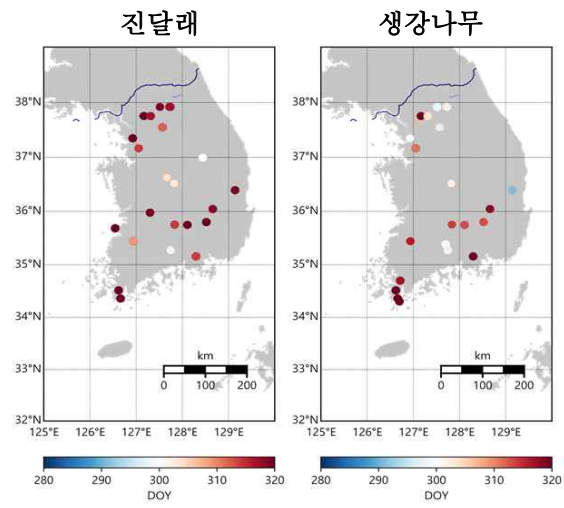
산과 설악산 권금성에서 관측된 자료의 평균은 각각 123.75와 132.33일로 10~20일까지 개엽일이 늦어지는 것으로 나타났다.

<낙엽일 설명 추가하기>



<그림 4-1> 2009-2017년 관측된 종별 개엽일 평균을 이용한 개엽일 분포지도



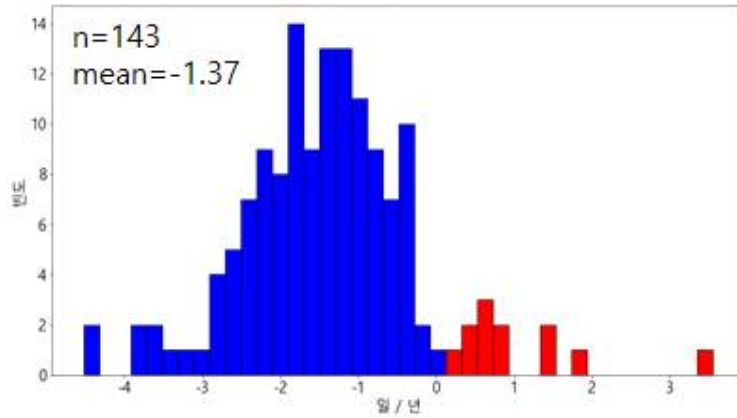


<그림 4-2> 2009-2017년 관측된 종별 낙엽일 평균을 이용한  
낙엽일 분포지도

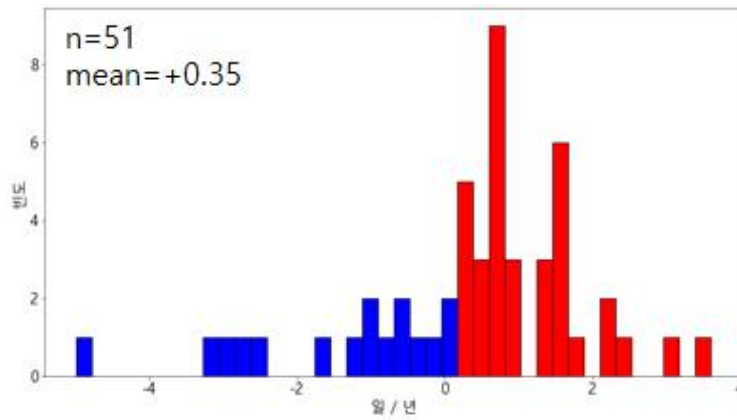
## 2. 2009~2017년까지 한국의 식물계절 변화

기존의 연구들에서 북반구에서 식물생장의 시작일은 빨라지고 낙엽일은 늦어지며 식물생장기간도 늘어나고 있었다<표 2-1>. 최근 한국의 도시지역을 대상으로 한 연구에서도 장기적으로 개엽과 개화가 빨라지는 것으로 나타났다(Ho et al. 2006, Jeong et al. 2018). 도시화의 영향에서 벗어난 산림지역에서 식물계절의 시간에 따른 변화추세를 확인하기 위해 관측지에 따라 구분된 종의 개엽일과 낙엽일, 그리고 식물생장기간을 연도를 독립변수로 선형회귀분석을 실시했다. 선형회귀분석을 위해 관측은 최소 6년 이상 기록된 데이터들만을 선정했다<부록 표 4>. 분석 결과, 식물계절의 연도별 변화를 보여주는 최적선의 기울기 값을 얻을 수 있었다. 식물계절의 변화추세를 <그림 4-3>, <그림 4-4>, <그림 4-5>에 히스토그램으로 개엽일, 낙엽일, 식물생장기간 순으로 나누어 나타냈다. 개엽일은 143개, 낙엽일은 51개, 식물생장기간은 49개의 도수를 가진다.

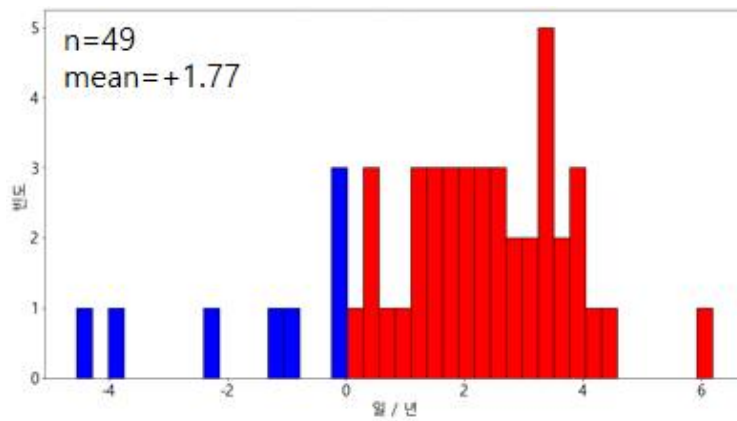
개엽일은 평균 1년에 1.37일씩 빨라지고 있는 것으로 나타났으며 143개의 최적선 중 97%가 개엽일이 빨라지고 있었고 4개의 경우만 개엽일이 늦어지고 있는 것으로 나타났다. 개엽일이 늦어지는 것으로 나타난 4개는 광덕산에서 관측된 당단풍나무, 두륜산과 정도리에서 관측된 생강나무, 한라수목원에서 관측된 철쭉이었다. 광덕산의 당단풍나무 경우 9년간 봄의 평균보다 따뜻했던 2009년에 16일이나 이른 개엽이 나타나 결과에 영향을 주었다. 나머지 3개의 경우는 평균 개엽일이 빠른 2009년부터 2012년까지의 데이터가 누락되어 개엽일이 늦어지는 것으로 나타났다.



<그림 4-3> 2009-2017년 동안 한국의 식물 개엽일 변화



<그림 4-4> 2009-2017년 동안 한국의 식물 낙엽일 변화



<그림 4-5> 2009-2017년 동안 한국의 식물성장기간 변화

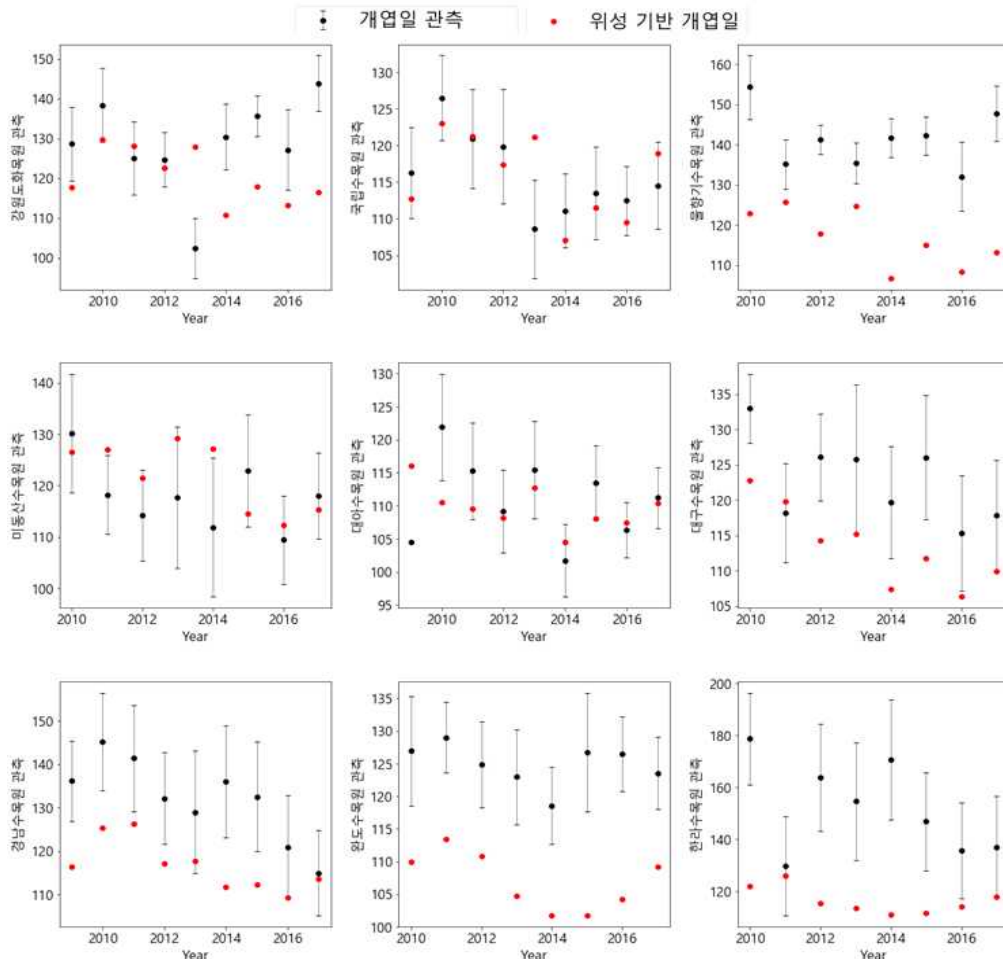
낙엽일은 개엽일에 비해 분명한 경향성을 보여주지 못했다. 낙엽일은 평균 1년에 0.35일씩 증가하는 것으로 나타났는데 51개의 경우 중 38개의 결과가 낙엽일은 늦어지는 것으로 나타났다. 낙엽일이 빨라지는 것으로 나타난 13개는 2014년에서 2016년 사이에 발생한 조기낙엽이 원인이 되었다. 팔공산에서 2016년 관측된 생강나무의 경우 다른 해의 평균보다 80일가량 이른 낙엽이 발견되었고 소리봉에서 관측된 진달래의 경우도 2014년부터 17년까지 연도별 관측값 간 간격이 65일까지 나타나 평균 낙엽일 보다 훨씬 빠른 조기 낙엽현상이 발생했다.

