

Research Paper

기후변화에 따른 도시 녹지 꽃가루 알레르기 지수 변화 분석

– 서울어린이대공원을 대상으로 –

황예린* · 김수경* · 최재연** · 박 찬***

서울시립대학교 대학원 조경학과*, 서울시립대학교 도시과학연구원 환경연구센터**,
서울시립대학교 도시과학대학 조경학과***

Assessment of Pollen Allergenicity Index Under Climate Change in the Seoul Children's Grand Park: Present, and Future

Yerin Hwang* · Sukyoung Kim* · Jaeyeon Choi** · Chan Park***

Department of Landscape Architecture, Graduate School, University of Seoul*
Center for Environmental Planning, Institute of Urban Science, University of Seoul**
Department of Landscape Architecture, College of Urban Sciences, University of Seoul***

요약: 도시 녹지는 시민들에게 다양한 긍정적인 효과를 주지만, 생태계디스서비스(Ecosystem Disservice)를 발생시킬 수 있다. 생태계디스서비스는 국제적으로 논의되고 있지만 국내에서는 아직 논의가 미흡하다. 특히, 꽃가루 알레르기는 대표적인 생태계디스서비스로 논의되고 있다. 최근 연구에서는 기후변화에 따라 꽃가루의 부정적인 피해가 증가할 것으로 예측되고 있다. 이런 맥락에서 본 연구는 생태계디스서비스에 대해 논의하는 첫 단계로서 현재 도시 녹지의 꽃가루 알레르기 유발성을 진단하고 기후변화 시나리오상에서 꽃가루 알레르기 유발성의 변화를 확인하고자 한다. 이를 위해, 꽃가루 알레르기 유발성 평가를 위해 개발된 IUGZA (Urban Green Zone Allergenicity Index)를 사용하여 서울어린이대공원을 대상으로 꽃가루 알레르기 유발성을 평가하였다. 현재 서울어린이대공원의 IUGZA는 선행연구에서 제시된 임계값보다 높아 알레르기로 인한 피해가 발생할 수 있는 수준으로 확인되었다. 또한, 기후변화 시나리오에 따라 꽃가루 알레르기 유발성은 점차 높아지는 것으로 확인되었다. 현재와 기후변화가 가장 심한 시나리오를 비교한 결과 현재에는 알레르기 피해 유발 정도가 낮은 수준이 기후변화가 심해지면 높아질 가능성을 확인하였다. 따라서 본연구에서 도출된 결과는 기후변화에 따라 꽃가루로 인한 사회적 피해가 증가할 수 있음을 시사하며 향후 식재 선정 및 관리에 고려가 필요할 만한 수준을 제시하였다는 것에 의의가 있다.

주요어: 꽃가루 알레르기, IUGZA, 기후변화, 도시 녹지, 생태계디스서비스

Abstract: A worldwide effort is underway to utilize urban parks as a means of responding to climate change, providing various benefits to citizens. However, it also has several negative effects, such as

First Author: Yerin Hwang, Tel: +82-2-6490-5520, E-mail: yerin805@uos.ac.kr, ORCID: 0009-0006-7530-2750

Corresponding Author: Chan Park, Tel: +82-2-6490-2849, E-mail: chaneparkmomo7@uos.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4994-6855

Co-Authors: Jaeyeon Choi, Tel:+82-2-6490-5520, E-mail: mmm9026@uos.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5837-6279

Sukyoung Kim, E-mail: soky0711@uos.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4685-1041

Received: 18 March 2024. Revised: 12 June 2024. Accepted: 17 June 2024.

an increase in pollen allergies. These negative impacts have been defined as ecosystem disservices and discussed globally, although the discussion remains insufficient domestically. In particular, pollen allergies have been discussed as a typical ecosystem disservice, with negative impacts such as an increase in symptoms attributed to higher pollen production or the growth of trees with higher antigenicity. The WHO reports that approximately 30% of the world's population suffers from pollen allergies. Many recent studies indicate that the harm induced by pollen allergies is expected to increase due to changes in the climate and thermal environment. In this context, we aim to diagnose the allergenicity of current urban parks and assess changes according to climate change scenarios. To achieve this goal, we assess pollen allergenicity in Seoul Children's Grand Park using the Urban Green Space Allergenicity Index (IUGZA) as the first step towards discussing ecosystem disservices. We found that the IUGZA value in the target area exceeds the threshold suggested in previous research, causing harm due to pollen allergies and is expected to increase according to climate change scenarios. We conclude that this result indicates that social harm from pollen allergies in urban parks may increase due to climate change. Therefore, we emphasize the necessity of discussing ecosystem disservices in the composition of urban parks.

Keywords: Pollen Allergy, IUGZA, Climate Change, Urban Green Space, Ecosystem Disservice

I. 서론

기후변화 적응의 관점에서 도시 녹지 조성은 다양한 생태계서비스를 공급하고 탄소흡수원으로 주목받고 있지만, 생태계서비스(Ecosystem Disservice)를 고려하지 않은 녹지 조성은 사회에 부정적인 영향을 줄 수 있다(Pereira & Baró, 2022). 생태계서비스는 생태계가 인간의 건강에 부정적인 영향을 끼치는 것을 말한다(Blanco et al. 2019). 특히, 식물의 수분 과정에서 도시 식생에서 방출되는 꽃가루는 상당한 사회적 비용을 발생시킬 뿐만 아니라 인간의 건강을 악화시키는 주요 생태계서비스 중 하나이다(Cariñanos et al. 2020; Speak et al. 2018). 세계보건기구(WHO)에 따르면 세계 인구의 30%가 꽃가루 알레르기 반응으로 인해 고통을 받고 있다(Pawankar, 2014). 국내에 경우 소아청소년의 알레르기비염 발병률이 상승하고 있으며 전체 비염환자 중 꽃가루알레르기 감작은 30.3%를 차지하였다(Lee et al. 2023; Suh et al. 2019).

이러한 상황에서 국외에서는 꽃가루 알레르기를 고려한 공간 설계지침을 수립하거나 도심 속 수목의 밀도와 풍부함과 공기 중 꽃가루 사이의 관계를 분석하거나, 과거 수목 선정의 결과가 도시 전체의 꽃가루 생산에 어떤 결과를 미쳤는지 정량화하는 등의 연구가 이

루어졌다(Cariñanos et al. 2011; Katz et al. 2024; Manzano et al. 2017). 하지만 국내에서는 도시 녹지의 생태계서비스에 대한 논의는 미흡한 것으로 보인다. 예를 들어, 탄소흡수 등을 위해 '도시숲'과 같은 도시 녹지 조성 사업을 시행하고 있으나 사업에서 식재되고 있는 수종 가운데 많은 수종이 꽃가루 알레르기 피해를 유발할 수 있는 것으로 확인되었다(NIFOS, 2019). 이는 기후변화 대응을 위한 노력이지만 생태계서비스를 고려하지 못한 사례로 볼 수 있다.

특히, 꽃가루 알레르기로 인한 피해는 기후변화로 인해 더욱 심해질 것으로 예상된다(Cariñanos et al. 2020). 이는 기온 상승과 대기오염에 의한 온실가스가 증가하면서 꽃가루의 날리는 양과 기간이 늘어나고 있기 때문이다(KDCA, 2012; Sousa-Silva et al. 2021; Zhang et al. 2022). 특히, 기후변화로 인해 식물의 개화기간이 길어지며 시민들의 꽃가루 노출 시간을 증가시켜 꽃가루 알레르기 피해가 증가할 것으로 예상된다(Barnes, 2018). 국내에서도 꽃가루를 관찰함에 따라 수목의 개화기간이 길어지는 것으로 확인되었다(Lee et al. 2023). 이에 따라 도시 녹지 조성 시 꽃가루 알레르기로 인해 발생하는 피해에 대한 논의가 필요하다(Sousa-Silva et al. 2021). 그러나, 국내에서 도시 녹지에 대한 논의는 생태적인 이점을 중심으로 이루어지고 있고 꽃가루 알레

