



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](#)

碩士學位論文

# 기후변화에 따른 제주도에 적합한 조경식재수종 예측

Prediction of suitable tree species for landscape planting  
under climate change in Jeju Island

濟州大學校 産業大學院

親環境農學科

鄭 素 英

2021年 8月

기후변화에 따른 제주도에 적합한  
조경식재수종 예측

指導教授 金柱成

鄭素英

이 論文을 農學 碩士學位 論文으로 提出함

2021年 8月

鄭素英의 農學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

전 용철



委 員

김동순



委 員

김주석



濟州大學校 産業大學院

2021年 8月



# 목 차

LIST OF TABLES .....	iii
LIST OF FIGURES .....	iv
ABSTRACT .....	v
I. 서 론 .....	01
II. 연구사 .....	04
1. 조정식재계획 .....	04
2. 수목선정의 적정성 .....	04
3. 기후변화에 대응한 식물 .....	05
4. 기후변화 시나리오 .....	09
5. 종분포모형을 활용한 연구 .....	12
III. 연구목적 .....	14
IV. 연구범위 및 방법 .....	15
1. 연구대상과 범위 .....	15
1) 연구대상 .....	15
2) 연구범위 .....	16
2. 자료의 구축 .....	16
1) 위치자료(종속변수) .....	16
2) 기후자료(환경변수) .....	18
3. 연구방법 .....	19
V. 연구결과 및 고찰 .....	20
1. 수종별 개별모형의 평가 .....	20
2. 기후적합지 변화예측 .....	21

1) 상륙침엽수 .....	21
2) 상륙활엽수 .....	22
3) 낙엽활엽수 .....	24
3. 기후변화전망과 연관성 분석 .....	25
1) 연평균기온 .....	26
2) 연평균 일최고기온 .....	27
3) 연평균 일최저기온 .....	27
4) 연강수량 .....	28
4. 바람의 영향을 고려한 적합수종 선정 .....	32
5. 결과종합 .....	33
6. 연구의 한계 및 향후 발전방향 .....	35
VI. 결    론 .....	36
VII. 적    요 .....	38
인용문헌 .....	40
부    록 .....	46

# LIST OF TABLES

<b>Table 1.</b>	Research on the impact of trees due to climate change .....	05
<b>Table 2.</b>	Type of RCP Scenario .....	10
<b>Table 3.</b>	RCP scenario comparison .....	11
<b>Table 4.</b>	Selection of target tree species .....	15
<b>Table 5.</b>	Number of samples of dependent variable .....	17
<b>Table 6.</b>	Bioclim's four environmental variables .....	18
<b>Table 7.</b>	ROC value of target species .....	21
<b>Table 8.</b>	Annual average temperature forecast _Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island) .....	26
<b>Table 9.</b>	Annual average temperature forecast _Rise compared to present (Jeju Island) .....	26
<b>Table 10.</b>	Maximum daily temperature forecast _Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island) .....	27
<b>Table 11.</b>	Maximum daily temperature forecast _Rise compared to present (Jeju Island) .....	27
<b>Table 12.</b>	Minimum daily temperature forecast _Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island) .....	27
<b>Table 13.</b>	Minimum daily temperature forecast _Rise compared to present (Jeju Island) .....	28
<b>Table 14.</b>	Annual precipitation forecast _Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island) .....	28
<b>Table 15.</b>	Annual precipitation forecast _Rise compared to present (Jeju Island) .....	29
<b>Table 16.</b>	Tree roots and wind resistance .....	31
<b>Table 17.</b>	Tree species with strong flame resistance and composition resistance .....	31
<b>Table 18.</b>	Prediction of climate suitability by target species .....	34

# LIST OF FIGURES

<b>Fig. 1.</b>	Changes in climate-appropriate areas of narrow leaved evergreen trees from RCP Scenario 8.5 .....	22
<b>Fig. 2.</b>	Changes in climate-appropriate areas of broad-leaved evergreen trees from RCP Scenario 8.5 .....	23
<b>Fig. 3.</b>	Changes in climate-suitable areas of deciduous broad-leaved trees from RCP scenario 8.5 .....	24

## ABSTRACT

In this study, based on the current distribution point of representative landscape trees that have been introduced and distributed in Jeju Island, the future climate suitability of the climate change scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 was confirmed using the MaxEnt model.

Among the major landscaping trees classified as evergreen narrow leaved trees, evergreen broad-leaved trees, and deciduous broad-leaved trees, the results of 18 species were analyzed, and each species was investigated and cross-analyzed in consideration of the climate characteristics of Jeju Island. Among them, the evergreen narrow leaved trees are expected to expand or maintain the climate-suitable area in the future, and most of them have deep-rooted trait and are surveyed to have strong wind resistance. It is expected that the actively introduction will be possible when selecting suitable tree species considering wind in Jeju Island. However, there are also species that indicate that they are not suitable or are subject to consideration locally, so efforts for maintenance such as prevention of cold damage in winter are expected to continue to be required in the future. Although deciduous broad-leaved trees are generally found to adapt and maintain to the climate change of Jeju Island, it is considered that it is possible to introduce them after checking the wind resistance of each tree type when selecting suitable tree species considering wind in the future.

Until now, there were no systematic standards and directions for judging the suitable area for planting of landscape trees, but climate suitability and vulnerability due to wind were investigated in accordance with climate change scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 for 18 representative landscape trees. This will be able to suggest an efficient management direction for currently planted trees, and it is believed that it will contribute to rational decision-making in selecting the tree species to be planted in the future. However, since the distribution data of the target tree species was created based only on the collected evidence samples, the sample for which the distribution was not



confirmed represents the limitation of this study, and only the four factors that have the most influence on the survival and growth of trees. Although it was selected as an environmental variable, it will be helpful for more accurate prediction if variables such as seasonal temperature fluctuations and short-term rainfall are also considered by the properties of trees.

## I. 서론

조경에서 식재는 생태적, 기능적, 미학적인 특성을 고려하여 식물을 심는 것으로 살아있는 유기생물체인 식물이 가장 중요한 소재가 되어 공간을 조성한다는 특수성을 가지고 있다. 우리 주변의 생활공간에서 다양한 목적과 계획에 따라 조성된 식재공간은 벽면을 형성하거나 보행자의 시선을 차단하는 차폐적 기능, 쾌적한 환경과 함께 시각적 안정감과 도심 속 자연의 모습을 제공하는 경관적 기능, 생물 종 다양성 증진을 위한 생태적 기능, 풍수 개념을 도입하여 랜드마크의 효과를 주는 상징적 기능 등의 역할을 하고 있다(Park and Cho, 2014).

살아있는 소재로서의 식물은 자연과의 교감을 위한 하부구조로써 밑거름이 될 뿐만 아니라 독특하고 다양한 경관적 특성으로 아름다운 공간 창출의 중요한 역할을 하기 때문에 조경의 발전과 확장은 식재설계에 관한 기반 환경의 형성과정과 동일선상에 있다고 할 수 있다. 그러나 정작 업계의 현실은 그렇지 못하고 있는 실정이며, 오히려 열악한 상황으로 치닫고 있어 식재설계의 기반환경 개선에 대한 필요도는 더욱 높아지고 있다. 조경소재에 대한 학습이 턱없이 부족한 상태에서 자주 이용되는 30~40종의 수종을 천편일률적으로 이용하고 있는 관행도 문제겠지만 설계단계에서 지역별, 대상지별 적합수종 및 품종에 대한 고려가 이루어지지 않은 채 설계하는 현실에서 문제의 이유를 찾을 수 있다(Jeong et al., 2012). 현재 식재계획 분야에서 수종별로 적합한 식재권역을 규명하기 위한 과학적이고 체계적인 연구는 미비하고 한국토지주택공사(LH, 2018)의 설계지침(조경)에 지역별로 식재수종을 제시하고 있으나, 이는 약 30년 전에 작성된 것으로 추정될 뿐 작성시기와 구분근거가 명확하지 않고 변화하는 기후에 대한 고려가 부족하여 조경수목 선정 시 참고할 실질적인 기준이 없는 상황이다. 토지주택연구원(LHI, 2017)은 1월 평균최저기온을 기준으로 식재권역도를 수정하였으나, 지역별 식재수종에 대한 적정성은 논의하지 않고 있어 보완이 요구되며, 대부분의 연구가 자연분포 수목 또는 산림지역 수목의 잠재분포 변화, 취약성 평가, 수종의 풍부도 변화에 초점을 두고 있어 도시의 중요한 구성요소인 조경수목에 초점을 맞춘 연구가 필요하다(Kim, 2019).