식물성장기간은 개엽일과 낙엽일 데이터가 모두 있는 경우만 고려하여 그 차이를 통해 나타냈다. 식물성장기간은 총 49개의 빈도를 가졌으며 평균 해마다 1.77일 씩 식물성장기간이 늘어나고 있었다. 모든 데이터 중 36개의 경우 식물성장기간이 늘어나고 있는 것으로 나타났다.

기존의 위성 기반의 연구에서 북반구의 식물성장기간이 증가하는 개엽일이 지연된 식물성장기간의 종료일에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다 (Jeong et al. 2011, Garonna et al. 2014). 한국의 개엽일의 평균은 1.37일 빨라졌고 낙엽일 0.41 늦어져 식물성장기간은 1.77일 늘어나는 것으로 나타나 개엽일의 반응이 낙엽일보다 3배가량 큰 것으로 나타났다<부록 표 4>. 하지만 조기낙엽이 발생하는 경우 낙엽일의 변화가 식물성장기간을 크게 변화시켜 낙엽일과 식물성장기간의 0.85의 양의 상관관계를 가져 개엽일과 식물성장기간의 상관관계  $-0.62$  보다 더 큰 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

한국에서 위성을 이용한 2003년부터 2016년까지의 식물성장 시작점의 변화도 년마다 0.16일씩 빨라지는 것으로 나타나며 지상관측 자료의 개엽일 변화와 유사함 변동을 보여줬다(이보라 외. 2018). 위성자료는 경관단위로 접근하기 때문에 개체 단위로 접근하는 지상 관측 자료와는 차

이점을 가진다. 일반적으로 위성을 이용한 자료는 녹색지수가 크게 증가하는 기울기가 최대가 되는 시점으로 산출하는 이 시점은 나무의 개엽이 아닌 초본과 관목의 잎이 나오는 시점으로 생각된다(Helman 2017).



<그림 4-6> 연도에 따른 선정된 7종의 개엽일 기록과 위성의 식물성장 시작일 비교 그래프

이러한 이유로 산림지역에서 관측된 활엽 관목 및 소교목의 데이터를 이용하여 위성자료가 계산한 식물성장 시작일과 지상관측 자료를 비교해 보았다(<그림 4-12>).

<그림 4-12>는 수목원별로 <표3-1>에서 선정된 산림에서 쉽게 관측할 수 있는 7종이 선택되었다. 선정된 관목 자료의 개엽일 평균과 표

준편차를 검은색 오차막대를 통해 표현했다. 위성자료에서 계산한 식물 성장 시작점을 빨간색 점으로 나타냈다. 미동산수목원의 경우를 제외하고 나머지 지역에서 지역별 관목의 개엽일 평균보다 위성자료에서 관측된 식물 성장 시작이 더 빠른 것으로 나타났다. 특히 완도 수목원에서는 평균 개엽일의 연도에 따른 변동과 위성에서 계산된 식물 성장 일이 같이 연도에 따라 변동하는 모양을 보여주었다. 위성에서 도출한 식물 성장 시작일의 자료와 가장 값이 가까운 관목 별 최소값은 개엽일과 96%의 상관관계를 가졌다.

국립수목원에서 개엽일의 관측 기준은 잎이 크기에 상관없이 잎의 형태를 갖췄을 때를 기준으로 관측되었다. 이 시점은 잎눈이 나온 후, 잎의 크기가 성장하는 단계로 잎눈이 나오는 시점은 개엽일의 관측 시점보다 조금 더 빠를 것이라 유추할 수 있다. 관목의 평균 개엽일의 최소값에 가까운 날과 높은 식물생장의 시작일의 상관관계를 보여줬다. 따라서 위성자료는 선행연구들에서 제시한 가능성인 관목의 잎눈이 나오고 성장하는 단계를 중점적으로 관측한 것으로 보인다.

### 3. 기온변화에 따른 한국의 식물계절 변화

한국의 산림지역에서 식물계절 변화 추세를 설명하기 위해 식물계절에 가장 영향을 주는 것으로 알려진 평균 기온과 식물계절 관측자료를 종속 자료로 선형회귀 분석을 시행했다. 식물계절현상은 일시적인 기온의 효과가 아닌 누적된 기온에 영향을 받기 때문에 식물계절현상이 발생하기 선행된 계절에 많은 영향을 받는다. 선행된 계절과의 상관성을 보기 위해 월별 평균과 계절별 평균 기온과 관측된 식물계절자료를 종속변수로 분석했다<부록표 5>.

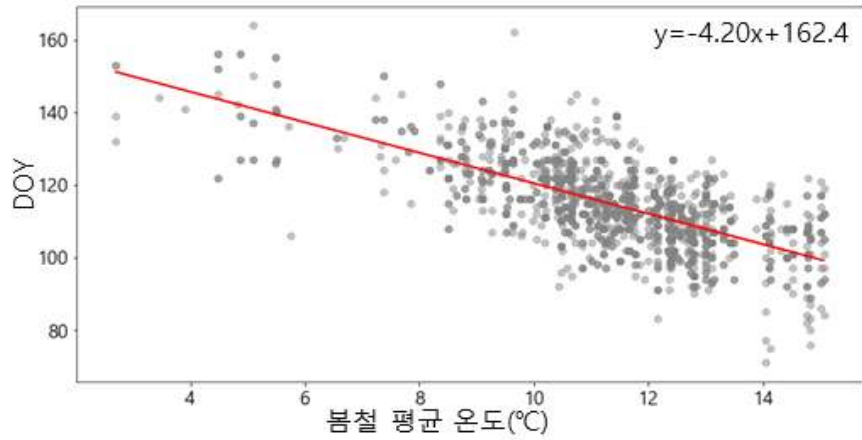
분석결과 모든 월과 계절의 평균온도가 상승함에 따라 개엽일이 빨라지고 낙엽일은 느려지는 것으로 나타났다<부록 표 5>. 개엽일의 변화는 봄철 평균온도와 4월, 5월의 평균 기온이 높은 설명력을 보이며 높은 민감도를 보여줬다( $p\_value < 0.01$ ). 개엽일은 봄 평균온도가 1°C 상승함에 따라 4.20일씩 개엽일이 빨라지는 것으로 나타났다<그림 4-4>. 낙엽일의 변화도 모든 기온의 상승에 따라 낙엽일이 늦어지는 것으로 나타났다. 10월의 평균온도가 가장 높은 설명력을 가지며 10월의 평균온도가 1°C 상승에 따라 2.78일씩 낙엽일이 늦어지는 것으로 나타났다<그림 4-5>. 마지막으로 식물성장기간도 낙엽일과 마찬가지로 10월의 평균온도가 가장 높은 설명력을 가졌으며 1°C 상승에 따라 5.66일씩 식물성장기간이 늦어지는 것으로 나타났다<그림 4-6>.

기온이 식물계절에 미치는 영향을 보기 위해 월별, 계절별 기온에 따라 식물계절 자료를 종속변수로 선형회귀분석했다. 분석 결과 기온 상승은 개엽일과 음의 상관관계를 가지고, 낙엽일과는 양의 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 개엽일은 3~4월, 낙엽일은 10월 혹은 가을의 식물계절이 가장 높은 설명력을 가졌지만, 기온은 시간에 따른 연속

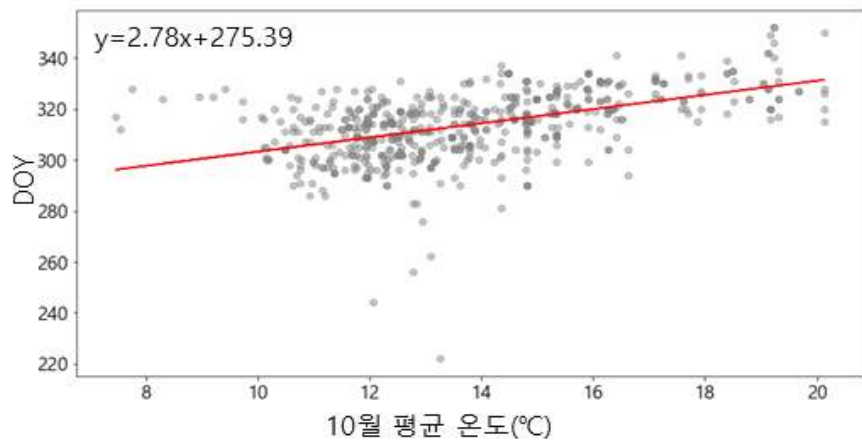
성을 가지고 있기 때문에 식물 계절이 발생하기 이전의 월, 이전의 계절 뿐 아니라 모든 월별, 계절별 평균온도와의 유의미한 상관성을 보였다.

식물 계절 현상은 발생하는 시점의 이전까지만 영향을 받기 때문에 월별, 혹은 계절별 평균온도와의 상관분석은 관계를 과대 혹은 과소추정할 수 있는 문제를 가지고 있다. 따라서 다음 장에서 식물계절 현상이 관측된 전날까지의 온도를 적산하는 GDD(Growing Degree Days)와 CDD(Cooling Degree Days)를 통해 좀 더 정확히 온도와 식물계절의 관계를 살펴보았다.