르기 유발 가능성 평가와 논의는 미흡하며 미래 기후 변화 발생 시 꽃가루에 대한 예방 및 대비에 대한 필요성이 논의되지 못하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 현시점에서 도시 녹지 수목에서의 꽃가루 알레르기 유발성을 진단하고, 미래 기후변화에 따른 꽃가루 알레르기 유발성을 예측하는 것이다. 이를 위해 꽃가루 알레르기 피해가 있을 것으로 예상되는 도시 녹지의 꽃가루 알레르기 유발성을 측정할 수 있는 지수를 적용하여 현재와 미래 상황을 비교하고자 한다. 미래의 경우 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화 상황에 따라 달라지는 꽃가루 알레르기 상황을 예측하고자 한다. 이에 따른 결과로 기후변화가 가장 심한 시나리오에서 꽃가루 알레르기 유발성 지수가 가장 높게 도출될 것으로 예상된다. 이러한 연구 결과는 도시 녹지의 꽃가루 알레르기 문제에 대한 인식을 높이고 꽃가루 알레르기 유발성 변화를 고려한 도시 녹지 계획과 관리를 위한 수종선정에서의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구방법

본 연구에서는 도시 녹지를 대상으로 꽃가루 알레르기 유발성을 평가하였다. 알레르기 유발성(Allergenicity)이란 항원이 비정상적인 면역반응을 유도하는 능력을 의미하며, 이는 과민반응으로 정상적인 면역반응과 다르다(Zhang & Tao, 2015). 알레르기 유발성은 꽃가루로 인해서도 발생되며 사람들에게 알레르기성 비염, 기관지 천식 등을 유발시킨다(Kim et al. 2012). 이러한 꽃가루 알레르기 유발성의 평가는 꽃가루의 알레르기 질환 발생률을 확인하는 방법과 알레르기를 일으키는

꽃가루의 양을 평가하는 방법이 주로 활용된다(Noh et al. 2012; Oh et al. 2009). 이중 꽃가루의 공간적인 양을 평가하는 방법으로 도시 녹지의 꽃가루 알레르기 유발성에 대해 정량적으로 도출할 수 있는 여러 지수들이 개발되었다. 먼저 AIROT (Pecero-Casimiro et al. 2019)은 라이다 원격 탐사와 크리깅 보간법을 결합하여 넓은 연구 지역에 걸쳐 알레르기 유발성을 계산할 수 있는 방법이다. 하지만, 이 방법은 대상지에 단일 종만을 포함한다는 한계가 있다. 이에 반해 SAI (Hruska, 2003), 와 IUGZA (Cariñanos et al. 2014)는 AIROT에 비해 소규모 도시 녹지에 적용되지만, 해당 지역에 존재하는 모든 알레르기 유발 종을 포함한다는 장점이 있다. SAI에 경우 출판 후 IUGZA에 비해 적게 이용되었으며 식생의 총량을 고려하지 않는다는 한계가 있다(Suanno et al. 2021). 반면 각종의 식물의 고유 특성과 식물 개체의 총량을 모두 고려하는 IUGZA는 출판 후 상당한 성과를 이루었으며 수종의 꽃가루 생산 정보를 반영할 수 있어 많은 연구에서 활용되고 있다(Aerts et al. 2021; Cariñanos et al. 2016; Cariñanos et al. 2017; Cariñanos et al. 2019; Kasprzyk et al. 2019; Prigioniero et al. 2021; Velasco-Jiménez et al. 2020). 따라서 본 연구에서는 대상지의 꽃가루 알레르기 유발성을 도출할 수 있는 지표인 IUGZA를 사용하여 현재와 미래의 꽃가루 알레르기 유발에 대한 상황을 비교하였다. 미래의 상황은 RCP 시나리오를 사용하여 기후변화에 따른 미래 시나리오별 IUGZA의 값을 비교하였다.

1. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 대한민국 서울특별시 광진구에 위치한 서울어린이대공원이다. 서울어린이대공원의

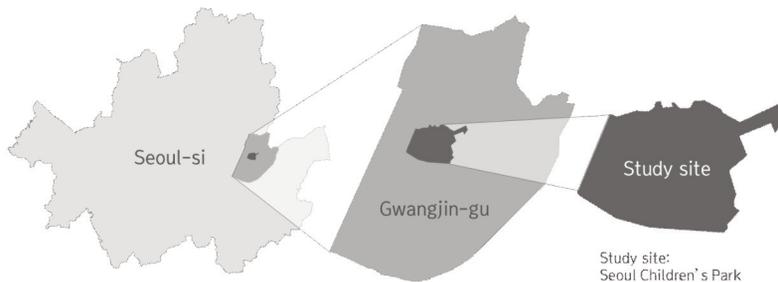


Figure 1. Study site

녹지 면적은 273,708m²로, 총면적 536,008m²의 약 50% 이상이 녹지로 구성된다. 서울어린이대공원 내 식재된 수목 95종 중 63종은 선행연구에서 지정한 꽃가루 알레르기 유발 수종이다(Hong, 2015; Kang et al. 2016; NIBR, 2015; Park et al. 2008). 넓은 면적과 꽃가루 유발 수종이 다량 존재하는 서울어린이대공원에는 현재 어린이 대상의 다양한 프로그램이 운영되고 있다. 따라서 서울어린이대공원은 꽃가루 알레르기 발생에 취약한 이용자가 많이 방문하므로 향후 기후변화로 변화하는 꽃가루 알레르기를 고려한 생태계디스서비스에 대한 논의가 시급한 지역으로 판단하여 연구 대상지로 선정하였다(Figure 1).

2. 현재 대상지의 꽃가루 알레르기 상황 평가

IUGZA는 0~1 사이의 값으로 구성되어 있으며 이전 연구를 고려했을 때 대상지 내에서 알레르기 증상을 유발하기에 충분한 것으로 간주되는 임계값은 0.3으로 설정되었다(Cariñanos et al. 2017). 또한, Cariñanos et al.(2019)에 따르면 이 임계값을 기준으로 하여 IUGZA 값이 0.2 미만이면 잠재적 알레르기성이 낮은 수준, 0.2~0.3 사이이면 중간, 0.3~0.5 사이이면 높음, 그리고 0.5 이상이면 매우 높은 수준이라고 밝혔다. 이러한 IUGZA는 다음과 같은 수식으로 계산된다(1).

$$I_{ugza} = \frac{1}{H_{max} VPA_{max} S_T} \sum_{i=1}^k n_i \times VPA_i \times S_i \times H_i \quad (1)$$

- i*: Allergenic tree in the study area
- H_{max}*: Maximum height that the tree can reach at maturity
- VPA_{max}*: Maximum Value of Potential Allergenicity of each species
- S_T*: Surface of the study area
- k*: The number of species in the study area
- n_i*: The number of individuals of each species
- VPA_i*: Value of potential Allergenicity of each species
- S_i*: Tree crown area for each species
- H_i*: Tree crown height for each species

IUGZA의 수식을 활용하여 Table 1과 같은 방식으로 취득한 데이터를 바탕으로 서울어린이대공원의 꽃가루 알레르기 유발성을 평가하였다. IUGZA의 매개변수에서 *VPA_i* (Value of Potential Allergenicity of each species)는 *i* 종의 잠재 알레르기성의 값을 나타낸다. *VPA*는 *AP_i* (Allergenic Potential), *PE_i* (Type of Pollen

Emissions), 그리고 *PPP_i* (Principal Pollination Period)의 곱으로 구성되어 되어 있다(2).

$$VPA_i = AP_i \times PE_i \times PPP_i \quad (2)$$

이 값들은 개별 특징에 따라 점수가 부여된다. *AP*는 알러지성에 따라 0부터 4 사이 값으로 *PE*는 수분 방식에 따라 0~3 사이 값으로 부여된다. *PPP*는 값이 1이면 1~3주 동안 수분하는 종, 2이면, 4~6주 동안 수분, 3이면 6주 이상 수분하는 종이다. 본 연구에서는 선행연구를 참고하여 대상지의 꽃가루 알레르기 수종별 *VPA_i* 값을 구하였다(Aerts et al. 2021; Cariñanos et al. 2014; Cariñanos et al. 2016; Cariñanos et al. 2017; Kang et al. 2016; Rispo et al. 2020; Zong et al. 2020).