일반적으로 어떠한 장소에 식재될 수목의 생육과 생존을 고려할 때 그 대상지의 기후조건이 결정적 요인이라고 여기는 것에 대해서는 누구도 부인할 여지가 없을 것이다. 특히 본 연구에서 다루고자 하는 제주도에서 조경식재를 할 경우 기후에 대한 요인은 더욱 크게 작용하게 된다. 제주도는 우리나라에서 가장 큰 섬이며, 최남단에 위치한 곳으로 기후적인 특성이 한반도 내륙지역과는 다르게 나타난다. 기후분류상 아열대기후대에서 온대기후대로의 전이지대에 위치하고 있다. 태양고도가 연중 높아 태양의 순복사량이 에너지 수지상 과잉이 시작되는 위도대이며, 여름에는 태양의 북상으로 열대기단의 영향권에 들기도 한다. 사면이 바다이므로 연중 온난 습윤한 해양성이 강하여 일교차가 육지에 비해 작고, 지표 및 지중 온도가 높아서 겨울철 원예작물의 월동재배 및 아열대과수의 시설재배가 가능하다. 또한 해발 1,950 m의 한라산이 중앙에 자리하고 있어 사면별 기후 특성이 다양하며 남·북 사면간의 기후차이가 뚜렷하고, 한라산 정상에서 해안까지의 거리가 15~40 km에 불과하여 해발고도 자체가 제주도의 기후에 미치는 영향이 매우 크다. 기온의 분포는 지형과 해양의 영향이 뚜렷하게 반영되므로 제주, 성산, 서귀포, 한림 등 해안지역에서 기온이 높고, 어리목, 진달래밭, 성판악, 윗세오름 등 고도가 높은 곳에서 기온이 낮다. 강수량 역시 동서남북의 지역별, 고도별 편차가 매우 크고 지형의 영향으로 해안지역보다 산간지역에서 많은 양의 강수 현상을 보인다(NIMR, 2010). 제주지방의 기후요소를 한반도 내륙지방의 값과 비교하면 기온이 높은 점 외에도 강수량이 많고, 강한 바람이 자주 부는 특징이 있다(KMA, 2021b). 한반도에서 80 km 이상 떨어진 해상에 위치하고 중간에 바람을 차단하는 장애물이 없어서 연중 바람이 강하며, 특히 겨울철의 북서계절풍은 제주도의 문화를 바람 문화라고 할 만큼 생활 전반에 많은 영향을 미치고 있다. 사시사철 잦은 바람이 제주를 다녀가지만 특히 여름엔 강한 태풍이 섬을 휩쓸고, 겨울엔 매서운 북서풍이 길게 이어진다. 제주 섬의 겨울계절풍은 여름계절풍인 태풍보다 풍속은 약하지만 장시간에 걸쳐 분다. 초겨울이나 늦겨울에는 3~4일, 때로는 1주일 동안 계속 불기도 하며, 기압이 서고동저형으로 배치될 때는 특히 더 강해진다(Kim and Lee, 2001). 이와 같이 바람이라는 기후적 요인은 식물 생태계에도 강한 영향을 미칠 수밖에 없으며 그 영향이 지닌 세기는 바람의 강도, 지속도, 시간에 의존하며 식물의 탈수, 왜소, 변형, 손상, 파괴 등의

형태로 나타난다.

기후변화로 인한 수목의 생육환경 변화를 살펴보면 3~4월 이상고온 현상으로 인해 40년 전(1968~1975년) 대비 개화시기가 평균 14일 앞당겨졌고, 겨울철 이상고온, 여름철 폭염과 집중강우, 가뭄발생빈도 증가로 소나무, 낙엽송과 고지대에 분포하는 구상나무, 가문비나무 등 침엽수종의 고사피해가 발생하였다. 빨라진 식물개화 시기, 온대수종의 북상, 생육 스트레스 증가 등 기후변화로 인해 조경분야의 영향이 가시화 되고 있어 우리나라도 기후환경 변화에 따른 식재권역 구분기준과 재설정, 이를 반영한 식재시기 조정을 통해 고사 및 수목피해를 감소할 수 있는 방안 도입이 필요하다(Yoon et al., 2017). 또한 평균기온의 상승, 집중호우 및 가뭄빈도 증가, 여름철 폭염 및 동절기 한파발생은 수목의 생육 스트레스를 유발하고 수세약화에 따른 병충해 증가 및 고사로 이어지기 때문에 제주도 내에서도 지역과 지형에 따라 기후적 특성이 다른 점을 주목하여 수목을 식재하기 전에 대상지역의 기후변화에 대한 면밀한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 제주도 내 조경수목 식재계획의 방향제시 및 수종선정에 도움이 되고자 기후변화와 제주도의 특성을 고려하여 현 시점에 적합하고 새로운 식재가이드라인 구축에 중점을 둔 연구를 수행하고자 한다.

## II. 연구사

### 1. 조경식재계획

조경분야에서 식재계획에 대한 중요성과 식물선정에 관한 연구는 국내 및 해외에서도 지속적으로 이루어져왔다. 주요 조경수목의 생리적 특성을 고려하고 기후변화로 인해 식물에 끼치는 영향력을 파악하는 것은 보다 효율적인 계획과 시공 후 유지관리를 원활하게 하는 것에 그 이유가 있다고 할 수 있다.

국내의 식재기반 형성에 관한 연구에서 조경수목 품종의 비다양성 및 가격고시 시스템에 대한 문제점을 제기하며 현 구조에서 식재계획의 어려움을 언급하였다. 조경수목에 대한 품종 분석과 비교를 통한 다양화 및 식재설계의 전문성 증진을 위해서는 먼저 다양한 품종의 단가가 제시되는 체계가 형성되고 이를 식재설계에 반영할 수 있도록 해야 한다고 분석하였다(Jeong et al., 2012). 그 외에 조경수목의 하자율과 그 원인 및 대책에 대한 연구에서는 급격한 기후변화, 부적합 수목선정, 식재기반 불량, 공사관리 미흡, 유지관리 미흡 등을 주요 하자원인으로 제시하고 있으며, 복합적 원인에 의하여 하자가 발생하기 때문에 정확한 하자 원인 및 개선방안 도출을 위해서는 입지여건을 고려한 체계적인 DB구축 및 분석을 기반으로 한 식재계획의 중요성을 강조하였다(Kim, 2014).

### 2. 수목선정의 적정성

수목의 식재분포 및 적정성 평가에 관한 연구는 눈에 띄게 변화하는 기후요인에 따라 다양하게 변화하고 있으며 그에 대한 필요성 또한 더욱 높아지고 있다. 특히, 아열대고산지대의 천근성 수목은 서식지 내 바람의 영향과 미지형에 따라 수고 생장과 수관 생장이 다르게 나타나는데, 바람이 수목의 생장에 주요한 요소임을 나타내는 이와 같은 연구에서 아열대고산지대의 침엽수 환경에 대한 적응 전략을 이해하고, 현지 내 보전을 위한 적지를 선정하여 기후변화로 인해 위협에 처한 아열대고산지대 식생의 보전과 관리 방안을 수립하였다(Han et al., 2019).

우리나라에서 조경수목으로 활용되는 상록활엽수를 대상으로 한 연구에서는 식재관련 문헌조사 및 내한성 분석을 토대로 한 천연분포지역, 식재분포지역 등 지역별 상록활엽수의 식재가능범위를 추정하였고, 그 결과 도시의 열섬효과, 국지적 미기후 현상, 지구온난화 등의 외적요인과 함께 상록활엽수종의 저온에 대한 내성 등의 내적요인에 따라 우리나라 상록활엽수의 천연분포지역은 주로 남부 및 도서지역으로 협소한 편이었지만 식재분포 및 내한성의 범위가 중부권 및 수도권까지 가능할 것으로 분석하였다(Park, 2010).

### 3. 기후변화에 대응한 식물

전 세계적인 기후의 급격한 변화로 인하여 생물 종의 서식지가 파괴되거나 생육환경이 급격히 훼손되고 있고, 식물은 기후변화에 직접적인 영향을 받기 때문에 국내·외에서 이에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다(Hannah, 2014). 미국이나 유럽, 아시아 등에서도 다양한 기후시나리오를 적용하여 미래의 식생 분포 변화를 예측하였으며(Attorre et al., 2011), 유럽 전 지역을 대상으로 식물, 곤충, 조류, 포유류 등 총 47종의 2080년의 생육분포 변화를 예측하기도 하였다(Harrison et al., 2006). 일본에서도 기후변화 및 중 분포 모형을 통하여 식생 분포에 미치는 다양한 기후적 영향을 평가하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다(Horikawa et al., 2009; Nakao et al., 2011). 식생 분포 및 기후변화에 대한 연구가 국제적으로 활발하게 이루어지고 있는데 비하여 국내에서는 최근에서야 활발한 연구들이 이루어지고 있다(Table 1).