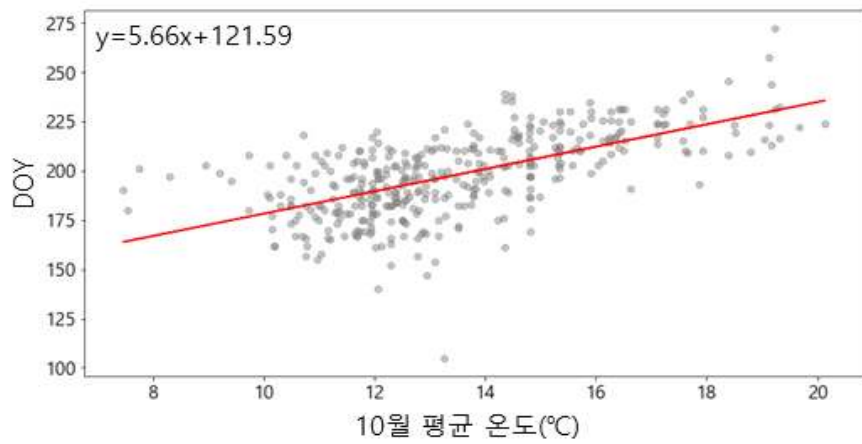




<그림 4-7> 봄철 평균온도와 개엽일의 상관관계



<그림 4-8> 10월의 평균온도와 낙엽일의 상관관계



<그림 4-9> 10월의 평균온도와 식물성장기간의 상관관계

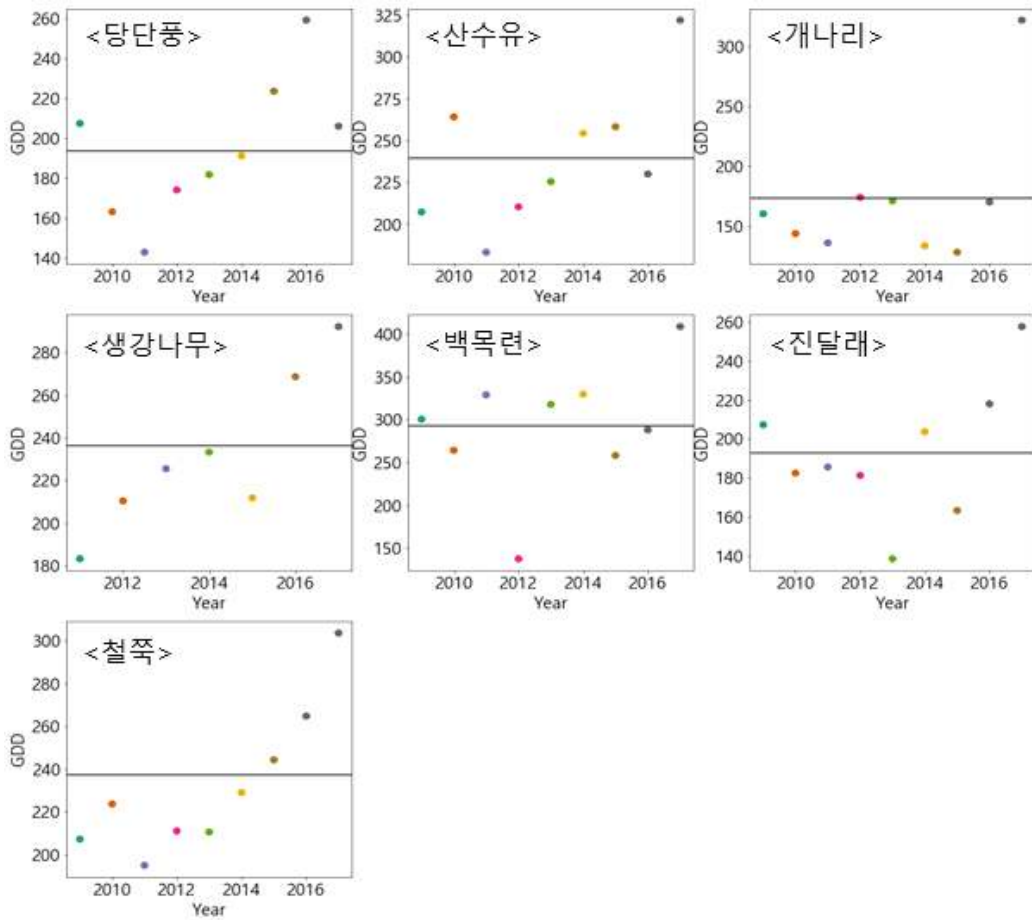
#### 4. 기온을 이용한 한국의 식물계절 예측

기온과 식물계절사이의 상관관계를 통해 기온의 증가가 식물계절에 영향을 줄 수 있는 것을 앞의 장에서 확인할 수 있었다. 하지만 식물계절 현상은 발생하기 이전의 시점까지의 기온에만 영향을 받기 때문에 관측이 평균을 이용한 식물계절 예측은 부적합하다. 이번 장에서는 이런 단점을 극복하고 식물계절 예측을 할 수 있도록 기온 적산 모델을 적용하여 식물이 필요로 하는 열을 계산하고 식물계절 현상을 예측한다.

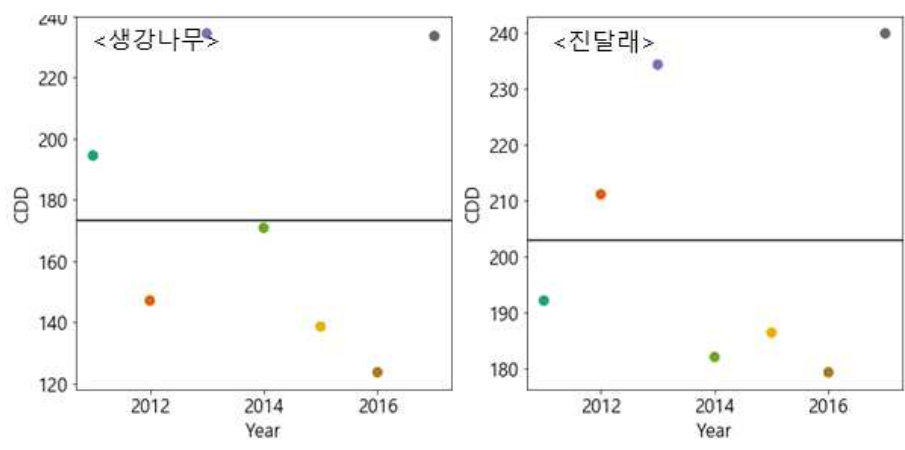
포천에 위치한 국립수목원은 수목원별 장기모니터링을 관리하는 중추 역할을 하는 수목원으로 관측에 관한 지침을 수정하고 제시하는 역할을 했으며 장기모니터링이 시작된 2009년부터 관측을 시작했다. 이런 점에서 국립수목원의 자료를 대상으로 1월 1일부터 개엽일까지 일 평균 기온이 5°C보다 높을 때 기온을 적산하는 GDD와 180일번째 날부터 낙엽일까지 일평균기온이 20°C보다 낮아지는 정도를 CDD를 이용하여 식물이 개엽과 낙엽을 위해 필요로 하는 열 요구량을 계산하고, 그 값을 기준으로 국립수목원에서 각 식물 종의 개엽일과 낙엽일을 예측하고 비교해보았다.

먼저 선정된 7종의 식물 종의 열 요구량을 계산한 결과 잎이 가장 먼저 나오는 개나리의 GDD가 173.26으로 가장 적은 열을 필요로 했고 가장 잎이 늦게 나오는 백목련의 평균 GDD가 292.58로 가장 많은 열을 필요로 했다<그림 4-10>. 가을 식물계절은 20°C 이하의 기온을 적산하는 CDD는 생강나무(LiOb)가 117.49, 진달래(RhMu)가 129.98로 나타나 진달래가 생강나무보다 더 낮은 온도를 필요로 했다.

종별로 얻은 평균 GDD와 CDD를 기반으로 해마다 평균 GDD와 CDD에 만족하는 날을 계산하여 각각 개엽일과 낙엽일의 예측값으로 산정하



<그림 4-10> 국립수목원의 개엽일 자료를 이용한 GDD와 평균선

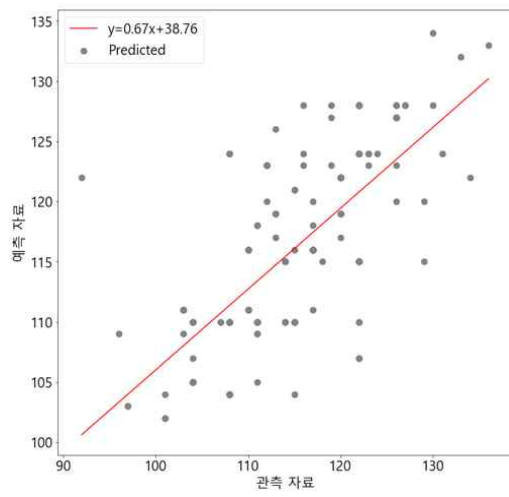


<그림 4-11> 국립수목원의 낙엽일 자료를 이용한 CDD와 평균선

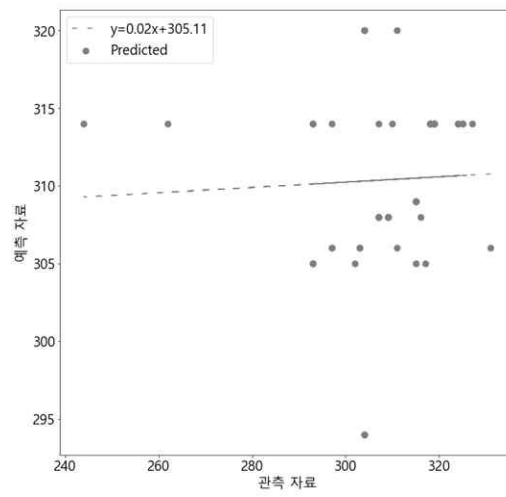
여 아래 <4-11>에 나타냈다. 개엽일의 경우 관측자료와 예측자료의 상관관계 70.63%로 잘 설명해주는 것으로 나타났다. 이는 개엽의 조건으로 기온의 누적이 중요한 요소임을 말해준다. 다시 말해 앞으로 기후변화로 인해 겨울철의 평균 기온이 오른다면 쉽게 GDD를 충족시킬 수 있어서 GDD가 작은 식물일수록 쉽게 개엽일이 발생할 수 있다. 더 나아가 GDD가 작은 식물들이 이른 개엽을 하고 식물들의 생장이 시작되면 증발산으로 계절적 온도를 저감시켜 GDD가 큰 식물들 영향을 미치지 않을 수 있다(Jeong et al. 2009). 앞 장에서 확인한 선행된 계절과 식물계절의 상관관계에서도 개엽일이 가장 빠른 개나리가 선행된 계절에 가장 민감하게 반응했고 개엽일이 늦은 백목련과 당단풍과 같은 목본 식물의 민감도가 낮은 것으로도 나타났는데 이른 개엽으로 인한 온도 저감 효과가 작용한 것으로 보인다.

하지만 낙엽의 경우 예측값과 관측자료 간 상관관계가 나타나지 않았다. 그 이유는 평균보다 조기낙엽현상이 소리봉에서 관측된 2014년과 2016년의 진달래에서 조기낙엽이 발생했기 때문으로 보인다. 잎의 퇴화 과정은 온도와 일주기에 가장 큰 영향을 받아 작용하지만, 수분 조건에 영향을 줄 수 있는 가뭄과 집중호우, 혹은 폭염으로 인한 잎의 갈변으로 인한 조기낙엽이 발생할 수 있음이 보고되었다(Gill et al. 2015, Xie et al. 2018). 기상청에서 공개한 폭염일 수에 따르면 2016년에 서울-경기 지역에서 발생한 16.8일의 폭염이 발생했다. 팔공산에 있는 생강나무는 8월 9일에 낙엽이 발생한 것으로 보고되어 폭염의 영향으로 잎이 고사하며 평균보다 한 달 이상 빠른 조기낙엽이 발생한 것으로 보인다. 하지만 조기낙엽을 제외하면 CDD도 0.38의 설명력을 가지고 있어 CDD와 더불어 폭염, 가뭄, 집중호우 등 극한 기상을 함께 고려한 연구가 필요할 것으로 보인다.