IUGZA를 계산하기 위한 매개변수 중에서 수목의 물리적인 부분은 수관의 부피를 계산하여 반영된다. 수관의 부피는 매개변수인 *H_i* (Height of tree crown)와 *S_i* (Surface of tree crown)를 통해 계산되었다. 서울어린이대공원에 위치한 꽃가루 알레르기 유발 종의 *H_i*와 *S_i*를 구하기 위해 공공데이터포털의 서울시 수목 정보 (Seoul Open Data Plaza, <https://data.seoul.go.kr/>)와 서울어린이대공원 측에서 제공받은 데이터 목록을 활용하였다. 이 데이터를 통해 Figure 2와 수식 3과 같은 방식으로 수고와 수관너비를 계산하여 각 수종별 수관의 부피를 계산하였다. IUGZA를 개발한 Cariñanos et al. (2014)에 따르면 IUGZA의 값을 0~1 값으로 단순화시키기 위해 *VPA_i*, *S_i*, *H_i*가 달성할 수 있는 가장 큰 값을 분모에 곱하도록 식을 구성하였다. 본 연구에서는 저자

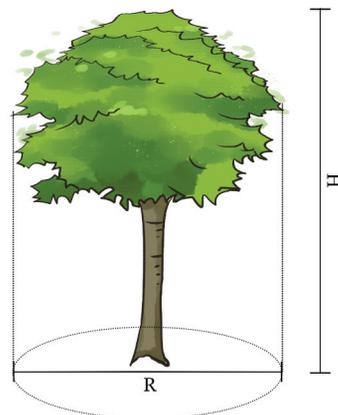


Figure 2. The concept of tree crown volume

Table 1. Parameters of IUGZA

Parameter		Value		Source
VPA_i (Value of Potential Allergenicity of each species)	AP_i (Allergenic Potential)	0	Non-allergenicity	Aerts et al. 2021; Cariñanos et al. 2014; Cariñanos et al. 2016; Cariñanos et al. 2017; Rispo et al. 2020; Zong et al. 2020
		1	Low allergenicity	
		2	Moderate allergenicity	
		3	High allergenicity	
		4	Main local allergens	
	PE_i (Type of Pollen emissions)	0	No pollen emit	
		1	Exclusively entomophilous	
		2	Amphibious	
	PPP_i (Principal Pollination Period)	0	1 - 3 weeks	
		1	4 - 6 weeks	
2		Longer than 6 week		
S_i (Surface of study area)		536,008m ²		Seoul Children's Grand Park
H_{max} (Maximum height that tree can reach at maturity)		14m		Cariñanos et al. 2014
VPA_{max} (Maximum value of VPA)		$AP_i(4) \times PE_i(3) \times PPP_i(3) = 36$		
k (Number of species)		Values for each species		Seoul Children's Grand Park; Seoul Open Data Plaza, https://data.seoul.go.kr/
S_i (Area of tree crowns)				
H_i (Height of tree crowns)				

가 제한한 대로 VPA_{max} 는 AP_i 와 PE_i 와 PPP_i 의 곱의 최댓값인 36을 사용하였고, S_i 의 최댓값인 S_i 의 경우 대상지의 전체면적을 사용하였다. 또한 Cariñanos et al.(2014)에 따르면 H_{max} 의 경우 수고가 도달할 수 있는 최대 높이로 정의되며 이 값을 2m, 6m, 10m, 14m 4가지 값으로 단순화시켜 사용하게 하였다. 본 연구에서 사용된 수목 규격 데이터에서 나무의 최대 높이는 13.75m였다. 따라서, 이 수치에 반올림을 적용 및 선행연구에 따라 H_{max} 의 값을 14m로 사용하였다(Table 1).

$$Tree\ Crwon\ Volume = H_i \times S_i$$

$$H_i = \frac{1}{2} \times H \tag{3}$$

$$S_i = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \times \pi$$

H = Tree Height
 S = Tree Crown Diameter

현재 대상지에서 꽃가루 알레르기 유발성을 증가시키는 수종을 확인하기 위해, IUGZA 값을 구성하는 각 수종별 IUGZA 값을 분석하였다. 또한, 대상지 전체의 IUGZA 값에서 높은 비율을 차지하는 상위 10종의 수

종을 선정하여 대상지에서 유의해야 할 수종을 도출하였다.

3. 미래 대상지의 꽃가루 알레르기 상황 평가

미래 기후변화 상황을 IUZGA에 반영하기 위해 IUGZA의 수분기간에 대한 매개변수(PPP_i)를 이용하였다. 본 연구에서는 각 수목별 주요수분기간(The main pollination period)을 도출하기 위해서 주요수분기간과 개화기간이 같다고 가정하였다. 주요수분기간은 연간 꽃가루 총량의 5%가 축적될 때부터 시작하여 연간 총량의 95%가 축적될 때 끝나는 기간으로 정의됨으로써 개화기간과는 다르다(Cariñanos et al. 2014). 하지만 대상지의 모든 수목의 주요수분기간에 대한 데이터는 부재했기 때문에 개화가 시작되는 순간 수분이 발생할 수 있다는 가능성을 토대로 개화기간과 주요수분기간을 동일하다고 가정하였다. 따라서 본 연구에서는 주요수분기간을 개화 시작 일자부터 종료 일자까지로 정의하였다. 또한, 개화 시작 일자는 기후변화에 따라 유동적이고 개화 종료 일자는 현재와 같다고 가정하였다. 선행연구에 따르면 기후변화가 심해지는 상황

에서는 개화 시작일이 개화 종료일보다 기온 증가의 영향에 더 민감하다(Mo et al. 2017; Zhang et al. 2022). 즉, 개화 시작일이 앞당겨지는 경향은 개화 종료일이 앞당겨지는 경향보다 강하여 총 개화기간은 길어질 것으로 밝혀졌다(Anderegg et al. 2021; Barnes, 2018; Choi et al. 2021; Lee et al. 2023; Oh et al. 2009; Paudel et al. 2021). 따라서 본 연구에서는 개화 시작일에 중점을 두어 수목의 개화기간의 변화를 분석하였다.

IUGZA의 수분기간에 대한 매개변수 값(PPP)을 변화시키기 위한 방법으로 유효적산온도(Growing Degree Days, GDD) 개념을 도입하여 미래 기온 변화에 따른 수종별 개화 시작일을 도출하였다. 유효적산온도는 식물의 내생휴면(Endormancy)이 타파된 이후, 일정 발달단계에 도달하기 위해 필요한 적산온도와 시간을 말하며, 기후변화에 따른 생물계절 변화 예측에 많이 활용되고 있다(Jun et al. 2023; Yun et al. 2012). 이를 기반으로 본 연구에서는 유효적산온도를 내생휴면 종료부터 개화 시작일까지 필요한 특정 열량의 개념으로 보았다. 유효적산온도의 계산 방법은 아래 Equation 4와 같이, 일평균온도에서 생육 최저 한계온도인 기본온도를 뺀 나머지를 누적하는 잉여온도형을 사용하였다(Kim et al. 2013). 이 방법을 사용하기 위해 모든 수종의 생육 최저 한계온도를 5°C로, 내생휴면이 타파되는 날을 1월 1일로 설정하였다(Asse et al. 2018; Kim et al. 2022).

$$GDD = \begin{cases} (T_{Max} + T_{Min}) \frac{1}{2} - T_{Base} & (T_{Avg} > T_{Base}) \\ 0 & (T_{Avg} < T_{Base}) \end{cases} \quad (4)$$

T_{Max} : The maximum temperature per daily

T_{Min} : The minimum temperature per daily

T_{Avg} : The average temperature per daily

T_{Base} : The base temperature

수목의 개화 시작 일자와 수목이 위치한 지점에 해당하는 온도 조건을 고려하여 수종별 유효적산온도를 도출하였다. 수종별 유효적산온도를 계산하기 위해 1월 1일부터 식물이 개화에 도달하는 일자까지 일평균 기온을 적산하였다. 수종별 유효적산온도를 도출하기 위해 각 수목의 개화 시작일은 보통 해당 지역에서 개화하는 달의 1일로 가정하였다. 수종별 수목이 위치한

지점의 경우 서울시를 경계로 한 2013년, 2019년, 2022년에 구축된 산림청의 임상도 사용하였다. 공간의 경계를 대상지보다 넓게 선정한 이유는 대상지를 경계로 한 임상도의 데이터는 실제 대상지 수목 중에서 일부만 반영했기 때문이다. 따라서 서울시 경계에 존재하는 임상코드와 대상지 수종을 매치시킨 후 서울시 경계의 임상도 상에서 존재하는 대상지 수종의 위치를 확인하였다.