**Table 1.** Research on the impact of trees due to climate change

Division	Author	Year	Title
Domestic	양금철 외	2007	남한의 기후와 지형적 특성에 근거한 주요 식물군락의 분포
	국립기상연구소	2010	기후변화 이해하기 6_제주의 기후변화
	박종철 외	2010	기후변화에 따른 난온대상록활엽수림대의 이동에 관한 연구
	이정현 외	2010	상록활엽수 3종의 한반도 분포 및 자생복한계지
	윤종학 외	2011	기후변화에 따른 한반도 후박나무의 잠재생육지 및 변화예측
	윤종학 외	2011	한반도 난온대 상록활엽수의 분포변화 및 기후조건
	권혁수 외	2012	국지적으로 분포하는 식물에 대한 기후 및 환경변수 영향

강혜순	2013	기후변화에 대한 식물의 생태적 반응: 연구동향과 한국에서의 적용가능성
천정화 외	2013	소나무의 지리적 분포 및 생태적 지위모형을 이용한 기후변화영향 예측
천정화 외	2014	기후변화에 따른 주요수종의 적지분포 변화예측
박현철 외	2014	기후변화에 의한 눈잣나무의 서식지 분포예측
정수영 외	2014	남부지역 도시녹지의 난대상록활엽수 동해피해 특성
이용호 외	2015	기후변화 시나리오에 의한 외래식물 실망초( <i>Conyza bonariensis</i> )의 서식지 분포
이용호 외	2016	MaxEnt를 활용한 청비름( <i>Amaranthus viridis</i> )의 기후변화 시나리오에 의한 서식지분포변화 예측
윤은주 외	2017	기후변화 대응 식재환경 개선기초연구
김호걸	2017	다양한 규모에서의 기후변화에 따른 산사태 영향 및 취약성 평가
김지연	2019	기후변화에 따른 조경수종의 기후적합성 변화예측
한아름 외	2019	미지형과 바람이 덕유산 가문비나무의 수관생장에 미치는 영향
Woodward et al.,	1987	Cilmate and plant distribution at global and local scales
Iverson et al.,	1998	Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US
McKenny et al.,	2001	Canada's plant hardiness zones revisited using modern climate interpolation techniques
BERRY et al.,	2002	Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland
Austin, M.P.	2002	Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling
Thuiller et al.,	2003	BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change
Foreign Ottaviani et al.,	2004	Two statistical methods to validate habitat suitability models using presence-only data
Thuiller et al.,	2005	Climate change threats to plant diversity in Europe
Guisan et al.,	2005	Predicting species distribution: offering more than simple habitat models
Phillip et al.,	2006	Maximum entropy modeling of species geographic distributions
Elith et al.,	2006	Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data
Attorre et al.,	2011	Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula
Trisurat et al.,	2011	Plant species vulnerability to climate change in peninsular Thailand
Brune, M.	2016	Urban trees under climate change, potential impacts of dry spells and heat waves in three German regions in the 2050s
Adhikari et al.,	2019	Potential impact of climate change on plant invasion in the Republic of Korea

기후변화에 직면하여 생물 종의 분포와 환경요인과의 관계를 밝히는 것은 생태학 분야의 중요한 과제 중의 하나이며, 종 보전 및 종의 생태적 지위를 파악하기 위해 종 분포에 대한 정량적 예측을 위한 다양한 통계적 방법이 시도되고 있는데, 특히 기후변화에 따른 생물종의 관리를 위해 통계적 회귀방법을 이용한 다양한 종분포 모델들이 개발되어 적용되고 있다. 종분포 통계모델 중 식물종의 분포예측을 위해 널리 이용되고 있는 Classification tree model (CT-model)은 기후변화에 따른 식물분포와 환경요인에 대한 영향평가 연구에 유용하게 사용되고 있다(Yun et al., 2011b).

현재 기후 하에서 한반도에 분포하는 난·온대 상록활엽수의 분포를 규정하는 기후조건과 분포적지를 종분포 통계모델을 이용하여 정량적으로 밝히는 것을 목적으로 한 연구에서는 한반도 난·온대 상록활엽수의 기후조건과 분포적지를 제시하고, 향후 각 식물종별 기후조건과 최적의 분포지역을 산출함과 동시에 미래 기후변화 시나리오에 의한 분포예측을 통하여 기후변화에 민감한 식물 종들의 이동통로 확보 및 보전 전략 수립에 중요한 역할을 담당할 것으로 예측하였다 (Yun et al., 2011a).

국내뿐만 아니라 세계적 기후변화는 공공 및 개인정원을 포함한 도시지역의 생태계 구조와 기능을 위협한다. 변화하는 기후환경 하에서 도시 녹지 공간 설계의 과제를 해결하기 위해 적응 전략을 제시한 연구에서는 기후변화에 대비한 도심지 식재디자인 전략으로 식물 종에 따라 생태적 적응력, 회복력을 규명하였다. 그 전략은 특정 식물 종들을 기후 변화의 특정 예측에 일치시키기 보다는 식물의 회복력에 초점을 맞추는 식재디자인을 위한 규칙을 제공하고 있다. 건강한 생태계 기능은 예측할 수 없는 기후 변화의 영향에 의해 타협될 수 있는 종과 그들의 생체환경 사이의 상호작용에 따라 달라지는데, 결과적으로, 불확실성으로부터 생태계를 완충하기 위한 적응 전략의 개발이 요구되고 있다는 것이다 (Hunter, 2011).

기후변화가 산림생태계에 미치는 영향을 정밀하게 평가하기 위해서 국립산림과학원 (2014)에서는 2011, 2012년도 수치산림기후도를 활용하여 기후요인을 고려한 전



국단위 및 생태권역 단위의 주요 수종별 지위지수 추정 식을 개발하여 적지를 판정한 바 있다. 한편 2012년에는 기상청에서 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 5차 평가보고서에 사용될 새로운 기후변화 시나리오를 기반으로 우리나라에 대해 상세기후변화 시나리오를 개발하여 배포하였다. 2100년까지의 연도별 기후변화 시나리오 Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5, 8.5를 발표하였으며, 이는 이전에 제공된 기후변화 시나리오보다 100배 상세해진 것으로 다양한 기후변화 대응전략 수립에 필요한 정보로 활용될 수 있을 것으로 평가되고, 19개의 기후인자를 2020년부터 2100년까지 10년 단위의 자료로 정리하여 산림의 생태권역 및 전국단위의 연도별 적지분포 변화를 예측함으로써 기후변화가 수종별 산림생산력에 미치는 영향을 평가하였다. 그러나 장기적인 관점에서 볼 때 기후변화는 토양조건에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 충분한 근거제시에 한계가 있음을 나타내고 있다(Chun et al., 2014).

대부분의 연구가 기후자료를 분석하여 분포지 변화를 예측하고 있기 때문에 지역 및 지형 등의 미기상 특성 등의 다양한 차이를 반영하지는 못하고 있다. 난대상록활엽수 중에서 국내에 자생하고 있는 수종을 한반도내의 다양한 산지에 시험 식재하여 생육현황을 조사함으로써 현재 난대상록활엽수의 복상현상에 대비한 생육적지를 규명하고, 이를 활용한 산림 생태계 복원과 조경 및 조림을 위한 기초자료, 기후변화에 따른 대책수립의 자료로 활용하기 위한 연구도 진행되었다(Kang, 2013).

침엽수와 활엽수, 혼효림이나 소나무, 참나무군락 등 군락 단위에서의 기후변화 연구(Lee et al., 2006; Lee and Choi, 2010), 기후와 식생 분포의 상관관계 연구(Koo et al., 2001; Yang and Shim, 2007), 기후변화에 민감한 난대활엽수림에 대한 기후변화 연구(Yun et al., 2011a, b, c) 등이 진행된 바 있다. 그러나 이러한 연구는 큰 군락단위 수준의 변화를 예측하여 종 단위의 분포양상에 대한 고찰이 미비하거나 기후인자만을 고려하는 한계를 가지고 있으며, 북방한계선이 남해안 쪽에 걸쳐있는 난대활엽수림에 한정되어 있어 전체에 걸쳐진 식생의 기후 영향을 파악하기 어렵다. 위 연구들에서는 국지적으로 분포하는 식물들의 생육지를 예측하고, 분포패턴에 영향을 주는 환경인자를 평가하는 것을 목적으로 하였으

며, 식물 생육에 미치는 기후적 영향을 규명하여 향후 한반도 기후변화 시나리오에 따른 다양한 식물의 생육지 이동예측 연구 및 적용 가능성에 대한 기초자료로서 활용하고자 하였다(Kwon et al., 2012).