(a) 개엽일



(b) 낙엽일



<그림4-12> 개엽일과 낙엽일의 예측과 비교

## V. 결론

온대 지역에서 식물 계절은 환경에 굉장히 민감하게 반응하기 때문에 인류세 이후 발생하고 있는 기후변화는 식물 계절에 큰 영향을 줄 수 있다. 이에 본 연구는 기존에 연구되지 않은 한국 온대 산림지역의 식물 계절을 특성을 파악하고 발생한 변화를 증명하기 위해 2009년부터 2017년까지, 국립수목원의 9년간 장기 식물 계절 관측기반자료를 표준화된 양식으로 통합하고 이를 기반으로 연구를 시행했다. 그리고 식물 계절 자료의 변화를 설명하기 위해 온대 산림에서 식물 계절에 가장 큰 영향을 미치는 기온을 환경변수로 분석을 시행했다.

분석에 앞서 각 수목원에서 관측된 수목원의 데이터를 통합하고 식물 계절의 변화를 보기 위해 모든 지역에서 6년 이상 관측된 낙엽수를 선정했다. 진달래, 생강나무, 철쭉, 당단풍나무, 산수유나무, 개나리, 백목련 7종을 선정했고 한반도 내에서 지리적인 특성과 종별 특성을 보기 위해 지도에 시각화했다. 7종의 식물계절 자료를 보면 개나리가 가장 개엽일이 빠른 것으로 나타났고 백목련이 가장 늦었고 낙엽일은 생강나무의 낙엽이 진달래보다 빠른 것으로 나타났다. 위도와 고도가 높아짐에 따라 개엽이 빨라지고 낙엽이 늦어지는 것을 확인할 수 있었다.

한국의 온대 산림에서 발생하고 있는 식물 계절의 변화를 보기 위하여 지역으로 구분된 수종의 관측자료를 연도를 독립변수로 선형회귀분석을 시행하고 회귀계수의 평균을 통해 개엽일, 낙엽일, 식물 성장 기간의 변화를 보았다. 개엽일은 1년에 1.37일씩 빨라지고 있는 것으로 나타났으며 낙엽일은 0.35일씩 늦어지고 있는 것으로 나타났다. 두 자료의 차이를 통해 계산한 식물 성장 기간은 1.77일씩 늘어나고 있는 것으로 나타났다. 기존의 연구들에서는 개엽의 빨라지는 것보다 낙엽이 늦어지는 현

상 때문으로 나타났지만 이와는 반대의 결과를 보여줬다. 하지만 낙엽은 평균보다 한 달 이상 빨리 낙엽이 발생하는 극단적인 변화로 식물 성장 기간에 대해 개엽보다 낙엽이 더 큰 상관관계를 가졌다. 또 여기서 나타난 개엽일은 위성에서 산림지역을 대상으로 계산한 식물성장 시작일의 변화와 유사하게 나타났다. 수목원 별 개엽자료와 위성기반 자료를 비교해본 결과, 개엽이 가장 빠른 관목과 높은 상관성을 보여줘 위성이 판단하는 식물생장의 시작일은 관목류의 성장 시작과 관련이 있을 것으로 보인다.

9년간 변화하고 있는 식물계절의 변화가 발생한 원인을 찾기 위해 온대 기후에서 식물에 가장 큰 영향을 주는 선행된 계절의 평균 기온을 독립변수로 선형회귀분석했다. 개엽일은 봄철 평균기온에 가장 큰 영향을 받으며 1℃ 기온이 높아질 때 4.20일씩 식물 계절이 빨라지고 있는 것으로 나타났다. 낙엽일의 경우 10월의 평균기온과 가장 높은 상관관계를 가져 1℃ 기온이 높아질 때 마다 2.78일씩 늦어지며 식물성장기간은 5.66일씩 늘어나고 있었다.

분명 평균기온의 상승은 식물계절과 상관관계를 가지지만 평균기온의 범위는 종별 특수성이 고려되지 않아 식물계절 관측된 이후를 포함하거나 영향력이 큰 식물계절 현상이 발생하기 직전의 기온이 고려되지 않을 수 있다. 따라서 기온을 적산하는 GDD(Growing Degree Days)와 CDD(Cooling Degree Days)를 통해 식물이 필요로 하는 열 요구량을 얻어 포천의 국립수목원에서 개엽일과 낙엽일을 예측했다. 개엽일과 GDD를 이용한 예측값은 70.63%의 상관관계를 가졌다. 이는 누적된 기온이 식물의 개엽에 가장 중요한 점을 시사하며 겨울철의 평균 기온 상승에 GDD가 작은 식물들의 개엽시기가 빨라지며 더 큰 영향을 받을 수 있음을 시사한다. 하지만 낙엽일의 관계는 CDD를 이용한 예측값은 상관

성이 낮게 나왔다. 이런 결과는 2014년과 2016년에 발생한 폭염이 주요한 원인으로 작용한 것으로 보였다. 따라서 추후의 연구에서는 낙엽현상을 이해하기 위해서 폭염, 수분부족과 같은 극한기상에 의한 스트레스 요인을 CDD와 함께 고려해야 할 필요가 있다.

본 연구는 최초로 장기 관측된 산림의 식물 계절 관측자료를 이용하여 한국의 산림이라는 지역적 특수성 안에서 식물 계절의 어떤 변화가 발생하고 있는지 증명했으며 위성자료와 산림 식물 계절 사이에 연관성에 관목의 개엽이라는 연결고리를 제시했다. 또 식물 계절 변화에 가장 주요한 변수인 기온과 식물계절의 상관관계를 보여줌으로써 앞으로 생태계를 이해하기 위한 기초자료로 식물계절의 변화를 예측하고 계절적 온도 변화와 미기후의 이해에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구의 한계는 환경변수를 기온으로 일 평균 기온만 고려되어 졌다. 분명 온대 산림에서 기온은 모든 식물이 필요로 하는 환경조건으로 본 연구에서도 누적기온으로 개엽을 예측했으며, 낙엽과도 높은 상관성을 보여주었다. 하지만 낙엽의 경우 폭염과 같은 극한기상현상의 영향을 받아 조기낙엽이 발생할 수 있으며, 가뭄으로 인해 수분 조건이 영향을 받아 식물계절에 영향을 줄 수 있다. 또 일부 식물은 잎의 생장과 퇴화의 과정에 광주기(photoperiod)가 더 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 추후의 연구에서는 기온과 더불어 극한기상과 광주기 등 다양한 환경변수를 포함한 다양한 환경변수를 고려한 연구가 필요하다.



## ■ 참고 문헌

- Bradley, B. A., & Mustard, J. F. (2008). Comparison of phenology trends by land cover class: a case study in the Great Basin, USA. *Global Change Biology*, 14(2), 334–346.
- Camille Parmesan. (2007). Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, 13, 1860-1872.
- Chang-Hoi Ho, E.-J. Lee, I. L. and S.-J. Jeong. (2017). Earlier Spring in Seoul, Korea, *Health Reports*, 28(6), 3-11.
- Chen, H., Zhu, Q., Wu, N., Wang, Y., & Peng, C. H. (2011). Delayed spring phenology on the Tibetan Plateau may also be attributable to other factors than winter and spring warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(19), E93–E93.
- Chuine, I., Cambon, G., & Comtois, P. (2000). Scaling phenology from the local to the regional level: Advances from species-specific phenological models. *Global Change Biology*, 6(8), 943-952.
- Chuine I, Pascal Yiou, Nicolas Viovy, Bernard Seguin, V. D. & E. L. R. L. (2004). Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 42(2).
- Chung, U., Jung, J. E., Seo, H. C., & Yun, J. I. (2009). Using urban effect corrected temperature data and a tree phenology model to project geographical shift of cherry flowering date in South Korea. *Climatic Change*, 93(3-4), 447-463.
- Chmielewski, F. M., Møller, A., & Bruns, E. (2004). Climate

- changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 69-78.
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., & Schwartz, M. D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(7), 357-365.
- Do Kim, Byung, et al. "A Study on the Plants for Phenology of the Mt. Palgongsan Provincial Park." *Journal of Korean Nature* 5.4 (2012): 287-292.
- Doi, Hideyuki, and Izumi Katano. "Phenological timings of leaf budburst with climate change in Japan." *Agricultural and forest meteorology* 148.3 (2008): 512-516.
- Ellwood, E. R., Temple, S. A., Primack, R. B., Bradley, N. L., & Davis, C. C. (2013). Record-Breaking Early Flowering in the Eastern United States. *PLoS ONE*, 8(1), 1-9.
- Fisher, J. I., Mustard, J. F., & Vadeboncoeur, M. A. (2006). Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 100(2), 265-279.
- Gill, Allison L., et al. "Changes in autumn senescence in northern hemisphere deciduous trees: a meta-analysis of autumn phenology studies." *Annals of Botany* 116.6 (2015): 875-888.
- Jeong, S. J., HO, C. H., GIM, H. J., & Brown, M. E. (2011). Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Global change biology*, 17(7), 2385-2399.

- Jeong, S. J., Medvigy, D., Shevliakova, E., & Malyshev, S. (2013). Predicting changes in temperate forest budburst using continental-scale observations and models. *Geophysical Research Letters*, 40(2), 359-364.
- Jeong, S. J., Medvigy, D. (2014). Macroscale prediction of autumn leaf coloration throughout the continental United States. *Global Ecology and Biogeography*, 23(11), 1245-1254.
- Jeong, S. J., Park, H., Ho, C. H., & Kim, J. (2018). Impact of urbanization on spring and autumn phenology of deciduous trees in the Seoul Capital Area, South Korea. *International Journal of Biometeorology*.
- Keenan, T. F., & Richardson, A. D. (2015). The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: Implications for predictive models. *Global Change Biology*, 21(7), 2634-2641
- Liu, Q., Fu, Y. H., Zeng, Z., Huang, M., Li, X., & Piao, S. (2016). Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 22(2), 644-655.
- Luterbacher, Jörg, et al. "Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts." *Geophysical Research Letters* 34.12 (2007).
- Menzel, Annette, Tim H. Sparks, Nicole Estrella, Elisabeth Koch, Anto Aasa, Rein Ahas, Kerstin Alm-Kobler et al. "European phenological response to climate change matches the warming pattern." *Global change biology* 12, no. 10 (2006): 1969-1976.