수목이 위치한 지점에 따른 온도조건을 보기 위해 서울시 내에 위치한 AWS (Automatic Weather Station instruments)에서 관측된 2013년, 2019년, 2022년의 1월 1일부터 12월 31일까지의 일평균데이터를 이용하였다(Figure 3).

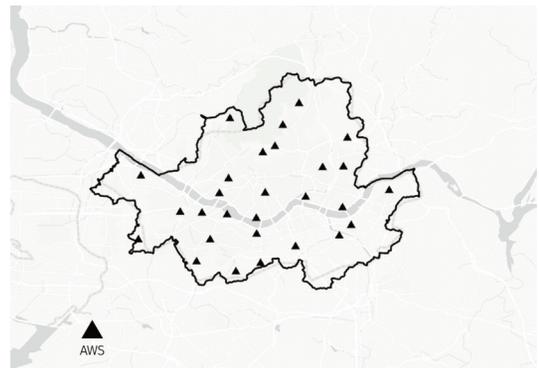


Figure 3. Location of AWS

임상도와 같은 세 개의 연도에 대하여 서울시를 경계로 AWS에서 관측된 기온을 보간(Interpolation)하여 일자별 기온지도를 도출하였다. 이후 이 3개년도의 일자별 기온지도를 평균 뺀으로써 서울시를 경계로 한 일자별 최종 365개의 기온지도를 도출하였다.

1월 1일부터 12월 31일까지의 기온지도와 임상도를 중첩함으로써 수목이 위치한 지점에 따른 일평균기온을 획득하였다. 이렇게 도출된 일자별 기온지도를 내생휴면이 끝나는 일자인 1월 1일부터 개별 수종별 개화 시작 일자까지 기준온도에 따라 적산하여 수종별 유효적산온도를 도출하였다(Appendix 1).

위에서 도출한 유효적산온도와 함께 미래 기후변화 상황에 따른 수종별 개화 시작 일자를 도출하였다. 현재의 경우, 일평균기온과 개화 시작 일자를 이용하여

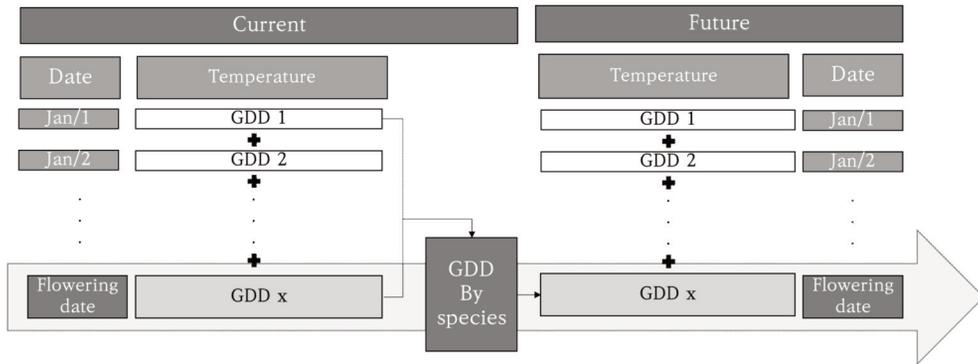


Figure 4. The process of estimating future flowering dates

수종별 유효적산온도를 구했지만, 미래의 경우에는 이러한 접근을 반대로 적용하여 수종별 유효적산온도와 일평균기온을 이용하여 개화 시작 일자를 구하였다 (Figure 4).

미래 기후변화에 따른 개화 시작 일자의 변화를 도출하기 위해 기상청에서 구축한 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오를 활용하였다. RCP 시나리오는 2100년 기준 복사강제력에 따른 온실가스 농도 경로를 의미한다. 이 중 RCP 4.5는 탄소 저감 정책이 이루어지는 중간 시나리오이며, RCP 8.5는 탄소 저감 정책을 사용하지 않고 현재처럼 산업활동을 계속 이어가, 기후변화가 가장 심할 것으로 예상되는 시나리오이다(KMA, 2022). 본 연구에서는 기후변화 발생의 중간 상황과 가장 심한 상황을 비교하기 위해 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 적용하였다. 기후변화가 발생하는 가까운 미래부터 먼 미래까지의 상황을 비교하기 위해 2020년부터 2100년까지의 기간을 20년씩 평균 내어 각 중간연도에 해당하는 년도를 대표하도록 구성하였다. Near term (2030년대), Mid term (2050년대), Mid-Long term (2070년대), Long term (2090년대)이 4개의 시간적 구간과 RCP 4.5와 RCP 8.5를 종합하여 총 8가지 시나리오를 도출하였다.

미래 시나리오별 1월 1일부터 12월 31일까지 각 20년씩 평균 년 일평균기온을 유효적산온도를 구하는 방식으로 적산하여, 8가지 시나리오별 365일의 각 일자에 해당하는 유효적산온도를 도출하였다. 이에 따라 수종별로 도출했던 유효적산온도가 처음으로 달성되는 일자를 시나리오별로 확인함으로써 각 시나리오에

따른 수종별 개화 시작 일자를 도출하였다. 또한, 미래 시나리오에 따른 수종별 개화 시작 일자를 통해 현재 개화 종료 일자와 비교하면서 미래 시나리오별 수분기간을 도출하였다.

수종별 수분기간을 IUGZA의 수분기간에 대한 매개변수인 *PPP*에 반영하기 위해 매개변수 값의 조정 방법을 설정하였다. *PPP*는 수분기간에 따라 1~3점으로 부여되었다. 본 연구에서는 수분기간이 2주 이상 증가할 경우 값을 1점 증가시켰고, 2주 이상 증가한 경우에는 2점을, 이전에 3점을 가지고 있던 수종에 대해서는 수분기간에 대한 매개변수 값의 최대값이 3이므로 그대로 3점으로 유지되었다. 이러한 방식을 통해 도출된 미래 시나리오별 *PPP*를 도출하였다(Appendix 2). 미래 시나리오별로 도출한 *PPP*를 반영하여 미래 시나리오별 IUGZA 값을 도출하였다. 또한, 현재와 기후변화가 가장 심한 시나리오에서 대상지의 꽃가루 알레르기 유발성을 증가시킨 수종을 비교하기 위해 미래 시나리오별 IUGZA 값에 높은 비율을 차지하는 상위 10종을 도출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 현재 서울어린이대공원의 꽃가루 알레르기 유발성

서울어린이대공원의 현재 꽃가루 알레르기에 대한 상황을 예측하기 위해 대상지의 IUGZA를 평가한 결과 0.62가 도출되었다. Cariñanos et al. (2014)에 따라, 0.5 이상의 값은 대상지의 꽃가루가 많이 분포하여 알레르기를 유발할 가능성이 큰 것을 알 수 있다.

Table 2. Top 10 among 63 of most occupying species

Top	Species	Ratio
1	<i>Quercus acutissima</i>	14.84
2	<i>Juniperus chinensis</i>	8.69
3	<i>Pinus rigida</i>	8.25
4	<i>Thuja occidentalis</i>	6.74
5	<i>Platanus occidentalis</i>	6.22
6	<i>Zelkova serrata</i>	4.40
7	<i>Juniperus chinensis var. kaizuka</i>	3.64
8	<i>Alnus japonica</i>	3.59
9	<i>Robinia pseudacacia</i>	3.58
10	<i>Pinus strobus</i>	3.49
Total	-	63.43

IUGZA는 대상 공간의 꽃가루 알레르기 유발 수종의 수관 부피를 반영한 것으로 도출된 0.62의 값은 꽃가루 알레르기 유발 수종의 수관 부피가 대상 공간의 절반 이상 있을 수 있음을 말한다. IUGZA 값이 높게 나오므로써 대상지는 공간적으로 꽃가루의 양이 많아 대상지에 방문한 사람과 접촉하여 알레르기 반응을 일으킬 가능성이 크다.

본 연구에서 도출한 수종이 꽃가루 알레르기를 일으키는지를 확인하기 위해 대상지 총 63개의 중 증 상위 10종을 대상으로 문헌을 검토하였다(Table 2)(Hong, 2015; Kang et al. 2016; NIBR, 2015; Park et al. 2008).