#### 4. 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오에 관한 설명과 자료는 기상청(KMA)에서 제공하는 기후정보포털의 내용을 참고하여 기술하였다. 일반적으로 미래기후를 전망할 때 미래의 기후시나리오를 이용한 평가 방법과 과거기후자료를 이용하는 방법이 존재하지만 관측 자료의 한계(관측기간, 측정의 오차, 관측지점의 분포와 개수 등)로 인해 불확실성이 큰 미래의 기후전망에는 발생 가능한 가상의 온실가스 증가 시나리오를 만들고, 전 지구 기후모델 Global Climate Model (GCM)을 이용하여 기후변화를 모의하는 방법이 사용되고 있다. 하지만 GCM의 해상도가 100-500 km 정도로 낮기 때문에 국내 지역평가에는 이러한 효과를 반영할 수 있는 상세화 기법이 요구되며 그 과정을 통해 지역별 미래 기후 전망을 수행하게 된다.

기후변화 시나리오를 작성하는 방법은 합성시나리오(Synthetic scenario), 유사시나리오(Analogue scenario), GCM기반 시나리오(GCM based scenario)가 있으며, 일반적으로 GCM이 가장 많이 사용된다. 기후 변화에 관한 정부 간 협의체 IPCC는 1990년 제 1차 회의부터 2014년 제 5차 회의까지 기후변화보고서를 발표하면서 시대별 환경변화를 고려하고, 시간경과에 따른 보완사항을 반영하여 Scientific Assessment 1990 (SA90), Special Report on Emission Scenario (SRES), RCP 등의 온실가스배출 시나리오를 적용하였다. IPCC에서는 전세계 기후변화 연구를 위하여 수십 개의 GCM시나리오를 제공하고 있으며, 어떤 GCM시나리오를 사용하는지 여부에 따라 다양한 결과가 도출되고 있으므로 연구 대상지에 가장 적합한 GCM시나리오를 채택하여 적용하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

IPCC는 2007년 제4차 보고서에서 Non-SRES시나리오인 5개 온실가스 배출시나리오를 제공하고 있다. PICTLExperimental시나리오는 산업사회 이전의 온실가

스 상태가 지속된다고 가정한 시나리오이며, 20C3MEEExperimental시나리오는 20세기 동안 온실가스의 증가만큼 계속 증가한다고 가정한 시나리오이다. 또한, 산업사회 이전의 온실가스를 바탕으로 온실가스 증가에 따라 COMMITAn시나리오, 1PTO2X시나리오, 1PTO4X시나리오가 있다(IPCC, 2007).

IPCC 제 5차 보고서 발간을 위해서 IPCC에서는 먼저 온실기체의 증가 양상에 대해 이전과 달리 대표농도경로(RCP)를 도입하였다. 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 대표(Representative)라는 표현을 사용하였으며, 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 경로 (pathway) 라는 의미를 포함한다. RCP는 온실가스 농도 값 설정 후 기후변화 시나리오를 산출하여 그 결과에 대한 대책으로 사회 경제 분야별 온실 저감 정책을 결정하기 위해 사용하는 기후 변화 시나리오이다. 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 농도별로 4개의 시나리오를 제시하고 있다(Table 2).

**Table 2.** Type of RCP scenario

Scenario	Explanation
RCP 2.6	When the Earth itself is able to recover from the effects of human activities. (The maximum value that the Earth system can recover by itself)
RCP 4.5	When the greenhouse gas reduction policies are substantially realized. (Considering major observations for 5 years after the SERS scenario)
RCP 6.0	When the greenhouse gas reduction policy is realized to some extent. (Considering major observations for 5 years after the SERS scenario)
RCP 8.5	When greenhouse gases are emitted as the current trend

RCP시나리오 2.6 (420 ppm)은 인간 활동에 의한 악영향을 지구 스스로가 회복하는 경우로 실현이 불가능한 것으로 보인다. 반면, RCP시나리오 4.5 (540 ppm)는 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우를 의미하며, RCP시나리오 6.0 (670 ppm)은 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현된 경우 그리고 RCP시나리오 8.5 (940 ppm)는 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 의미한다(KMA, 2021a : Table 2, 3).

IPCC에서는 대표적인 농도변화에 대한 시나리오를 결정하기 위해서 300여개 이상의 논문과 보고서에 출간된 시나리오들을 점검하였고, 그 중에서 주요한 복사강제력을 고려한 30개의 시나리오를 후보로 선택하여 각 시나리오 마다 온실가스 배출 최고·최저치를 나타내었다고 한다. 그리고 30개의 후보에서 바람직한 범위, 안정성, 개수, 분리성, 포괄성 등에 기초하여 최종적으로 가장 이상적인 4개의 시나리오를 선택하였다. 이 시나리오들은 4개의 그룹 (MES-A2R, AIM, MiniCAM, IMAGE)에서 개별적으로 개발하였으며, 이를 각각 RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, RCP 2.6이라고 명명하였다. 이 시나리오는 각각 온실기체가 상승/안정화/하강하는 특징을 갖고 있다(Table 3).

**Table 3.** RCP scenario comparison

Scenario	Radiative forcing	CO <sub>2</sub> concentration (2100s)	Temp. (°C)	Pathway	SRES
RCP 2.6	Reaching the highest at ~2.6 W/m <sup>2</sup> and falling, Before 2100s,	~420 ppm	1.5	Peak, downward	-
RCP 4.5	Stabilized to > 4.5 W/m <sup>2</sup> in 2100s	~540 ppm	2.8	Stabilize	B1
RCP 6.0	Stabilized to > 6.0 W/m <sup>2</sup> in 2100s	~670 ppm	3.0	Stabilize	B2
RCP 8.5	Stabilized to > 8.5 W/m <sup>2</sup> in 2100s	~940 ppm	4.8	Increase	A2~A1F1

복사강제력(Radiative Forcing)이란 어떤 인자가 갖는 지구-대기 시스템에 영향을 주어 에너지 평형을 유지 및 변화시키는 영향력의 척도이다. 지구가 흡수하는 일사량과 그 중 다시 우주로 방출되는 에너지의 차이로, 보통 대류권과 성층권의 경계인 대류권계면에서 1 m<sup>2</sup> 면적당 와트 단위를 이용해서 정량화한다. 지구가 흡수하는 에너지가 더 커서 지구의 온도가 올라갈 때는 양의 강제력(Positive forcing)이라고 하고, 반대의 경우는 음의 강제력(Negative forcing)이라고 한다. 이러한 복사강제력은 잠재적인 기후변동 메커니즘의 중요한 지표이다. 즉 복사강제력이 양수이면 지표온난화가 진행되고, 음수이면 지표냉각화가 진행된다. 단위는 W/m<sup>2</sup>으로 지상에 도달되는 태양복사가 약 238 W/m<sup>2</sup>이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에

해당된다.

RCP 8.5는 현재 추세로 온실가스가 지속적으로 배출되는 business as usual (BAU)상황이며, RCP 6.0과 RCP 4.5는 SERS 시나리오 생산이후 5년간 주요 관측값 변화와 사회현상의 변화를 고려하여 설정하였고, RCP 2.6은 지구시스템이 기후변화에 대하여 스스로 회복할 수 있는 최대 한계 값으로 정해졌다(IPCC, 2007).

## 5. 종분포모형을 활용한 연구

종의 분포를 정량적으로 분석하고 예측하기 위한 다양한 공간통계모형이 개발되고 있다(Franklin, 2009). 공간모형은 자료의 형태에 따라 출현모형과 출현-비출현 모형으로 나뉘는데, 본 연구에서는 식물의 기후적합성을 평가하는데 있어서 Maximum Entropy Model (MaxEnt) 모형을 이용하였으며, 생물종의 출현정보만을 이용하여 출현확률을 예측하고 통계적 측면에서 우수성이 입증된 모형이다. 위치자료 수집에 사용된 전국자연환경조사에서는 식물의 출현위치만을 제공하기 때문에 출현자료만을 이용하는 여러 공간모형기법 중 가장 높은 모형적합도를 보여주는 MaxEnt 모형을 이용하여 분석을 실시하였다(Austin, 2002; Ottaviani et al., 2004; Elith et al., 2006; Phillips et al., 2006). MaxEnt 모형은 회귀분석을 기반으로 하는 모형으로 최대 엔트로피 접근법을 이용하여 생태적 지위와 이에 따른 잠재적 서식지 분포를 확률적으로 제시하기 때문에 생물 분포를 예측하는 다른 모델들이 비출현 정보를 요구하는 것과 달리 출현정보만을 요구한다. 또한 적은 표본수로도 예측이 가능하며 자생식물과 달리 일반적으로 분포하는 지역 외에도 확산 가능성이 높은 외래식물의 잠재서식가능 분포지 예측에 유리하다(Phillips et al., 2006).