- Olsson, Cecilia, and Anna Maria Jönsson. "Process-based models not always better than empirical models for simulating budburst of Norway spruce and birch in Europe." *Global change biology* 20.11 (2014): 3492–3507.
- Piao, S., Tan, J., Chen, A., Fu, Y.H., Ciais, P., Liu, Q., Janssens, I.A., Vicca, S., Zeng, Z., Jeong, S.J. and Li, Y., 2015. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature communications*, 6, p.6911.
- Primack, R. B., Ibáñez, I., Higuchi, H., Lee, S. D., Miller–Rushing, A. J., Wilson, A. M., & Silander Jr, J. A. (2009). Spatial and interspecific variability in phenological responses to warming temperatures. *Biological Conservation*, 142(11), 2569–2577.
- Richardson, A.D., Bailey, A.S., Denny, E.G., Martin, C.W. and O'KEEFE, J.O.H.N., 2006. Phenology of a northern hardwood forest canopy. *Global Change Biology*, 12(7), pp.1174–1188.
- Seo, B.S., Pak, H.S., Lee, K.J., Choi, D.H. and Lee, B.W., 2016. Modelling the Effects of Temperature and Photoperiod on Phenology and Leaf Appearance in *Chrysanthemum*. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*.
- Vitasse, Y., Francois, C., Delpierre, N., Dufrêne, E., Kremer, A., Chuine, I., & Delzon, S. (2011). Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7), 969–980.
- Xie, Y., Wang, X., Wilson, A. M., & Silander Jr, J. A. (2018). Predicting autumn phenology: how deciduous tree species respond to weather stressors. *Agricultural and forest*

meteorology, 250, 127–137.

Zhao, M., Peng, C., Xiang, W., Deng, X., Tian, D., Zhou, X., ... Zhao, Z. (2013). Plant phenological modeling and its application in global climate change research: overview and future challenges. *Environmental Reviews*, 21(1), 1–14.

Zhang, J., Yi, Q., Xing, F., Tang, C., Wang, L., Ye, W., ... Liu, D. (2018). Rapid Shifts of Peak Flowering Phenology in 12 Species under the Effects of Extreme Climate Events in Macao. *Scientific Reports*, 8(1), 1–9.

성정원, 신현탁. "경상남도 식물종의 생물계절성 연구." *기후연구* 6.3 (2011): 231–241.

최철현, 정성관. (2014). HANTS 알고리즘을 이용한 MODIS 영상기반의 식물계절 분석 17(3), 20–38.

최철현, 정성관, 박경훈. 위성영상을 기반으로 도출된 식물계절과 기온요인과의 상관관계 분석. *한국지리정보학회지*. 2016;19(1):30–42.

신현탁, 성정원, 이명훈. "영남지역 식물종의 생물계절성 연구." *기후연구* 8.1 (2013): 55–66.

Schwartz, M.D. ed., 2003. *Phenology: an integrative environmental science*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

산림청 · 국립수목원. (2009). *기후변화취약산림식물종보전 · 적응사업조사매뉴얼*.

■ 부 록

<부록 표 1> 관측지역과 기상관측망의 위치

구분	국립수목원	관측지역	경도	위도	기상관측	관측망	경도	위도
1	강원도화목원	광덕산	127.443285	38.105494	광덕산	AWS	127.43197	38.11619
2		백운산및봉의산	128.859481	37.202044	사북	AWS	128.82141	37.21963
3		설악산권금성	128.539519	38.161957	설악동	AWS	128.51818	38.16705
4		설악산대청봉과중청봉	128.478224	38.077287	설악산	AWS	128.4606	38.1211
5		인공보존원	127.725134	37.92265	춘천	ASOS	127.7357	37.90262
6		강원전시원	127.725134	37.92265	춘천	ASOS	127.7357	37.90262
7		화악산	127.515872	37.920407	가평북면	AWS	127.55219	37.89807
8	경남수목원	금원산	127.835803	35.752865	북상	AWS	127.8183	35.7743
9		인공보존원	128.295766	35.157205	개천	AWS	128.3069	35.11361
10		경남전시원	128.295766	35.157205	개천	AWS	128.3069	35.11361
11		지리산세석	127.747397	35.274399	지리산	AWS	127.7564	35.3192
12		지리산칠선	127.699968	35.386941	뱀사굴	AWS	127.5783	35.37161
13	국립수목원	소리봉	127.133851	37.726651	광릉	AWS	127.16977	37.76172
14		인공보존원	127.165645	37.756236	광릉	AWS	127.16977	37.76172
15		국립전시원	127.165645	37.756236	광릉	AWS	127.16977	37.76172
16	대구수목원	대구가야산	128.108973	35.747529	가야산	AWS	128.08673	35.78915
17		인공보존원	128.520023	35.800706	서구	AWS	128.53095	35.86509
18		대구전시원	128.520023	35.800706	서구	AWS	128.53095	35.86509
19		주왕산	129.142064	36.393889	주왕산	AWS	129.14128	36.39314
20		팔공산	128.659124	36.04418	팔공산	AWS	128.62129	36.01827

21	대아수목원	내장산	126.937137	35.442624	내장산	AWS	126.9073	35.5087
22		변산반도	126.545699	35.686578	변산	AWS	126.4775	35.6209
23		인공보존원	127.300398	35.976236	완주	AWS	127.24573	35.98551
24		대아전시원	127.300398	35.976236	완주	AWS	127.24573	35.98551
25	물향기수목원	수리산	126.92548	37.350121	오산	AWS	127.04873	37.18787
26		용문산	127.57045	37.550226	용문산	AWS	127.61126	37.54553
27		인공보존원	127.054342	37.166236	오산	AWS	127.04873	37.18787
28		물향기전시원	127.054342	37.166236	오산	AWS	127.04873	37.18787
29		축령산	127.313237	37.754764	가평조종	AWS	127.34543	37.82439
30	미동산수목원	소백산국립공원	128.441758	36.990966	부석	AWS	128.66103	36.97916
31		속리산국립공원	127.820152	36.519323	속리산	AWS	127.8167	36.51724
32		인공보존원	127.668855	36.627434	상당	AWS	127.6570972	36.6243583
33		미동산전시원	127.668855	36.627434	상당	AWS	127.6570972	36.6243583
34	완도수목원	두륜산	126.622309	34.515435	북일	AWS	126.676	34.4639
35		상황봉	126.68509	34.325891	완도읍	AWS	126.7174	34.2999
36		월출산	126.717323	34.699409	성전	AWS	126.7048	34.6998
37		인공보존원	126.663567	34.360644	완도읍	AWS	126.7174	34.2999
38		완도전시원	126.663567	34.360644	완도읍	AWS	126.7174	34.2999
39		정도리	126.699482	34.302281	완도읍	AWS	126.7174	34.2999
40	한라수목원	1100도로	126.459017	33.302058	윗세오름	AWS	126.42234	33.29128
41		교래곶자왓	126.665392	33.442316	성판악	AWS	126.59777	33.4302
42		애월곶자왓	126.336103	33.463493	한림	AWS	126.25809	33.39268
43		영도폭포	126.491972	33.258807	서귀포	ASOS	126.4893	33.26132
44		영실	126.498548	33.353536	윗세오름	AWS	126.4964	33.34832
45		인공보존원	126.493301	33.469578	제주	ASOS	126.52202	33.45766
46		한라전시원	126.493301	33.469578	제주	ASOS	126.52202	33.45766

<부록 표 2> 전체 데이터 중 선택된 식물 개엽일 데이터

전시원	관측지	종	연 도								
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
강원도 화목원	전시원	당단풍나무			5/2	4/26	5/1	4/14	4/24	4/17	4/17
		산수유나무	5/6	5/6	5/11	5/2	5/9	5/1	4/30	4/16	4/24
		히어리		4/28	4/25	4/26	5/1	4/14	4/21	4/16	4/24
		개나리		4/24	4/19	4/22	4/26	4/11	4/21	4/10	4/17
		생강나무			5/2	4/26	5/3	4/14	4/28	4/20	4/22
		백목련	4/21	5/6	5/6	4/26	5/1	4/18	4/23	4/24	4/24
		진달래	4/21	5/6	5/6	4/26	5/3	4/14	4/28	4/16	4/21
	산철쭉	4/24	5/12	5/2	4/26	5/1	4/14	4/28		4/17	
	광덕산	당단풍나무	4/16	5/21	5/24	5/15	5/22	5/8	5/13	5/10	5/10
	백운산 및 봉의산	히어리	5/8		5/13	5/8	5/15	4/23	4/29	4/25	5/2
		진달래	5/8		5/13	5/8	5/15	4/17	4/27	4/25	5/2
	설악산 권금성	당단풍나무		5/20	5/13	5/10	5/14	4/30	4/26	4/3	5/2
화악산	생강나무		5/17	5/17	5/6	5/14	4/25	5/2	5/3	5/4	
	진달래		5/17	5/12	5/6	5/14	4/29	4/29	5/11	5/4	
국립 수목원	전시원	당단풍나무	4/21	5/3	5/2	4/29	5/3	4/14	4/27	4/24	4/24
		산수유나무	4/21	5/10	5/2	4/29	5/6	4/21	4/27	4/17	5/2
		히어리	4/27	4/26	5/2	4/29	4/29	4/21	4/20	4/17	4/24
		개나리	4/14	4/26	4/25	4/29	4/22	4/7	4/13	4/10	5/2
		생강나무			5/2	4/29	5/6	4/21	4/20	4/24	5/2
		백목련	5/4	5/10	5/16	4/22	5/13	4/28	4/27	4/24	5/9
		진달래	4/21	5/3	5/11	4/29	5/6	4/21	4/20	4/17	5/2
	산철쭉	4/21	5/6	5/2	4/29	4/29	4/14	4/20	4/17	4/24	
	소리봉	당단풍나무		4/26	4/18	4/22	4/29	4/14	4/20	4/17	4/17
		개나리			4/25	4/22	5/6	4/7	4/6	4/10	5/2
		생강나무			5/2	4/29	5/6	4/17	4/23	4/20	4/28
		진달래			4/18	4/29	4/22	4/14	4/20	4/17	4/24
	인공보존원	산철쭉		5/7	5/7	4/29	5/6	4/21	4/27	4/24	5/9
		진달래			5/2	4/24	4/22	4/14	4/13	4/14	4/24
물향기 수목원	전시원	당단풍나무			5/1	4/26	5/7	4/18	4/27	4/17	4/22
		산수유나무		4/30	5/7	4/26	4/29	4/14	5/4	4/10	4/16
		히어리		4/21	5/3	4/26	5/2	4/17	4/22	4/10	4/20
		개나리		4/23	5/2	4/22	4/27	4/12	4/22	4/3	4/12
		생강나무			5/2	4/24	4/27	4/14	4/19	4/15	4/20
		백목련		5/2	5/3	4/24	5/2	4/20	4/27	4/27	5/2
	진달래		4/23	5/23	4/26	4/29	4/8	4/22	4/6	4/14	
	수리산	당단풍나무		5/15	5/3	4/26	5/6	4/18	4/27	4/25	4/25
		산수유나무			5/10	4/29	5/7	4/18	4/27	4/29	4/10
		개나리		4/26	4/28	4/24	4/25	4/8	4/14	4/8	4/11
생강나무			5/5	5/7	4/26	5/7	4/17	4/28	4/25	4/26	
	백목련			5/5	4/29	5/6	4/25	4/28	4/29	4/24	
	진달래		5/3	4/25	4/21	5/4	4/8	4/18	4/29	4/15	