대상지의 꽃가루 알레르기 유발성에 대해 높은 비율을 차지하는 수종들이 선행연구에서 언급되는지 살펴본 결과 느티나무(*Zelkova serrata*)를 제외한 상수리나무(*Quercus acutissima*), 향나무(*Juniperus chinensis*), 리

기다소나무(*Pinus rigida*), 서양측백(*Thuja occidentalis*), 양버즘나무(*Platanus occidentalis*), 가이즈까향나무(*Juniperus chinensis var. kaizuka*), 오리나무(*Alnus japonica*), 아까시나무(*Robinia pseudacacia*), 스트로브잣나무(*Pinus strobus*)가 선행연구에서도 꽃가루 알레르기를 일으킬 수 있다고 지적되었다(Hong, 2015; NIBR, 2015). 위에서 언급된 상위 10종의 IUGZA의 합은 대상지 전체 IUGZA 값의 63.43%를 차지하였다.

대상지의 IUGZA 값에 많은 부분을 차지하는 수종들에 경우 다양한 식물들에 골고루 분포해 있는 것보다는 일부 특정한 식물들에 집중되었다. 특히 이러한 수종들이 꽃가루 알레르기를 유발할 수 있는 점에 따라 수목 관리 및 식재 수종 선정 시 해당 식물들에 대한 고려가 필요하다.

2. 미래 서울어린이대공원의 꽃가루 알레르기 유발성

1) 기후변화 시나리오에 따른 IUGZA 도출

미래 시나리오별로 서울어린이대공원의 IUGZA를 평가한 결과, 값이 가장 높은 순서대로 RCP 8.5 Long term, RCP 8.5 Mid-Long term, RCP 4.5 Long term, RCP 8.5 Mid term, RCP 4.5 Mid-Long term 순으로 나타났다(Figure 5).

RCP 4.5와 RCP 8.5 Near term과 RCP 4.5 Mid term에서는 현재와 동일한 값(0.62)으로 변화가 없었다. RCP 8.5 Mid term에서는 시나리오 중에서 처음으로 IUGZA 값이 0.02만큼 증가하였다. Mid-Long term에서는 RCP 4.5에서 0.01만큼, RCP 8.5에서는 0.17만큼 증가하였다.

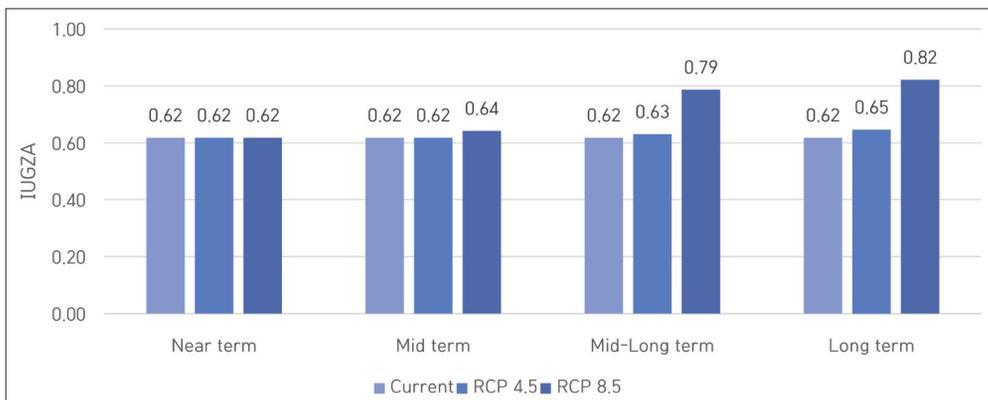


Figure 5. IUGZA values by scenarios

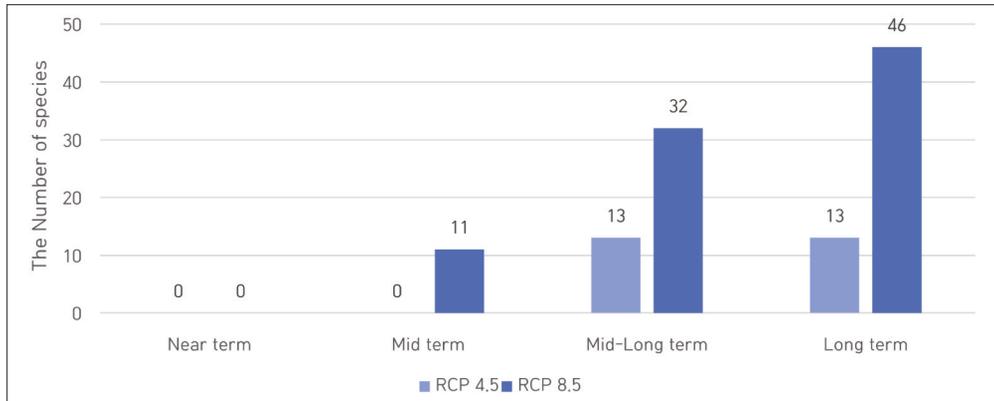


Figure 6. The number of species with increased IUGZA by scenarios

Long term에서는 RCP 4.5에서는 0.03만큼, RCP 8.5에서는 0.2만큼 값이 증가하였다. 따라서 시간이 지남에 따라 대상지의 IUGZA 값이 증가하는 경향은 RCP 4.5 보다는 RCP 8.5에서 더 강하였다. 특히, RCP 8.5에서는 가장 먼 미래인 Long term에서 가장 큰 값이 도출되었다.

미래 시나리오에 따라 현재의 IUGZA 값과 비교하여 값이 증가한 수종의 개수를 살펴본 결과 RCP 4.5 Near term, RCP 4.5 Mid term, RCP 8.5 Near Term에서는 IUGZA 값이 증가한 수종이 없었다. 그러나 RCP 4.5 Mid-Long term과 RCP 4.5 Long Term에서는 13종, RCP 8.5 Mid term에서는 11종, RCP 8.5 Mid-Long Term에서는 32종, RCP 8.5 Long Term에서는 46종의 IUGZA 값이 증가하였다(Figure 6).

현재 대비 수종별 IUGZA 값이 증가한 수종이 없었던 시나리오의 경우에는 개화 시작 일자가 앞당겨진 수종들이 존재하였으나, PPPi 값이 증가할 수 있는 일수인 14일 이상만큼 개화 시작 일이 앞당겨지지 않았기 때문에 수종의 변화가 없었다. 하지만 RCP 8.5의 Mid Term 시나리오부터는 개화 시작 일자가 14일 이상 빨라지는 수종들이 나타났고, 이 경향은 RCP 4.5보다 기후변화가 더 심한 시나리오인 RCP 8.5에서 더 강하게 나타났다. 또한, 기후변화가 가장 심한 시나리오인 RCP 8.5 Long Term에서 가장 많은 수종의 변화가 나타난 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 기후변화가 도시 녹지의 꽃가루 알레르기 유발성에 미치는 영향을 이해하기 위해 수분기간

의 개념을 반영할 수 있는 IUGZA를 활용하여 대상지의 꽃가루 알레르기 유발성을 평가하였다. 이를 위해 IUGZA 값에 영향을 주는 매개변수 중 하나인 PPPi를 기후변화 시나리오에 따라 조정하였다. 대상지에 기후변화 시나리오를 적용하면서 대상지의 기온이 상승하여 개화시기가 변화함에 따라, 수종별로 더 높은 PPPi의 값을 가졌다.

기후변화 시나리오별로 대상지 IUGZA 값을 살펴본 결과 RCP 4.5에서 RCP 8.5로 갈수록 Near term에서 Long term으로 갈수록 IUGZA 값이 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 수종별 IUGZA 값이 변화 수종의 개수를 살펴본 결과 위의 결과와 동일하게 RCP 4.5에서 RCP 8.5로 갈수록 Near term에서 Long term으로 갈수록 IUGZA 값이 수종의 개수가 변화하였다. 즉, 기후변화가 심해지는 상황에 대비하지 않은 채로 시간이 흐른다면 대상지의 꽃가루 알레르기 유발성은 높아질 것으로 예상된다. 따라서, 현재 연구 대상지에서 예상되는 꽃가루 알레르기 피해와 이 추세가 미래에는 더욱 심화될 것으로 예상됨에 따라, 연구 대상지의 꽃가루 관련 생태계디스서비스를 고려하는 것이 점점 더 중요해질 것으로 전망된다.