국지적으로 생육하는 식물들의 분포를 예측하고, 분포패턴에 영향을 주는 환경인자를 평가한 연구에서는 식물의 분포 양상에 따른 생육지를 군집화하거나 기후변화에 따른 취약성 분석에 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 전국자연환경조사

결과를 활용한 종분포모형 연구 및 종 다양성 연구에서도 이러한 경향에 따른 생육지 모형을 개발할 수 있다고 하였다. 또한 향후 개발되는 한반도 기후변화 시나리오에 따른 다양한 식물의 생육지 이동예측 연구의 기초자료 및 모형화 가능성을 살펴보는 데 도움을 줄 것이라고 분석하였다(Kwon et al., 2012).

국내에서도 MaxEnt를 이용하여 잣나무, 눈잣나무, 신갈나무, 소나무, 미선나무와 같은 목본류와 초본류인 모데미풀의 적지분포 및 기후변화에 대한 변화를 예측한 바 있다(Lee et al., 2011, 2012, 2014; Chun and Lee, 2013; Park et al., 2014; Choi et al., 2015). 이는 국내에 유입되어 분포하고 있는 대상종의 현재 분포지점을 기반으로 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 따른 확산 분포 지도를 작성하여 향후 확산 범위와 관리를 위한 기초자료를 확보하고자 한 연구들이다. 이를 통해 대상종의 확산이 기후변화 양상에 따라 가변적일 수 있으며 잠재서식지 비율의 증가는 실제 확산으로 빠르게 이어질 수 있을 것으로 파악하였다. 이러한 지역별 예측은 향후 관리 계획 설정 등에 활용 가능할 것으로 판단한다(Lee et al., 2016). 같은 방법으로 *Coryza bonariensis* L. (실망초)의 현재의 잠재 서식지와 RCP 4.5와 RCP 8.5에 의한 미래의 종분포 확산 예측을 MaxEnt 모델을 사용하여 확인하였다. 기후변화에 의한 온도 상승은 대상종 또한 전국적으로 확산될 가능성을 가지고 있어 장기적인 관심과 관리기술 개발이 필요한 시점임을 시사하고 있다(Lee et al., 2015). 국내 멸종위기 양서파충류의 공간적 분포형태와 주요 분포 지역 예측에 대한 연구(Do et al., 2017)에서는 개체들의 분포현황을 기반으로 분포지점의 고도와 기후 같은 환경변수들을 추출하고 이들 간의 상관관계와 선호하는 서식지 및 주요 서식적합 지역을 예측하는데 MaxEnt 모형을 이용하였다.

### Ⅲ. 연구 목적

특정 대상지에 가장 적합한 조경수목을 선정하기 위하여 수목의 생리적 속성에 따라 나타나는 조경수목의 성장반응을 이해하려는 연구가 다수 진행되었으나 가장 중요한 요소 중 하나인 기후를 고려한 체계적이고 과학적인 연구가 미비한 실정이다. 우리 주변에 녹지와 오픈스페이스 조성은 기후변화 저감방안 중 중요한 요소로서 조경수목의 역할이 점점 중요해지는 반면, 특히 제주도에서의 조경수목과 기후변화의 영향에 관한 데이터가 부족하여 관련 연구가 필요할 것으로 판단된다. 수목에 대한 기후변화의 잠재적 영향으로 수목의 성장, 생물계절성, 질병과 해충에 대한 반응, 극한기상에 따라 증가하는 고사피해, 잠재분포 범위의 변화예측과 취약성 평가와 관련한 연구가 진행되었다. 그 중 종의 분포와 환경조건 간의 관계가 미래에도 성립한다는 가정 하에 종분포 모형을 이용하여 미래에 적합한 환경범위를 식별함으로써 기후변화의 영향을 평가한 연구가 광범위하게 이루어져 왔다. 최근에는 각 모형이 갖는 한계와 불확실성을 최소화하기 위한 대안으로 여러 모형을 통합하는 앙상블 모형이 대안으로 제시되었다. 현재까지는 산림에 자연 분포하는 수목을 중심으로 한 연구가 진행되었으며, 국내에서 진행된 연구는 일부 수종, 그리고 광범위한 공간에 대해서만 평가되어 지형, 고도, 계절별로 기후변화의 폭이 큰 제주도에서는 그에 따른 세분화된 연구가 필요하다.

조경수목은 그 분포에 대한 자료구축이 미비하고 인위적 관리가 수반됨에 따라 생육과 생존의 상당한 영향을 받기 때문에 그 정확한 서식범위나 환경조건을 정확하게 규정하기는 어려우나 인위적으로 조성된 공간에 생육에 적합한 기후범위를 예측하는 것은 자생수목 분포자료를 활용하여 파악이 가능하다. 본 연구는 변화하는 기후상황을 고려하여 제주도 환경에서 지속적인 성장 및 적응 가능한 조경 수목을 제안하고, 관리와 계획분야를 위한 방안으로 향후 합리적인 수종선택을 지원하는데 그 목적이 있다. 국내 유입되어 분포하고 있는 조경수종의 현재 분포지점을 기반으로 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 따른 기후적합지도를 작성하여 향후 확산 범위와 관리를 위한 기초자료로서 활용되고자 한다.

## IV. 연구범위 및 방법

### 1. 연구대상과 범위

#### 1) 연구대상

본 연구의 대상수목은 「설계지침(조경)」(LH, 2018)과 「한국의 조경수목(기문당)」(Kim, 2007)의 권장수종을 근거로 선정하였다. 수종별 식재권역은 2개 이상의 권역에서 생육이 가능한 경우가 많기 때문에 총 10개 유형(전국, 북부, 북부~중부, 북부~남부, 중부, 중부~남해안, 중부~남부, 남부, 남부~남해안, 남해안)으로 구분된다. 제주도 지역은 별도로 구분되어 있지 않아 전체 유형 중에서 남부~남해안, 남해안의 식재권장 수종과 실제 조경수로 상용되는 상록침엽수 7종, 상록활엽수 14종, 낙엽활엽수 15종을 선정하였다(Table 4).

**Table 4.** Selection of target tree species

Division	Species
Narrow leaved evergreen tree (7)	<i>Pinus thunbergii</i> Parl. / <i>Torreya nucifera</i> L. Siebold & Zucc. <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc. / <i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc. <i>Platycladus orientalis</i> L. <i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl. <i>Juniperus chinensis</i> L.
Broad-leaved evergreen tree (14)	<i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss. / <i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq. <i>Cinnamomum camphora</i> L. J. Presl <i>Elaeocarpus sylvestris</i> var. <i>ellipticus</i> (Thunb.) H. Hara <i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton / <i>Camellia japonica</i> L. <i>Ilex rotunda</i> Thunb. / <i>Euonymus japonicus</i> Thunb. <i>Viburnum odoratissimum</i> Ker Gawl. ex Rümpler var. <i>awabuki</i> (K.Koch) Zabel <i>Quercus glauca</i> Thunb. / <i>Neolitsea sericea</i> (Blume) Koidz. <i>Ilex cornuta</i> Lindl. & Paxton <i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. ex Meisn. <i>Ternstroemia gymnanthera</i> (Wight & Arn.) Bedd.
Deciduous broad-leaved tree (15)	<i>Acer palmatum</i> Thunb. / <i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc. <i>Sorbus commixta</i> Hedl. / <i>Euscaphis japonica</i> (Thunb.) Kanitz <i>Melia azedarach</i> L. / <i>Magnolia kobus</i> DC. <i>Prunus serrulata</i> Lindl. f. <i>spontanea</i> (E.H.Wilson) Chin S.Chang <i>Lagerstroemia indica</i> L. <i>Sapium japonicum</i> (Siebold & Zucc.) Pax & Hoffm. <i>Cornus kousa</i> F.Buerger ex Miquel / <i>Ginkgo biloba</i> L. <i>Albizia julibrissin</i> Durazz. / <i>Rhododendron weyrichii</i> Maxim. <i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) C.Koch / <i>Celtis sinensis</i> Pers.