<부록 표 2> 계속

전시원	관측지	종	연 도								
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
물향기 수목원	용문산	당단풍나무		5/4	5/1	4/27	5/6	4/13	4/22	4/15	5/2
		생강나무		5/1	5/3	4/26	5/7	4/18	4/22	4/21	5/3
		진달래		5/1	5/4	4/24	5/3	4/18	4/27	4/24	5/3
	축령산	당단풍나무		5/13	5/12	5/3	5/11	4/23	5/1	4/25	4/25
		생강나무		5/7	5/10	4/29	5/10	4/21	4/30	4/22	4/28
		진달래		5/5	5/8	4/30	5/7	4/18	5/1	4/25	4/25
		산철쭉		5/19	5/15	5/2	5/12	4/23	5/1	4/30	5/1
미동산 수목원	전시원	당단풍나무		4/26	5/3	5/1	5/7	4/21	4/27	4/17	4/25
		산수유나무		4/26	5/12	5/1	5/21	5/16	4/27	4/17	4/25
		히어리		5/4	5/3	4/23	5/7	4/21	4/22	4/17	4/25
		개나리		4/26	5/3	4/23	4/17	4/21	4/13	4/17	4/18
		백목련		4/26	5/11	5/1	5/21	4/30	4/27	4/24	4/10
		진달래		5/4	5/3	5/1	5/7	4/21	4/27	4/24	4/25
		산철쭉		4/26	5/3	5/1	5/7	4/14	4/22	4/17	4/18
	소백산 국립공원	당단풍나무		5/15	5/25	5/24	6/11	5/15	5/15	5/10	5/18
		진달래				5/15	5/14	5/23	5/7	5/10	5/12
	속리산 국립공원	당단풍나무		5/12	5/4	4/29	5/8	4/22	4/21	4/19	5/4
		산수유나무		5/7	4/29	5/2	5/16	4/22	4/30	4/14	4/21
		생강나무		5/7	4/29	4/19	5/16	4/22	4/23	4/14	4/21
		진달래		5/28	5/18	5/10	5/23	5/13	5/12	5/12	5/4
	인공보존원	산철쭉		5/28	5/8	5/10	5/23	5/2	5/12	4/28	5/4
진달래					4/22	4/19	5/19	4/16	4/14	4/22	
		산철쭉			4/28	5/6	5/19	4/7	4/20	4/20	
대구 수목원	전시원	당단풍나무		5/7	4/27	5/2	5/2	4/18	4/27	4/17	4/18
		산수유나무		5/7	5/3	4/25	4/25	4/18	4/14	4/10	4/18
		히어리		4/23	4/27	4/17	4/17	4/2	4/7	4/10	4/11
		개나리		4/23	4/27	4/17	4/17	4/2	4/7	4/3	4/7
		생강나무			4/27	4/25	4/17	4/18	4/17	4/17	4/9
		백목련		5/7	4/27	4/17	4/25	4/18	4/27	4/17	4/18
		진달래		4/29	4/19	4/17	4/25	4/10	4/7	4/10	4/11
	산철쭉			4/27	4/17	4/25	4/10	4/14	4/13	4/11	
	대구 가야산	당단풍나무			5/16	5/5	5/14	5/2	4/30	4/21	4/26
		생강나무		5/7	5/16	4/28	5/14	4/22	4/30	5/4	4/26
		진달래			4/25	4/22	4/26	4/16	4/17	4/14	4/26
	인공보존원	산철쭉				4/17	4/20	4/17	4/23	4/8	4/20
	주왕산	당단풍나무			5/1	4/25	5/2	4/30	5/7	4/19	4/25
		생강나무		5/4	5/1	4/25	5/2	4/23	4/25	4/15	4/25
		진달래		5/4	4/23	4/25	4/25	4/23	4/22	4/19	5/2
		산철쭉		5/4	5/1	4/25	4/25	4/23	4/29	4/19	4/25
	팔공산	당단풍나무		5/4	4/27	4/25	5/9	4/23	4/28	4/18	5/2
생강나무			5/4	5/6	4/25	5/9	4/23	5/4	4/26	4/27	
진달래			5/4	4/27	5/6	4/17	4/23	4/28	4/13	4/21	

<부록 표 2> 계속

전시원	관측지	종	연 도									
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
경남 수목원	전시원	당단풍나무	4/27	5/6	5/12	4/29	5/2	5/7	4/27	4/21	4/25	
		산수유나무	4/15	5/2	4/25	4/15	4/18	4/17	4/16	4/13	4/18	
		히어리	4/15	4/13	4/17	4/15	4/11	4/3	4/7	4/4	4/12	
		개나리		4/15	4/17	4/15	4/18	4/3	4/2	4/4	4/12	
		생강나무		4/22	4/17		4/15	4/10	4/14	4/10	4/11	
		백목련	4/15	4/27	4/25	4/22	4/29	4/21	4/14	4/10	4/25	
		진달래	4/20	4/27	4/25	4/15	4/18	4/10	4/9	4/4	4/18	
	산철쭉	4/15	4/22	4/25	4/18	4/15	4/17	4/14	4/10	4/18		
	금원산	당단풍나무	5/3	5/12	5/11	5/3	5/8	4/30	5/6	4/26	5/2	
		생강나무	4/29	5/8	5/16	5/3	5/10	4/24	4/29	4/26	4/27	
		진달래	4/30	5/10	5/9	4/29	5/6	4/18	4/27	4/24	4/24	
		산철쭉	4/30	5/17	5/2	4/29	5/6	4/21	4/27	4/24	4/24	
	인공보존원	진달래				4/10	4/4	4/6	4/6	4/2	4/12	
		산철쭉				4/22	4/19	4/17	4/16	4/12	4/18	
	지리산세석	당단풍나무	5/14	5/25	5/24	5/10	5/16	5/15	5/7	5/11	5/18	
		생강나무		5/15	5/18	5/10	5/16	5/9	5/7	5/3	5/4	
		진달래		5/15	5/18	5/10	5/8	5/15	5/7	4/28	5/4	
	지리산철쭉	생강나무			5/18	5/15	5/18	5/15	5/14	5/11	5/11	
	완도 수목원	전시원	산수유나무		4/22	4/26	4/22	4/11	4/9	4/1	4/19	4/19
			히어리		4/22	4/25	5/3	4/11	4/9	4/7	4/19	4/12
			개나리		4/8	4/19	4/15	4/11	4/9	4/1	4/5	4/12
생강나무				4/15	4/19	4/15	4/11	4/11	4/7	4/19	4/12	
백목련				4/22	4/26	4/22	4/26	4/16	4/14	4/19	4/19	
진달래				4/15	4/14	4/8	4/5	4/9	4/1	4/5	4/12	
산철쭉				4/15	4/19	4/19	4/17	4/9	3/24	4/19	4/12	
두륜산		생강나무				4/16	4/16	4/15	4/13	4/10	4/24	
		진달래		4/20	4/27	4/16	4/9	4/8	4/13	4/3	4/24	
		산철쭉		4/20	4/27	4/23	4/24	4/8	4/6	4/8	4/17	
상황봉		당단풍나무		5/10	5/2	4/29	4/30	4/14	4/22	4/18	4/25	
정도리		생강나무				4/17	4/8	4/7	4/11	4/11	4/18	
한라 수목원		1100도로	당단풍나무		5/10	5/19	5/6	5/6	5/7	5/7	5/3	5/2
	생강나무			5/10	5/12	5/6	5/6	5/7	5/7	4/27	5/2	
	전시원	당단풍나무		5/3	5/2	4/29	4/26	4/21	4/27	4/14	4/24	
		산수유나무		4/19	4/25	4/19	4/19	4/15	4/17	4/3	4/17	
		개나리		4/2	4/1	4/8	4/10	3/30	3/30	3/24	4/3	
		생강나무		4/21	5/2	4/19	4/19	4/15	4/15	4/8	4/17	
		백목련		4/22	4/22	4/15	4/16	4/15	4/17	4/14	4/21	
	산철쭉		4/28	5/2	4/22	4/19	3/30	4/2	4/3	4/7		
	교래곶자왓	당단풍나무				5/6	5/6	5/7	5/6	5/3	5/4	
	에월곶자왓	생강나무				4/22	4/24	4/24	4/17	4/14	4/22	
	영실	당단풍나무		5/25	6/2	5/22	5/28	5/27	5/24	5/23	5/29	
산철쭉			5/31	6/2	5/29	5/28	5/27	5/24	5/23	6/5		
인공보존원	산철쭉				4/9	4/11	4/8	4/15	4/28	4/23		