2) 기후변화 시나리오에 따른 IUGZA를 증가시키는 수종 도출

기후변화 시나리오에 따라 IUGZA 값을 증가시키는 수종의 변화를 파악하기 위해 기후변화 시나리오별 IUGZA 값에서 많은 비율을 차지하는 수종 10개를 도

Table 3. Top 10 among 63 of most occupying species by scenarios

Top	RCP 4.5							
	Near term		Mid term		Mid-Long term		Long term	
	Species	ratio	Species	ratio	Species	ratio	Species	ratio
1	<i>Quercus acutissima</i>	14.89	<i>Quercus acutissima</i>	14.89	<i>Quercus acutissima</i>	14.60	<i>Quercus acutissima</i>	14.24
2	<i>Juniperus chinensis</i>	8.72	<i>Juniperus chinensis</i>	8.72	<i>Juniperus chinensis</i>	8.55	<i>Juniperus chinensis</i>	8.34
3	<i>Pinus rigida</i>	8.28	<i>Pinus rigida</i>	8.28	<i>Pinus rigida</i>	8.12	<i>Pinus rigida</i>	7.91
4	<i>Thuja occidentalis</i>	6.76	<i>Thuja occidentalis</i>	6.76	<i>Thuja occidentalis</i>	6.63	<i>Thuja occidentalis</i>	6.47
5	<i>Platanus occidentalis</i>	6.24	<i>Platanus occidentalis</i>	6.24	<i>Platanus occidentalis</i>	6.12	<i>Platanus occidentalis</i>	5.97
6	<i>Zelkova serrata</i>	4.41	<i>Zelkova serrata</i>	4.41	<i>Robinia pseudacacia</i>	5.28	<i>Robinia pseudacacia</i>	5.15
7	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>kaizuka</i>	3.65	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>kaizuka</i>	3.65	<i>Zelkova serrata</i>	4.33	<i>Castanea crenata</i>	4.95
8	<i>Alnus japonica</i>	3.60	<i>Alnus japonica</i>	3.60	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>kaizuka</i>	3.58	<i>Zelkova serrata</i>	4.22
9	<i>Robinia pseudacacia</i>	3.59	<i>Robinia pseudacacia</i>	3.59	<i>Alnus japonica</i>	3.53	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>kaizuka</i>	3.49
10	<i>Pinus strobus</i>	3.51	<i>Pinus strobus</i>	3.51	<i>Pinus strobus</i>	3.44	<i>Alnus japonica</i>	3.44
Total	-	63.67	-	63.67	-	64.18	-	64.19
Top	RCP 8.5							
	Near term		Mid term		Mid-Long term		Long term	
	Species	ratio	Species	ratio	Species	ratio	Species	ratio
1	<i>Quercus acutissima</i>	14.89	<i>Quercus acutissima</i>	14.34	<i>Quercus acutissima</i>	17.56	<i>Quercus acutissima</i>	16.81
2	<i>Juniperus chinensis</i>	8.72	<i>Juniperus chinensis</i>	8.40	<i>Pinus rigida</i>	9.76	<i>Pinus rigida</i>	9.35
3	<i>Pinus rigida</i>	8.28	<i>Pinus rigida</i>	7.97	<i>Platanus occidentalis</i>	7.36	<i>Platanus occidentalis</i>	7.05
4	<i>Thuja occidentalis</i>	6.76	<i>Thuja occidentalis</i>	6.51	<i>Juniperus chinensis</i>	6.86	<i>Juniperus chinensis</i>	6.57
5	<i>Platanus occidentalis</i>	6.24	<i>Platanus occidentalis</i>	6.01	<i>Thuja occidentalis</i>	5.32	<i>Castanea crenata</i>	5.84
6	<i>Zelkova serrata</i>	4.41	<i>Robinia pseudacacia</i>	5.19	<i>Robinia pseudacacia</i>	4.23	<i>Thuja occidentalis</i>	5.09
7	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>kaizuka</i>	3.65	<i>Zelkova serrata</i>	4.25	<i>Pinus strobus</i>	4.13	<i>Ginkgo biloba</i>	4.26
8	<i>Alnus japonica</i>	3.60	<i>Ginkgo biloba</i>	3.63	<i>Castanea crenata</i>	4.07	<i>Robinia pseudacacia</i>	4.05
9	<i>Robinia pseudacacia</i>	3.59	<i>Juniperus chinensis</i> var. <i>kaizuka</i>	3.52	<i>Pinus koraiensis</i>	3.72	<i>Pinus strobus</i>	3.96
10	<i>Pinus strobus</i>	3.51	<i>Alnus japonica</i>	3.47	<i>Zelkova serrata</i>	3.47	<i>Pinus koraiensis</i>	3.57
Total	-	63.67	-	63.28	-	66.47	-	66.55

출하였다. 현재와 기후변화 시나리오별 IUGZA 값의 상위 10종을 비교한 결과 IUGZA 값에 변동이 없었던 RCP 4.5의 Near term과 Mid term, RCP 8.5의 Near term의 경우 현재와 같은 상위 10종이 도출되었다. RCP 4.5 Mid-Long term에 경우 아까시나무의 순위가 8위에서 6위로 높아졌다. RCP 4.5 Long term에서는 밤나무(*Castanea crenata*)가 새롭게 상위 10종에 추가되었다. RCP 8.5의 Mid term에서는 아까시나무의 순위가 8위에서 6위로 높아졌으며, 은행나무(*Ginkgo biloba*)가 상위 10종에 새롭게 추가되었다. RCP 8.5 Mid-Long term

에서는 밤나무가 상위 10종에 새롭게 추가되었다. 기후변화가 가장 심한 시나리오인 RCP 8.5 Long term에서는 밤나무와 은행나무의 순위가 높아졌다(Table 3).

기후변화 시나리오 따른 IUGZA 값에서 많은 비율을 차지하는 수종들의 변화를 살펴본 결과 아까시나무의 순위가 높아지는 결과가 관찰되었고, 밤나무와 은행나무가 상위 10종에 새롭게 추가되는 결과를 확인하였다. Table 3에서 언급된 수종의 경우 대부분 꽃가루 알레르기를 유발한다고 주로 논의되는 수종들이지만 그렇지 않은 수종들 또한 관찰되었다. 아까시나무의

경우 꽃가루 알레르기를 유발한다고 언급은 되지만 중점적으로 논의되는 수종은 아니다(Aerts et al. 2021; Hong, 2015; Kang et al. 2016; NIBR, 2015; Park et al. 2008; Velasco-Jiménez et al. 2020). 하지만 기후변화가 심해지는 상황에서는 아까시나무의 개화일에 변동이 생기면서 꽃가루 알레르기에 노출되는 시간을 증가시켜 꽃가루 알레르기 유발성이 증가되는 것을 확인하였다. 또한 밤나무와 은행나무의 경우 역시 알레르기 반응을 일으키는데에 있어 많이 논의되는 수종은 아니다. 하지만 기후변화가 심해지는 상황에서는 꽃가루 알레르기에 노출되는 시간을 증가시켜 알레르기 반응을 현재보다 더 많이 일으킬 수 있는 것으로 확인하였다.

본 연구에서는 기후변화가 심해지는 상황에서 현재와 다르게 꽃가루 알레르기 유발상황을 추가적으로 증가시킬 수 있는 수종들을 발견하였다. 이러한 연구 결과는 기후변화가 심해지는 상황에서 꽃가루 알레르기 유발성을 심화시킬 수 있는 새로운 수종들을 도출하였다는 데에 의의가 있다.

3) 기후변화에 따른 꽃가루 노출시간

기후변화에 따라 꽃가루의 농도 등의 수목의 생리학적 변화가 예상되며 특히 꽃가루가 날리는 기간에 대한 변화가 예상되고 있다(Anderegg et al. 2021; Barnes, 2018; Choi et al. 2021; Lee et al. 2023; Mo et al. 2017; Oh et al. 2009; Paudel et al. 2021; Zhang et al. 2022). 꽃가루가 날리는 기간의 경우 꽃가루에 대해 알레르기 반응을 보이는 사람의 비율인 꽃가루의 감작률과 높은 상관관계를 보이고 있다. 개화기간이 길어진다는 것은 꽃가루에 노출되는 시간이 길어진다는 것이고 이는 꽃가루 알레르겐에 대한 감작률을 증가시킨다(Lee et al. 2023). 또한 수목의 꽃가루에 장기적인 노출기간과 감작률 사이의 상관관계를 본 Suh et al. 2019에 따르면 꽃가루에 장기간 노출될수록 꽃가루 알레르기 감작률이 높아진다.