## 2) 연구범위

본 연구의 대상수종 분포에 대한 위치적 범위는 제주도 전역이고, 기후변화에 대한 시간적 범위는 21세기 전반기(2011~2030년), 중반기(2031~2060년), 하반기(2061~2100년)로 구분하였다.

## 2. 자료의 구축

### 1) 위치자료 (종속변수)

대상수종의 분포자료는 국립수목원에서 출간한 「한반도 관속식물 분포도 8.제주도야구」(NFA, 2010)를 통해서 도출하였다. 이는 1997년부터 2010년까지 전국 자연환경조사에서 수종별의 출현자료를 수집한 데이터를 기반으로 한 자료로서, 본 연구에서 필요한 대상수종의 표본 출현지점의 주소지와 좌표를 추출하고, 그 위치정보를 종속변수에 대한 입력 값으로 하여 종분포모형을 수행하였다(Table 5).

**Table 5.** Number of samples of dependent variable

Division NO.	Scientific name	Korean name	Number of samples
A	1 <i>Pinus thunbergii</i> Parl.	곰솔	14
	2 <i>Torreya nucifera</i> L. Siebold & Zucc.	비자나무	6
	3 <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	소나무	1
	4 <i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.	주목	5
	5 <i>Platycladus orientalis</i> L.	측백나무	2
	6 <i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl.	편백나무	12
	7 <i>Juniperus chinensis</i> L.	향나무	3
B	8 <i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss.	까마귀쪽나무	16
	9 <i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	굴거리나무	5
	10 <i>Cinnamomum camphora</i> L. J. Presl	녹나무	1
	11 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> var. <i>ellipticus</i> (Thunb.) H. Hara	담팔수	1
	12 <i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton	돈나무	8
	13 <i>Camellia japonica</i> L.	동백나무	9
	14 <i>Ilex rotunda</i> Thunb.	먼나무	2
	15 <i>Euonymus japonicus</i> Thunb.	사철나무	12
	16 <i>Viburnum odoratissimum</i> Ker Gawl. ex Rümpler var. <i>awabuki</i> (K.Koch) Zabel	아왜나무	7
	17 <i>Quercus glauca</i> Thunb.	종가시나무	6
	18 <i>Neolitsea sericea</i> (Blume) Koidz.	참식나무	11
	19 <i>Ilex cornuta</i> Lindl. & Paxton	호랑가시나무	2
	20 <i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. ex Meisn.	후박나무	8
	21 <i>Ternstroemia gymnanthera</i> (Wight & Arn.) Bedd.	후피향나무	1
C	22 <i>Acer palmatum</i> Thunb.	단풍나무	9
	23 <i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc.	매죽나무	14
	24 <i>Sorbus commixta</i> Hedl.	마가목	5
	25 <i>Euscaphis japonica</i> (Thunb.) Kanitz	말오줌매	11
	26 <i>Melia azedarach</i> L.	멀구슬나무	10
	27 <i>Magnolia kobus</i> DC.	목련	1
	28 <i>Prunus serrulata</i> Lindl. f. <i>spontanea</i> (E.H.Wilson) Chin S.Chang	벚나무	3
	29 <i>Lagerstroemia indica</i> L.	배롱나무	2
	30 <i>Sapium japonicum</i> (Siebold & Zucc.) Pax & Hoffm.	사람주나무	8
	31 <i>Cornus kousa</i> F.Buerger ex Miquel	산딸나무	9
	32 <i>Ginkgo biloba</i> L.	은행나무	1
	33 <i>Albizia julibrissin</i> Durazz.	자귀나무	11
	34 <i>Rhododendron weyrichii</i> Maxim.	참꽃나무	8
	35 <i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) C.Koch	팔배나무	6
	36 <i>Celtis sinensis</i> Pers.	팽나무	3

A : Narrow leaved evergreen tree, B : Broad-leaved evergreen tree, C : Deciduous broad-leaved tree

## 2) 기후자료 (환경변수)

기후변화 시나리오는 온실가스, 에어로졸, 토지이용 변화 등 인위적인 원인으로 발생한 복사강제력 변화를 지구시스템 모델에 적용하여 산출한 미래의 기후 전망정보(기온, 강수량, 습도 등)이다. 미래에 기후변화로 인한 영향을 평가하고 피해를 최소화하는데 활용할 수 있는 선제적인 정보로 활용되며, 한반도 지역별 상세 기후변화 전망은 지자체별 기후변화 대응과 적응대책 수립을 위한 필수적인 정보이다. 본 연구에서는 미래의 기후적합지에 대한 예측을 위하여 2가지의 서로 다른 RCP 시나리오에 따른 미래의 분포 변화를 비교하였다. RCP 4.5는 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 경우, 그리고 RCP 8.5는 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정한 기후변화 시나리오이다. 2011~2030년 데이터의 평균을 도출하여 21세기 전반기로 설정하였으며, 각각의 시나리오별로 중반기 2031~2060 (2040s), 후반기 2061~2100 (2080s)을 비교하였다.

생물기후인자는 Worldclim에서 제공하는 Bioclimatic variables (Bioclim)의 19가지 기후변수 데이터세트 중에서 식생의 생육과 생존에 주요한 영향을 주는 변수로 연간 평균기온(Bio1), 연간 강수량(Bio12), 가장 따뜻한 달의 최고기온(Bio5), 가장 추운달의 최저기온(Bio6)을 선정하였다. 이를 위하여 기상청의 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)에서 남한 상세 기후변화 양상블시나리오(제어적분 200년, 기후모델: HadGEM3-RA, 해상도 1 km)를 제공받아 Bioclim의 4가지 변수들을 도출하였다(Table 6).

**Table 6.** Bioclim's four environmental variables

Code	Variable	Contents
Bio1	Annual temperature (°C)	Related to the temperature index, which represents the calorie index of the plant growth period
Bio5	Max temperature of warmest period (°C)	Temperature upper limit index that influences plant survival
Bio6	Min temperature of coldest period (°C)	Temperature lower limit index that influences plant survival
Bio12	Annual precipitation (mm)	Related to the supply of moisture for growth

### 3. 연구방법

본 연구에서는 대상수종의 기후적합성을 예측하기 위해 미국자연사 박물관 American Museum of Natural History (AMNH)에서 제공하는 모형 중 MaxEnt의 3.4.1 버전을 다운받아 사용하였다. MaxEnt 모형의 구동을 위한 종속변수자료는 위도, 경도가 포함된 CSV 형식의 출현자료가 필요하며, 독립변수자료는 지리적 범위 및 공간해상도를 동일하게 맞춘 ascii 형식의 격자형 자료가 필요하다(Cho et al., 2020). 분포모형은 매 구동시마다 다른 결과를 출력할 수 있기 때문에 전반적으로 고른 값을 갖는지를 검토하기 위하여 교차검증 (5 folder cross-validation)을 수행하였다(Kim, 2017).

준비된 자료를 입력하여 MaxEnt모형을 구동하면 종분포 예측에 관한 여러 개의 결과물 파일이 생성된다. 생성된 파일은 사용목적에 따라 다양하게 활용할 수 있는데 예측을 위한 대상지역에 투영시켜 볼 수 있도록 QGIS 3.16 프로그램을 활용하여 지도화 작업을 수행하였다. QGIS는 Free and Open Source Software (FOSS)를 기반으로 만든 전문 GIS 애플리케이션으로 General Public License (GNU) 하에서 제공되는 사용자 친화적 오픈 소스이며, 수많은 벡터, 래스터, 데이터베이스 포맷과 기능을 지원하고 있다(QGIS, 2021).

모형의 정확도는 Receiver Operating Characteristic (ROC)의 Area Under Cover (AUC) 값을 통해 측정하였으며, AUC값은 모형의 적합 정도에 따라 0.5에서 1.0을 나타내며, 이는 다시 실제 값과 예측된 값의 오차 합이 최소가 되도록 하는 기준 값을 설정하여 예측 분포도를 작성하였다(Kwon et al., 2012).

## V. 연구결과 및 고찰

### 1. 수종별 개별모형의 평가

일반적으로 모형의 정확도를 측정하는 AUC값은 1.0에 가까울수록 예측도가 높다고 볼 수 있으나, 상대적으로 넓은 지역에 분포하는 수종이 넓은 환경변수 범위를 갖기 때문에 AUC값이 상대적으로 낮는데 반하여, 국지적으로 분포하는 수종의 경우 생육에 맞는 좁은 범위의 변수에 반응하기 때문에 모형의 적합도에서 높은 값을 나타낸다(Kwon et al., 2012). 본 연구에서는 36개의 수종에 대해 5번 반복으로 구동한 모형에서 ROC값이 0.6~1.0 사이의 수치를 나타낸 모형을 대상으로 제주도내 미래의 기후적합 지역에 대한 변화 예측을 평가하였다(Table 7).