<부록 표 2> 전체 데이터 중 선택된 식물 낙엽일 데이터

전시원	관측지	종	연 도								
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
강원도 화목원	전시원	생강나무			10/24	10/28	11/10	10/30	11/6	11/9	11/8
		진달래	11/18		11/7	11/8	11/14	11/12		11/20	11/16
	백운산 및 봉의산	진달래	11/10	11/16	11/24	11/12	11/13	11/11	11/12	11/23	11/21
		화악산	생강나무		11/1	10/20	10/18	10/30	10/22	11/4	10/25
국립 수목원	전시원	생강나무			10/31	10/28	11/11	11/3	11/13	11/6	11/27
		진달래			10/31	11/11	11/11	11/3	11/23	10/23	11/15
	소리봉	진달래			10/31	11/4		9/1	10/20	9/18	11/6
물향기 수목원	전시원	생강나무		11/15	10/31	10/29	11/10	10/21	11/12	11/22	11/3
		진달래		11/11	11/10	11/25	11/19	11/30	11/27	11/22	11/27
	수리산	생강나무		10/28	10/26	10/30	11/4	11/5	11/1	11/7	11/3
		진달래		11/26	11/16	11/26	11/6	12/3	11/27	11/24	11/23
	용문산	생강나무		11/3	11/1	10/25	11/4	11/2	11/12	11/6	10/16
		진달래		11/17	10/26	11/18	11/14	11/24	11/16	11/20	11/8
	인공보존원	진달래			11/15	11/1	10/17		11/13	11/1	11/13
	축령산	생강나무		11/3	10/27	10/25	11/4	10/29	10/29	11/4	10/31
진달래			11/11	11/1	11/8	11/10	11/14	11/18	11/22	11/13	
미동산 수목원	전시원	진달래	11/1	10/29	10/27	11/2	10/10	10/31	11/2	10/23	10/10
		진달래				10/29	10/24	10/28	10/23	10/26	11/1
	속리산 국립공원	생강나무	11/10	11/2	11/3	11/8	11/14	11/13	10/29	10/31	
		진달래	11/10	11/17	11/16	11/6	10/22	10/30	10/28	11/16	11/7
인공보존원	진달래			11/12	11/1	11/12	11/12	11/10	11/10	11/16	
대야 수목원	전시원	진달래	11/12	11/10	11/3	11/4	10/30	11/19	11/11	11/15	11/15
	내장산	생강나무	11/5	10/27	10/26	10/31	11/7	11/7	11/12	11/9	10/26
		진달래	11/5	11/18	11/2	11/11	11/21	11/13	11/4	11/16	11/16
	변산반도	진달래				11/26	11/26	11/26	11/17	11/14	11/14
인공보존원	진달래				11/4	11/20	11/12	11/11	11/15	11/14	
대구 수목원	전시원	생강나무			11/9	11/13	11/8	11/5	11/2	10/25	11/20
		진달래			11/17	11/13	11/26	11/21	11/23	11/21	11/27
	대구 가야산	생강나무		10/21	11/12	10/31	11/8	11/2	10/23	11/16	11/9
		진달래			11/19	11/11	11/8	11/20	11/11		11/16
	주왕산	생강나무		11/4	10/13	10/24	11/8	10/22	10/25	10/29	10/28
		진달래		11/4	11/9	11/16	11/15	11/19	11/19		11/15
팔공산	생강나무		11/10	11/9	11/3	10/3	10/29	10/29	8/9	11/14	
	진달래		11/10	11/23	11/20	11/14	11/12	11/17	11/20	11/14	
경남 수목원	전시원	생강나무		11/24	11/14	11/18	11/21	11/14	11/16	11/14	11/14
	금원산	생강나무	11/4	11/10	11/3	10/28	11/4	11/2	11/1	11/9	11/7
		진달래	11/8	11/10	11/8	11/11		11/5	11/16	11/20	
	인공보존원	진달래			11/10	10/31	11/20	11/19	11/30	11/23	11/21
	지리산세석	생강나무		10/29	10/27	10/24	10/31	10/23	10/29	11/2	11/9
진달래			10/29	10/27	11/1		11/5	10/29	11/9	11/9	
	생강나무			10/27	10/17		10/23	10/23	10/19	10/26	

<부록 표 2> 계속

전시원	관측지	종	연 도								
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
완도 수목원	전시원	생강나무		11/16	11/9	11/11	11/20	11/12	11/5	11/15	11/22
		진달래		12/7	11/24		11/20	11/26	11/12	11/22	11/29
	두릅산	생강나무				11/16	11/26	11/21	11/16	11/20	11/23
		진달래		12/7	11/25	11/19	11/26	11/25	11/16	11/28	11/27
	1100도로	생강나무		11/18	11/8	11/12	11/21	11/20	11/24	11/22	11/21
한라 수목원	전시원	생강나무		11/16	11/11	11/13	12/6	11/24	11/14	11/18	11/20
	에월곶자왈	생강나무				11/18	11/26	11/20	11/23	11/22	12/1
		진달래				11/30	12/16	12/3	11/25	11/26	11/23

<부록 표 3> 전체 데이터 중 선택된 식물생장길이 데이터

전시원	관측지	종	연 도								
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
강원도 화목원	전시원	생강나무			175	185	191	200	192	204	200
		진달래	211		185	196	195	212		218	209
	백운산 및 봉의산	진달래	186		195	188	182	208	199	212	203
		생강나무		168	157	166	169	180	186	175	174
화악산	진달래		182	166	170	175	176	174	167	166	
	국립 수목원	전시원			182	182	189	196	207	196	209
		진달래			173	196	189	196	217	189	197
소리봉	진달래			196	189		140	183	154	196	
	인공보존원	진달래			186	194	203	214	211	217	205
물향기 수목원	전시원	생강나무			182	188	197	190	207	221	197
		진달래		202	171	213	204	236	219	230	227
	수리산	생강나무		176	172	187	181	202	187	197	191
		진달래		207	205	219	186	239	223	209	222
	용문산	생강나무		186	182	182	181	198	205	199	166
		진달래		200	175	208	195	220	203	210	189
축령산	생강나무		180	171	179	178	191	182	196	186	
	진달래		190	177	192	187	210	201	211	202	
미동산 수목원	전시원	진달래		179	178	186	157	194	189	182	168
	소백산국립공원	진달래				167	163	158	169	169	173
	속리산 국립공원	생강나무		179	188	203	182	205	189	200	
		진달래		173	182	180	152	170	169	188	187
인공보존원	진달래				193	207	177	207	210	208	
대야 수목원	전시원	진달래		210	197	196	187	217	203	210	210
	내장산	생강나무		183	180	189	189	204	203	203	175
		진달래		211	197	200	203	217	195	210	210
	변산반도	진달래				224	216	225	210	203	203
인공보존원	진달래				210	221	217	212	216	207	
대구 수목원	전시원	생강나무			196	202	205	201	199	191	226
		진달래			212	210	215	225	230	225	230
	대구 가야산	생강나무		167	180	186	178	194	177	196	197
		진달래			208	203	196	218	208		204
	주왕산	생강나무		184	165	182	190	182	183	197	187
		진달래		184	200	205	204	210	211		197
팔공산	생강나무		190	187	192	147	189	178	105	201	
	진달래		190	210	198	211	203	203	221	207	
경남 수목원	전시원	생강나무		216	211		220	218	216	218	217
	금원산	생강나무	189	186	171	178	177	193	186	197	193
		진달래	193	184	183	196		201	203	211	
	인공보존원	진달래				204	230	227	238	235	223
	지리산세석	생강나무		167	162	167	168	167	175	183	189
		진달래		167	162	175		174	175	195	189
지리산철선	생강나무			162	155		161	162	161	168	

<부록 표 3> 계속

전시원	관측지	종	연 도								
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
완도	전시원	생강나무		215	204	210	223	215	212	210	224
		진달래		236	224		229	231	225	231	231
수목원	두륜산	생강나무				214	224	221	217	224	214
		진달래		231	212	217	231	231	217	239	217
한라산	1100도로	생강나무		192	180	190	199	197	201	209	203
	전시원	생강나무		209	193	208	231	223	213	224	217
	에월곶자왓	생강나무				210	216	210	220	222	223

<부록 표 4> 관측지별 구분된 종의 식물계절 변화 추세

전시원	관측지	종	식물계절 변화		
			개엽일	낙엽일	생장길이
강원도 화목원	전시원	생강나무	-1.64	2.36	4.00
		진달래	-1.43	0.64	1.88
	백운산 및 봉의산	진달래	-2.01	0.70	2.85
		화악산	생강나무	-2.24	0.20
		진달래	-1.55	-2.67	-1.12
국립 수목원	전시원	생강나무	-0.93	3.61	4.54
		진달래	-0.87	0.68	3.07
	소리봉	진달래	-0.29	-2.61	-2.36
	인공보존원	진달래	-1.83	2.16	3.99
물향기 수목원	전시원	생강나무	-2.20	0.59	4.29
		진달래	-3.92	2.27	6.19
	수리산	생강나무	-1.57	1.39	2.96
		진달래	-1.65	0.61	2.26
	용문산	생강나무	-0.92	-0.57	0.35
		진달래	-0.48	0.81	1.29
축령산	생강나무	-1.98	0.30	2.28	
	진달래	-1.77	1.85	3.62	
미동산 수목원	전시원	진달래	-1.60	-1.64	-0.04
	소백산국립공원	진달래	-1.29	0.40	1.69
	속리산	생강나무	-2.35	-0.57	2.39
		국립공원	진달래	-2.38	-0.97
	인공보존원	진달래	-1.41	1.01	3.34
대야 수목원	전시원	진달래	0.26	1.00	1.38
	내장산	생강나무	-0.18	0.70	1.38
		진달래	-0.33	0.77	0.68
	변산반도	진달래	1.49	-3.06	-4.54
	인공보존원	진달래	1.88	0.91	-0.96
대구 수목원	전시원	생강나무	-2.48	-0.34	2.14
		진달래	-2.55	1.54	3.54
	대구 가야산	생강나무	-1.80	1.51	3.30
		진달래	-0.79	-0.06	0.27
	주왕산	생강나무	-1.77	0.27	2.04
		진달래	-0.51	1.61	1.76
팔공산	생강나무	-1.02	-4.99	-3.96	
	진달래	-2.11	0.05	2.15	
경남 수목원	전시원	생강나무	-1.43	-0.96	0.49
	금원산	생강나무	-1.40	0.18	1.58
		진달래	-1.74	1.34	3.27
	인공보존원	진달래	-0.01	3.14	3.43
	지리산세석	생강나무	-1.98	1.38	3.36
		진달래	-2.11	1.65	3.79
지리산철선	생강나무	-1.18	0.04	1.14	

<부록 표 5> 계속

전시원	관측지	종	식물계절 변화		
			개엽일	낙엽일	생장길이
완도 수목원	전시원	생강나무	-0.51	0.57	1.08
		진달래	-0.96	-1.17	-0.15
	두륜산	생강나무	0.51	0.34	-0.17
		진달래	-1.19	-0.75	0.44
한라 수목원	1100도로	생강나무	-1.49	1.52	3.01
	전시원	생강나무	-1.89	0.67	2.55
	애월곶자왓	생강나무	-1.11	1.54	2.66