본 연구에서는 RCP 4.5에서 RCP 8.5로 갈수록, 시간이 흐름에 따라 꽃가루가 날리는 기간이 늘어나는 경향을 확인하였다. 즉, 미래에는 기후변화가 더욱 심해 질수록 꽃가루에 노출되는 시간이 더 길어질 것으로 예

상된다. 이는 현재 연구 대상지를 방문하는 사람들뿐만 아니라 대상지 근처에 자주 방문하는 사람들도 장기적으로 꽃가루에 노출되어 꽃가루 감작률이 높아질 것으로 예상된다. 즉, 기후변화가 꽃가루 알레르기 증상에 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서, 연구 대상지의 지속 가능한 운영 및 꽃가루 알레르기로 인한 생태계 서비스 손실을 줄이기 위해 꽃가루 알레르기를 유발하는 수종에 대한 적절한 식재 및 관리가 필요할 것으로 전망된다.

IV. 결론

본 연구는 기후변화에 대한 대응의 수단으로서 조성되는 도시 녹지의 생태계 서비스 중 꽃가루 알레르기 피해에 대한 논의가 부족한 상황에서 서울어린이대공원의 현재와 미래 기후변화에 따른 꽃가루 알레르기 유발성을 예측하였다. 꽃가루 알레르기 유발성을 예측하기 위해 IUGZA 지수를 활용하여 대상지를 평가한 결과 현재 서울어린이대공원의 IUGZA 값은 0.62로, 피해 임계치인 0.5를 초과하여 심각한 수준임을 나타냈다. 따라서 현재 서울어린이대공원은 알레르기 피해가 발생하고 있을 가능성이 높은 것으로 나왔다. 또한, 서울어린이대공원에 꽃가루 알레르기를 일으킬 높은 가능성이 있는 수종들이 도출됨에 대상지 수목 관리 및 식재 수종 선정 시 해당 수종에 대한 고려가 필요하다.

미래 기후변화 시나리오에 따른 대상지의 알레르기 유발성 평가 결과, 기후변화가 심화될 경우 IUGZA 값이 증가할 것으로 예측되었다. 이는 대상지의 기온 상승으로 인한 수분기간의 증가로 인해 꽃가루 노출기간이 늘어났기 때문이다. 이와 같은 꽃가루 노출기간의 증가는 호흡기 질환의 피해 증가로까지 이어질 가능성이 있다(Lee et al. 2023). 특히 본 연구의 대상지는 어린이와 같이 꽃가루에 민감한 사람들이 많이 방문하는 곳이기 때문에 기후변화가 심화될 경우 꽃가루로 인한 알레르기 피해가 더욱 커질 가능성이 있다.

본 연구의 결과는 꽃가루 알레르기 피해에 대한 정량적인 평가를 시도하고 기후변화 상황을 반영한 평가를 진행하였다는 데에 의의가 있다. IUGZA 값을 차지하는 수종들의 비율을 평가하였을 때, 현재에는 꽃가루

알레르기 피해 유발 정도가 낮은 수종이 기후변화가 심해지면 높아질 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 기후변화에 심해질수록 꽃가루로 인한 사회적 피해가 증가할 수 있음을 시사한다. 따라서 기후변화가 심해지는 상황에서 꽃가루로 인한 알레르기 피해를 줄이고 지속적인 도시 녹지 이용을 위해 꽃가루 알레르기를 고려한 수목 식재계획과 관리가 필요할 것으로 보인다.

하지만 본연구는 미래에 대한 꽃가루 알레르기 유발성 평가에 대해 기후변화가 꽃가루 방출에 미치는 영향을 수분 기간에 초점을 맞추고 분석한 것으로 한정된다. 따라서 앞으로는 다양한 생물학적 기작의 변화, 대기오염물질과 꽃가루 간의 상호작용, 기온 상승으로 인한 수목의 생장량 변화 등을 고려하는 추가적인 연구가 요구된다. 또한 본 연구에서 이용된 각 수종별 매개변수의 값은 국내뿐만 아니라 국외의 선행연구 값을 참고하였다. 국내 상황에 맞는 더욱 엄밀한 평가를 위해서는 국내 현황에 맞춘 수종별 데이터가 더욱 필요할 것으로 보인다.

IUGZA의 개념은 원래 수목과 더불어 관목과 초본도 함께 반영할 수 있는 개념이지만 본연구에서는 수목에만 집중하여 분석을 진행을 하였다(Aerts et al. 2021; Velasco-Jiménez et al. 2020; Zong et al. 2020). 또한, 본 연구에서는 IUGZA를 통해 대상지의 꽃가루 알레르기 유발성 지수를 추정하였으나, 이는 간접적인 추정 방법이라는 한계가 있다. 이러한 IUGZA의 추정 값에 경우 임계값을 통해 값에 대한 평가를 할 수 있지만, 값의 증가분에 따른 영향에 대한 평가는 아직 진행할 수 없다. 따라서 대상지에 대한 보다 정확한 꽃가루 알레르기 현황을 파악하기 위해서는 꽃가루 알레르기 유발성을 정량적으로 측정하고 검증하는 과정이 필수적이다. 향후 이러한 과정을 통해 대상지의 꽃가루 알레르기 현황에 대한 정확한 평가가 이루어지면, 연구 결과의 활용도가 높아질 것으로 기대된다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00221110).

References

- Aerts R, Bruffaerts N, Somers B, Demoury C, Plusquin M, Nawrot TS, Hendrickx M. 2021. Tree pollen allergy risks and changes across scenarios in urban green spaces in brussels, belgium. *Landscape Urban Plann.* 207; 104001.
- Anderegg WR, Abatzoglou JT, Anderegg LD, Bielory L, Kinney PL, Ziska L. 2021. Anthropogenic climate change is worsening north american pollen seasons. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 118(7); e2013284118.
- Asse D, Chuine I, Vitasse Y, Yoccoz NG, Delpierre N, Badeau V, Delestrade A, Randin CF. 2018. Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the alps. *Agric for Meteorol.* 252; 220-30.
- Barnes CS. 2018. Impact of climate change on pollen and respiratory disease. *Current Allergy and Asthma Reports.* 18; 1-11.
- Blanco J, Dendoncker N, Barnaud C, Sirami C. 2019. Ecosystem disservices matter: Towards their systematic integration within ecosystem service research and policy. *Ecosystem Services.* 36; 100913.
- Cariñanos P, Adinolfi C, Diaz de la Guardia C, De Linares C, Casares-Porcel M. 2016. Characterization of allergen emission sources in urban areas. *J Environ Qual.* 45(1); 244-52.
- Cariñanos P, Casares-Porcel M, Díaz de la Guardia C, Aira MJ, Belmonte J, Boi M, Elvira-Rendueles B, De Linares C, Fernández-Rodríguez S, Maya-Manzano JM, Pérez-Badía R, Rodríguez-de la Cruz D, Rodríguez-Rajo FJ, Rojo-Úbeda J, Romero-Zarco C, Sánchez-Reyes E, Sánchez-Sánchez J, Tormo-Molina R, Vega Maray AM. 2017. Assessing allergenicity in urban parks: A nature-based solution to reduce the impact on public health. *Environ Res.* 155; 219-27.