대상수종의 분포에 관여하는 환경변수의 영향력은 MaxEnt의 알고리즘에 의한 순열의 중요성 평가를 통해서 분석하였다. 모형결과에 따르면 최저기온(Bio6)과 연강수량(Bio12)이 기후적합지 모형에 가장 큰 영향을 주고 있으며, 평균기온(Bio1)과 최고기온(Bio5) 순으로 영향력을 보여주고 있다. RCP 8.5에서는 최저기온과 연강수량에, RCP 4.5에서는 최저기온과 연강수량, 최고기온의 영향을 고루 받는 경향을 나타냈다. 그러나 그 변화패턴은 일정하지 않아 시나리오에 따른 구분은 유의미하지 않음을 알 수 있다. 반면에 수종별 구분에서는 유의미성을 나타내었다. 상록침엽수는 최저기온과 최고기온, 상록활엽수는 연강수량과 최저기온, 낙엽활엽수는 최저기온에서 높은 수치를 나타내어 각 환경변수가 수종에 따라 기후적합지 예측결과에 얼마만큼의 영향을 주고 있는지 파악할 수 있었다.

**Table 7.** ROC value of target species

Division	NO.	Scientific name	Korean name	AUC mean value
A	1	<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	곰솔	0.639
	2	<i>Torreya nucifera</i> L. Siebold & Zucc.	비자나무	0.647
	3	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	소나무	0.998
	4	<i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.	주목	0.914
	5	<i>Juniperus chinensis</i> L.	향나무	0.653
B	6	<i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss.	까마귀쪽나무	0.728
	7	<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	굴거리나무	0.926
	8	<i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton	돈나무	0.787
	9	<i>Viburnum odoratissimum</i> Ker Gawl. ex Rümpler var. <i>awabuki</i> (K.Koch) Zabel	아왜나무	0.616
	10	<i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. ex Meisn.	후박나무	0.700
C	11	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	단풍나무	0.753
	12	<i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc.	매죽나무	0.740
	13	<i>Sorbus commixta</i> Hedl.	마가목	0.940
	14	<i>Prunus serrulata</i> Lindl. f. <i>spontanea</i> (E.H.Wilson) Chin S.Chang	벚나무	0.749
	15	<i>Sapium japonicum</i> (Siebold & Zucc.) Pax & Hoffm.	사람주나무	0.789
	16	<i>Cornus kousa</i> F.Buerger ex Miquel	산딸나무	0.802
	17	<i>Rhododendron weyrichii</i> Maxim.	참꽃나무	0.843
	18	<i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) C.Koch	팔배나무	0.758

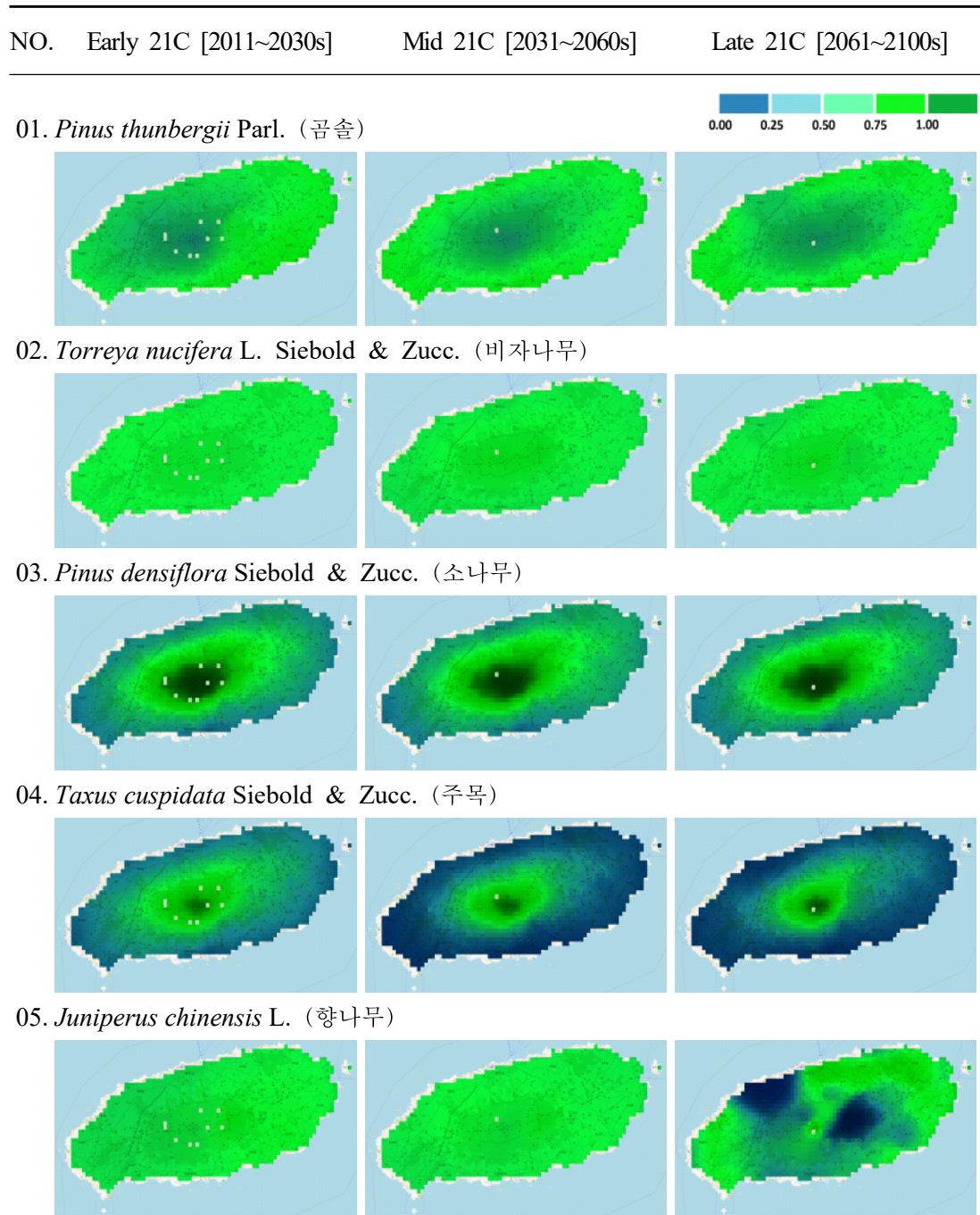
A : Narrow leaved evergreen tree, B : Broad-leaved evergreen tree, C : Deciduous broad-leaved tree

## 2. 기후적합지역의 변화예측

기후변화 시나리오는 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP 8.5를 적용하여 대상수목의 기후적합지역에 대한 변화를 예측하고 분석하였다.

### 1) 상록침엽수 (곰솔, 비자나무, 소나무, 주목, 향나무)

MaxEnt 모형을 통해 구축한 기후적합성에 대한 모델링 결과 곰솔과 비자나무, 향나무는 제주전역에 걸쳐 적합성을 띄는 것으로 나타났고, 소나무, 주목은 중산간 이상의 지역에 한정되었다. 2100년 까지 전반적으로 기후적합지역의 면적은 감소될 것으로 보이는 한편, 비자나무는 변화가 미비하고 향나무는 후반기(2061~2100년)에 국지적으로 확연한 변화가 예상된다(Fig. 1).



**Fig. 1.** Changes in climate-appropriate areas of narrow leaved evergreen trees from RCP Scenario 8.5

2) 상록활엽수 (까마귀쪽나무, 굴거리나무, 돈나무, 아왜나무, 후박나무)

상록활엽수 5개종의 기후적합지역은 21세기 중반기인 2031~2060년까지 유지될

것으로 보이나, 21세기 후반기인 2061~2100년에 눈에 띄는 변화를 나타내며 그 면적이 축소될 것으로 보인다. 굴거리나무는 해안지역에서 점차 더욱 적합하지 않을 것으로 예상되며, 까마귀쪽나무와 돈나무에서도 그러한 경향이 국지적으로 나타나고 있다(Fig. 2).