<부록 표 5> 개엽일, 낙엽일, 식물생장기간과 월별, 계절별 평균온도와의 선형회귀분석 결과

모든 개엽일 자료와 월별, 계절별 평균온도와의 선형회귀분석																
	월별평균온도												계절별평균온도			
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	겨울	봄	여름	가을
slope	-1.75	-2.21	-3.29	-3.58	-4.06	-2.59	-2.88	-2.35	-3.21	-3.08	-1.89	-1.51	-2.07	-4.20	-2.87	-3.07
intercept	110.78	115.66	132.43	155.94	184.57	169.70	185.42	173.00	178.49	157.35	128.03	114.37	113.31	162.49	182.37	156.54
r_value	-0.56	-0.54	-0.65	-0.67	-0.58	-0.40	-0.48	-0.44	-0.58	-0.62	-0.48	-0.48	-0.57	-0.69	-0.46	-0.60
p_value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
모든 낙엽일 자료와 월별, 계절별 평균온도와의 선형회귀분석																
	월별평균온도												계절별평균온도			
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	겨울	봄	여름	가을
slope	0.13	0.10	0.07	0.05	0.03	0.01	0.04	0.05	0.06	0.09	0.09	0.13	0.12	0.05	0.03	0.08
intercept	-44.56	-29.69	-17.53	-2.72	9.10	17.99	12.83	10.56	0.27	-14.22	-20.37	-41.71	-38.03	-3.86	13.81	-11.39
r_value	0.46	0.45	0.43	0.28	0.22	0.08	0.27	0.29	0.41	0.50	0.39	0.46	0.48	0.35	0.23	0.47
p_value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
식물 성장기간 자료와 월별, 계절별 평균온도와의 선형회귀분석																
	월별평균온도												계절별평균온도			
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	겨울	봄	여름	가을
slope	3.37	4.24	5.51	4.81	5.02	2.26	3.73	3.14	5.01	5.66	3.37	2.99	4.07	6.19	3.41	5.46
intercept	206.97	197.60	170.13	143.86	112.56	150.55	107.29	121.06	100.17	121.59	175.01	199.75	202.26	129.29	118.53	125.35
r_value	0.60	0.55	0.59	0.50	0.38	0.20	0.34	0.33	0.51	0.63	0.47	0.52	0.61	0.55	0.31	0.59
p_value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

<부록 표 6> 수종별 개엽일, 낙엽일, 식물생장기간과 월별, 계절별 평균온도와의 선형회귀분석 결과

식물종	분석결과	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	겨울r	봄	여름	가을
개나리	회귀계수	-1.59	-2.06	-3.28	-3.20	-2.54	1.66	-0.69	-0.15	-2.55	-2.61	-1.63	-1.47	-1.86	-4.13	0.15	-2.67
개나리	절편	102.32	107.34	124.36	143.24	150.23	69.05	122.77	109.10	158.17	143.34	117.97	105.70	104.93	153.87	101.72	143.67
개나리	상관계수	-0.71	-0.66	-0.75	-0.67	-0.33	0.20	-0.09	-0.02	-0.43	-0.62	-0.55	-0.64	-0.70	-0.70	0.02	-0.60
개나리	p_value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.38	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.00
	회귀계수	-1.14	-1.63	-2.44	-2.93		-2.51	-2.51	-2.10	-2.58	-2.62	-1.47	-1.02	-1.56	-3.07	-2.49	-2.53
당단풍나무	절편	118.91	121.70	132.97	152.97		172.86	180.94	171.89	170.62	155.90	131.49	121.36	120.04	154.02	178.00	154.18
당단풍나무	상관계수	-0.34	-0.40	-0.56	-0.68		-0.56	-0.58	-0.52	-0.57	-0.55	-0.38	-0.30	-0.41	-0.65	-0.57	-0.54
당단풍나무	p_value	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
백목련	회귀계수	-1.41	-1.51	-2.66	-3.02	-2.75	1.40	-0.45	-0.01	-1.83	-2.14	-1.13	-1.02	-1.59	-3.78	0.25	-1.95
백목련	절편	113.66	118.04	132.17	152.50	165.17	85.24	127.62	116.39	154.30	147.48	124.99	116.52	116.11	161.34	110.14	144.37
백목련	상관계수	-0.71	-0.55	-0.70	-0.72	-0.38	0.19	-0.07	0.00	-0.35	-0.58	-0.44	-0.50	-0.68	-0.72	0.03	-0.51
백목련	p_value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.52	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00
산수유나무	회귀계수	-1.57	-1.75	-2.88	-3.23	-2.83	1.34	-1.11	-0.58	-2.41	-2.49	-1.24	-1.32	-1.88	-3.91	-0.42	-2.29
산수유나무	절편	111.32	116.26	131.30	152.86	164.58	85.18	142.55	129.31	164.43	150.37	123.95	114.71	113.97	160.59	124.82	147.17
산수유나무	상관계수	-0.63	-0.52	-0.62	-0.64	-0.33	0.14	-0.14	-0.09	-0.39	-0.56	-0.39	-0.51	-0.64	-0.62	-0.05	-0.49
산수유나무	p_value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.18	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00
철쭉	회귀계수	-1.95	-2.68	-3.71	-4.15		-3.90	-3.71	-3.18	-4.07	-3.50	-2.43	-1.83	-2.36	-4.68	-3.89	-3.69
철쭉	절편	110.56	115.72	135.06	162.87		197.57	206.11	193.76	195.56	163.38	131.60	114.22	113.19	168.29	206.55	164.90
철쭉	상관계수	-0.57	-0.61	-0.71	-0.75		-0.58	-0.61	-0.57	-0.69	-0.67	-0.58	-0.54	-0.61	-0.77	-0.61	-0.69

철쭉	p_value	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
생강나무	회귀계수	-1.59	-1.93	-2.86	-3.03		-1.36	-1.91	-1.58	-2.54	-2.54	-1.59	-1.23	-1.82	-3.41	-1.81	-2.48
생강나무	절편	113.13	117.29	131.76	151.18		145.12	162.91	155.35	166.43	151.41	127.76	116.37	115.38	154.88	158.70	150.03
생강나무	상관계수	-0.64	-0.57	-0.67	-0.68		-0.25	-0.38	-0.35	-0.56	-0.65	-0.50	-0.49	-0.63	-0.67	-0.35	-0.61
생강나무	p_value	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
진달래	회귀계수	-2.37	-2.93	-4.37	-3.99	-5.08	-2.29	-3.37	-2.54	-4.00	-4.13	-2.57	-2.16	-2.80	-5.34	-3.19	-4.18
진달래	절편	105.93	112.45	135.21	157.83	199.85	160.79	195.00	174.97	191.04	168.49	129.36	110.73	109.19	172.71	187.30	168.04
진달래	상관계수	-0.66	-0.60	-0.71	-0.62	-0.53	-0.26	-0.42	-0.37	-0.57	-0.69	-0.56	-0.59	-0.66	-0.69	-0.38	-0.67
진달래	p_value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Abstract

A Study on Vegetation  
Phenology of South Korea  
Temperate Forest between  
2009–2017

Kim, Jong–Ho

Department of Environmental Planning

Environmental Management Major

The Graduate School of Environmental Study

Seoul National University

Phenology is widely used as an indicator of climate change because it is sensitive to meteorological factors such as temperature and precipitation. Previous phenology studies have shown that leaf unfolding is accelerating around the world though the magnitude depends on the area. Furthermore, it is reported that not only the leaf unfolding but also the leaf fall is important for in the growing season length(GSL) of vegetation. However,

the study of leaf fall and GSL are scarce compared to that of leaf unfolding. Also in Korea, phenology research is mostly focused on the leaf unfolding only in the urban areas with short-term observations. Due to the lack of long-term observations in forest regions, there is a lack of research in the overall phenology that include all the regions of South Korea.

In this study, phenological data of the forest area collected from 50 observation sites in 10 arboretums were used. 72,187 data was collected from 2009 to 2017 with 12 level phenophases for 256 species. 7 species were selected for leaf unfolding (*Rhododendron mucronulatum*, *Lindera optusiloba*, *Rhododendron yedoense*, *Acer pseudosienboldianum*, *Cornus officinalis*, *Forsythia koreana*, *Magnolia denudata*), and 2 species were selected for leaf fall (*Rhododendron mucronulatum*, *Lindera optusiloba*). These species have been observed for more than 6 years in all Arboretums.

The changes of phenology in temperate forest of South Korea and the relationship between phenology and temperature using regional temperature were analyzed. Leaf unfolding, leaf fall, and GSL were analyzed by regions and species. Early leaf unfolding was observed in 139 samples out of 143 and had an average of 1.37 earlier leaf unfolding by year. In terms of species, the most sensitive species was *Lindera* which had 1.82 earlier days by year. The leaf unfolding of *Magnolia* were the least sensitive among the 7 species which had 1.07 earlier days by year. 52

samples of leaf fall, observed over six years in 34 sites, have 38 delayed cases with a delay of 0.34 days per year. GSL had an 41 samples, observed over 6 years in 32 observations 41 data out of 49 data from 32 observations where both leaf unfolding and leaf fall were observed showed an average increase in plant growth length of 1.77 days. The average length of *Lindera* was 1.99 days, which was longer than that of the *Rhododendron*. As a result of comparing ground-based leaf unfolding observation by arboretum to satellite derived start of growing season(SOS), the fastest leaf unfolding among 7 species showed a high correlation with SOS. It seems that the point of SOS may relate to the time between dormancy and leaf unfolding of early unfolding shrubs.

To understand the reason of changes of the leaf unfolding and leaf falls, temperature data was compared to the regional meteorological data observed by the Korea Meteorological Administration(KMA). Both leaf unfolding and leaf fall showed the highest correlation with the mean temperature of the preceding season. The timing of the leaf unfolding becomes 4.20 days per year with the increased 1°C in average spring temperature. The timing of the leaf falls becomes 2.78 days delayed per increased 1°C in the mean temperature in October. To see the precise correlation between phenology and accumulated temperature, till the observation dates, the Growing Degree-Days(GDD), and the Cooling Degree-Days(CDD) were

calculated by the observations from the Pocheon National Arboretum. The smallest mean GDD was that of Forsythia by 173.08, and the biggest mean GDD was that of Magnolia by 203.06 among 7 selected species. Based on the GDD, the predicted dates of unfolding were calculated and compared with observed data from 2009 to 2017. The high correlation coefficient was calculated by 70.63%, which signify that accumulated temperature affect leaf unfolding. Increase in mean temperature of winter can affect the species unfolding which has small GDD. The mean CDD of Lindera, 174.24, was smaller than that of Rhododendron, 203.52. However, the predictions using CDD showed a low correlation because of early leaves fall in 2014, 2016 when there was a heat wave, and the explanatory power was 38% excluding early leaves fall. This means that extreme weather such as heat wave and drought should be considered with temperature to understand the leaf fall.

Phenological changes from 2009 to 2017 in the temperate forest of South Korea were proven, and the phenological responses was correlated to temperature. Early leaf unfolding species were more sensitive to the temperature of winter, and leaf falls were affected by extreme weather. This study provides the basic understanding of the phenology of forest region, and implications for further studies include not only temperature but also extreme weather to understand autumn senescence with continuous observation.

keywords : phenology, observation data, arboretum, leaf unfolding, leaf fall, growing season length, temperate forest

*Student Number* : 2015-24818