- Cariñanos P, Casares-Porcel M, Quesada-Rubio J. 2014. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landscape Urban Plann.* 123; 134-44.
- Cariñanos P, Casares-Porcel M. 2011. Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape Urban Plann.* 101(3); 205-14.
- Cariñanos P, Grilo F, Pinho P, Casares-Porcel M, Branquinho C, Acil N, Andreucci MB, Anjos A, Bianco PM, Brini S. 2019. Estimation of the allergenic potential of urban trees and urban parks: Towards the healthy design of urban green spaces of the future. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 16(8); 1357.
- Cariñanos P, Ruiz-Peñuela S, Valle AM, de la Guardia CD. 2020. Assessing pollination disservices of urban street-trees: The case of London-plane tree (*Platanus x hispanica* Mill. ex Münch). *Sci Total Environ.* 737; 139722.
- Choi YJ, Lee KS, Oh JW. 2021. The impact of climate change on pollen season and allergic sensitization to pollens. *Immunology and Allergy Clinics.* 41.1; 97-109.
- Hong CS. 2015. REVIEW: Pollen allergy plants in Korea. *Allergy Asthma & Respiratory Disease.* 3(4); 239-254. [Korean Literature]
- Hruska K. 2003. Assessment of urban allergophytes using an allergen index. *Aerobiologia.* 19; 107-11.
- Jun SM, An NH, Eo J, Choi SK, Yeop SJ, Kim MH. 2023. Predicting Flowering Phenology and Suitable Habitat Distribution Changes of *Hypochaeris radicata* under Shared Socio-economic Pathway Scenarios in South Korea. *Journal of Climate Change Research.* 14(6-2); 941-955. [Korean Literature]
- Kang HN, Yun HS, Choi YJ, Oh JW, Min UY, Heo YS, Lee YS, Kim M, Kim KR, & Kim BJ. 2016. Evaluation of the association between pollen count and the outbreak of allergic disease. *Allergy Asthma & Respiratory Disease.* 4(6); 415-422.
- Kasprzyk I, Wojcik T, Cariñanos P, Borycka K, Ćwik A. 2019. Evaluation of the allergenicity of various types of urban parks in a warm temperate climate zone. *Aerobiologia.* 35; 57-71.
- Katz DSW, Robinson GS, Ellis A, Nowak DJ. 2024. The effects of tree planting on allergenic pollen production in New York City. *Urban Forestry & Urban Greening.* 92; 128208.
- Kim JS, Jeong MI, Han SW, Jang HK, Jung HH. 2013. Base Temperature for the Application of the Growing Degree Day Model to Estimate Flowering of Several Landscape Woody Plants. *Journal of People Plants and Environment.* 16(5); 275-279. [Korean Literature]
- Kim KR, Park KJ, Lee HR, Kim MJ, Choi YJ, Oh JW. 2012. Development and Evaluation of the Forecast Models for Daily Pollen Allergy. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology.* 14(4); 265-268. [Korean Literature]
- Kim MJ, Son MW, Lee J, Jung C. 2022. Blooming Time of *Tilia amurensis* Rupr. in Mountainous Area and Prediction of its Blooming Progress Using Growing Degree Day Model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology.* 24(1); 1-12. [Korean Literature]
- Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA). 2012. Clinical Feature and Immunologic Analysis of Pollen Allergic Patients According to Age and Air Pollution. Korea Disease Control and Prevention Agency. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2022. Climate Change Scenario Workbook. Korea Meteorological Administration. [Korean Literature]

- Lee KS, Kim M, Kim HH, Kim HB, Rha YH, Park YM, Sung M, Sheen YH, Yum HY, Lee YJ, Chun YH, Jee HM, Choi BS, Choi SH, Park Y. 2023. Associations between pollen and allergic rhinitis in children and adolescents. *Allergy Asthma & Respiratory Disease*. 11(1); 3-8. [Korean Literature]
- Manzano JM, Molina RT, Rodríguez SF, Palacios IS, Garijo ÁG. 2017. Distribution of ornamental urban trees and their influence on airborne pollen in the SW of Iberian Peninsula. *Landscape Urban Plann*. 157; 434-46.
- Mo F, Zhang J, Wang J, Cheng Z, Sun G, Ren H, Zhao X, Cheruiyot WK, Kavagi L, Wang J, et al. 2017. Phenological evidence from China to address rapid shifts in global flowering times with recent climate change. *Agric For Meteorol*. 246; 22-30.
- National Institute of Biological Resources (NIBR). 2015. The Guidebook of Allergenic Pollen in Korea. National Institute of Biological Resources (NIBR). [Korean Literature]
- National Institute of Forest Science (NIFOS). 2019. Guidelines for Fine Dust Reduction Urban Forest Creation Project. National Institute of Forest Science. [Korean Literature]
- Noh YM, Mueller D, Lee KH, Choi YJ, Kim KR, Lee HL, Choi TJ. 2012. Instantaneous Monitoring of Pollen Distribution in the Atmosphere by Surface-based Lidar. *Korean Journal of Remote Sensing*. 28(1); 1-9.
- Oh YC, Kim HA, Cheong JT, Kang IJ, Kim SW, Park KS, Kim BS, Kook MH, Lee HB, Oh JW. 2009. Evaluation of the Relationship between Pollen Count and the Outbreak of Allergic Diseases. *Pediatric Allergy and Respiratory Disease*. 19(4); 354-364. [Korean Literature]
- Park KJ, Kim HA, Kim KR, Oh JW, Lee SY, Choi YJ. 2008. Characteristics of Regional Distribution of Pollen Concentration in Korean Peninsula. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 10(4); 167-76. [Korean Literature]
- Paudel B, Chu T, Chen M, Sampath V, Prunicki M, Nadeau KC. 2021. Increased duration of pollen and mold exposure are linked to climate change. *Scientific reports*. 11(1); 12816.
- Pawankar R. 2014. Allergic diseases and asthma: A global public health concern and a call to action. *World Allergy Organization Journal*. 7; 1-3.
- Pecero-Casimiro R, Fernández-Rodríguez S, Tormo-Molina R, Monroy-Colín A, Silva-Palacios I, Cortés-Pérez JP, Gonzalo-Garijo Á, Maya-Manzano JM. 2019. Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: A case study of plane trees. *Science of the total environment*. 693; 133576.
- Pereira P, Baró F. 2022. Greening the city: Thriving for biodiversity and sustainability. *Sci Total Environ*. 817; 153032.
- Prigioniero A, Zuzolo D, Sciarrillo R, Guarino C. 2021. Assessing pollinosis risk in the Vesuvius National Park; A novel approach for index of urban green zones allergenicity. *Environ Res*. 197; 111063.
- Rispo M, De Masi L, Calandrelli MM. 2020. Assessment of allergenic potential in urban forests: A case study of the Royal Park of Portici in southern Italy. *iForest-Biogeosciences and Forestry*. 13(5); 376.
- Sousa-Silva R, Smargiassi A, Kneeshaw D, Dupras J, Zinszer K, Paquette A. 2021. Strong variations in urban allergenicity riskscapes due to poor knowledge of tree pollen allergenic potential. *Scientific Reports*. 11(1); 10196.
- Seoul Open Data Plaza, [Internet]. New Town Project and Construction Status: [cited: 2024 Jan 1].

- Available from: <https://www.data.go.kr/data/15046232/fileData.do?recommendDataYn=Y>
- Speak A, Escobedo FJ, Russo A, Zerbe S. 2018. An ecosystem service-disservice ratio: Using composite indicators to assess the net benefits of urban trees. *Ecol Ind.* 95; 544-53.
- Suanno C, Aloisi I, Parrotta L, Fernández-González D, Del Duca S. 2021. Allergenic risk assessment of urban parks: Towards a standard index. *Environ Res.* 200; 111436.
- Suh MJ, Yi HJ, Kim JH, Lee KH, Hong SC, Kang JW. 2019. Number of seasonal exposures to Japanese cedar pollen increases the risk of sensitization: observational study in Korean adults. *Scientific Reports.* 9(1); 10496.
- Velasco-Jiménez MJ, Alcázar P, Cariñanos P, Galán C. 2020. Allergenicity of the urban green areas in the city of Córdoba (Spain). *Urban Forestry & Urban Greening.* 49(1); 26600.
- Yun SK, Chung KH, Yoon IK, Nam EY, Han JH, Yu DJ, Lee HJ. 2012. Developmental rate equations for predicting blooming date of ‘Yumyeong’ (*Prunus persica*) peach trees. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology.* 14(4); 189-95. [Korean Literature]
- Zhang J, Tao A. 2015. Antigenicity, immunogenicity, allergenicity. *Allergy Bioinformatics.* 175-86.
- Zhang Y, Steiner AL. 2022. Projected climate-driven changes in pollen emission season length and magnitude over the continental United States. *Nature communications.* 13(1); 1234.
- Zong H, Yao M, Tang Y, Chen H. 2020. Assessing the composition, diversity, and allergenic risk of street trees in Qingyang District of Chengdu City. *Urban Forestry & Urban Greening.* 54; 126747.