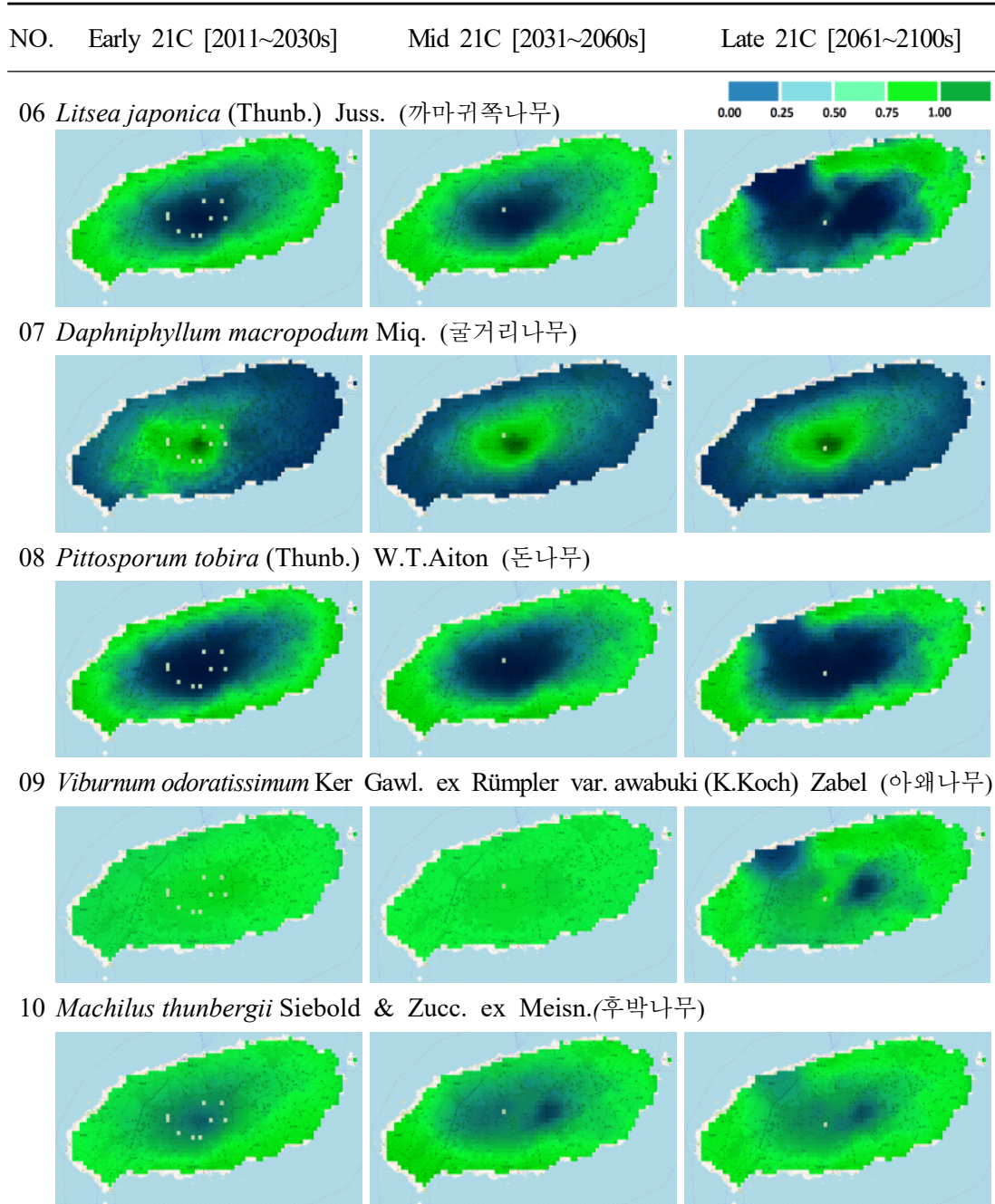


Fig. 2. Changes in climate-appropriate areas of broad-leaved evergreen trees from RCP Scenario 8.5



3) 낙엽활엽수 (단풍나무, 때죽나무, 마가목, 벚나무, 사릅나무, 산딸나무, 참꽃나무, 팔배나무)

제주도에서는 해발고가 높아질수록 온대낙엽활엽수들이 이미 많이 진출해있었고, 기후변화에 따라 낙엽활엽수 8종의 기후적합지역의 변화율도 전반적으로 미비한 것으로 나타났다. 때죽나무와 산딸나무, 참꽃나무는 21세기 중반기와 후반기에 점차 중산간 이상의 지역에서 적합할 것으로 예측되었고, 마가목의 기후적합지는 더욱 줄어드는 경향을 보이며 해안가와 중산간에서의 분포가 부적합한 것으로 예측되었다(Fig. 3).

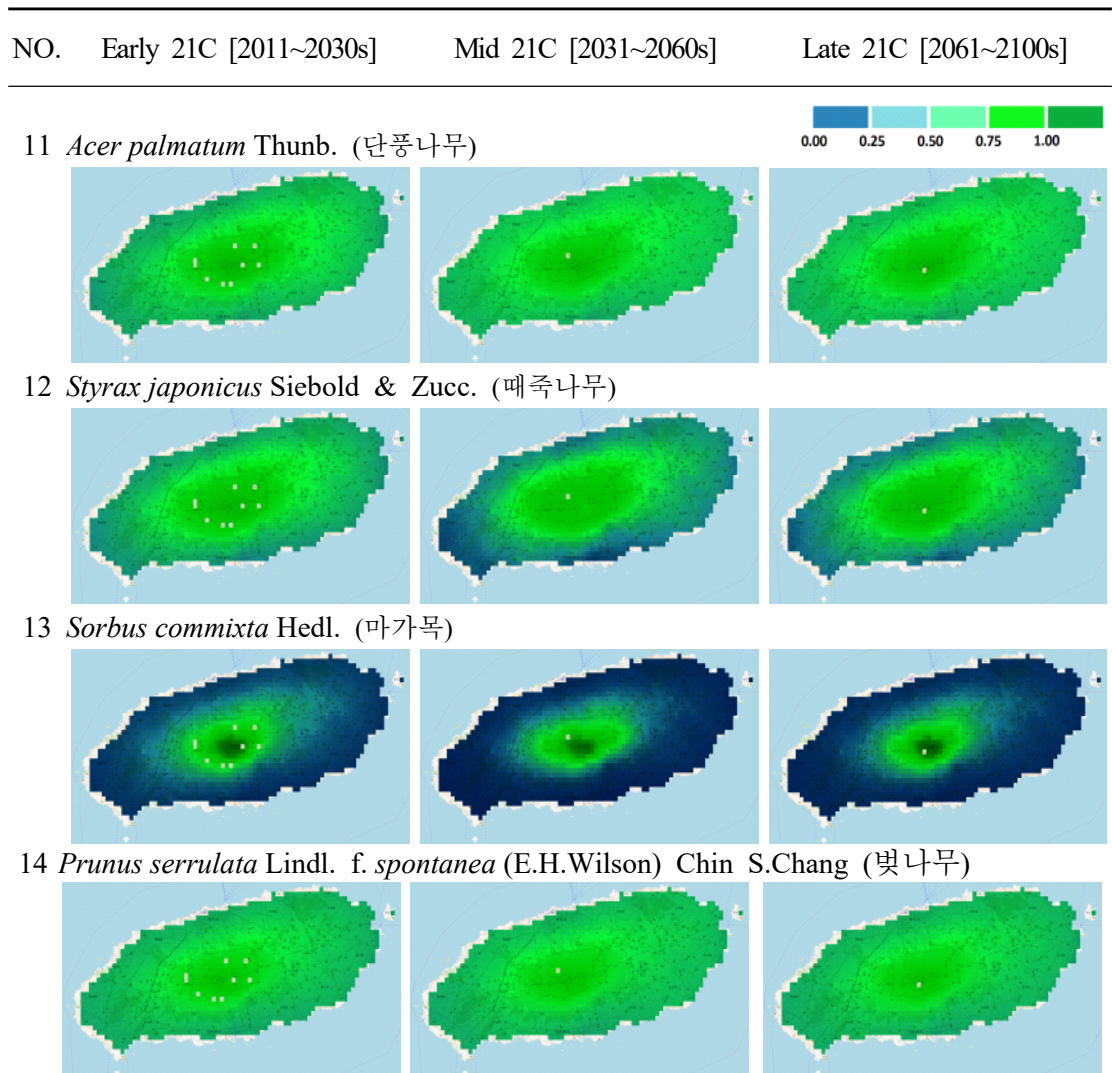


Fig. 3. Changes in climate-suitable areas of deciduous broad-leaved trees from RCP scenario 8.5(Continued)

NO. Early 21C [2011~2030s] Mid 21C [2031~2060s] Late 21C [2061~2100s]

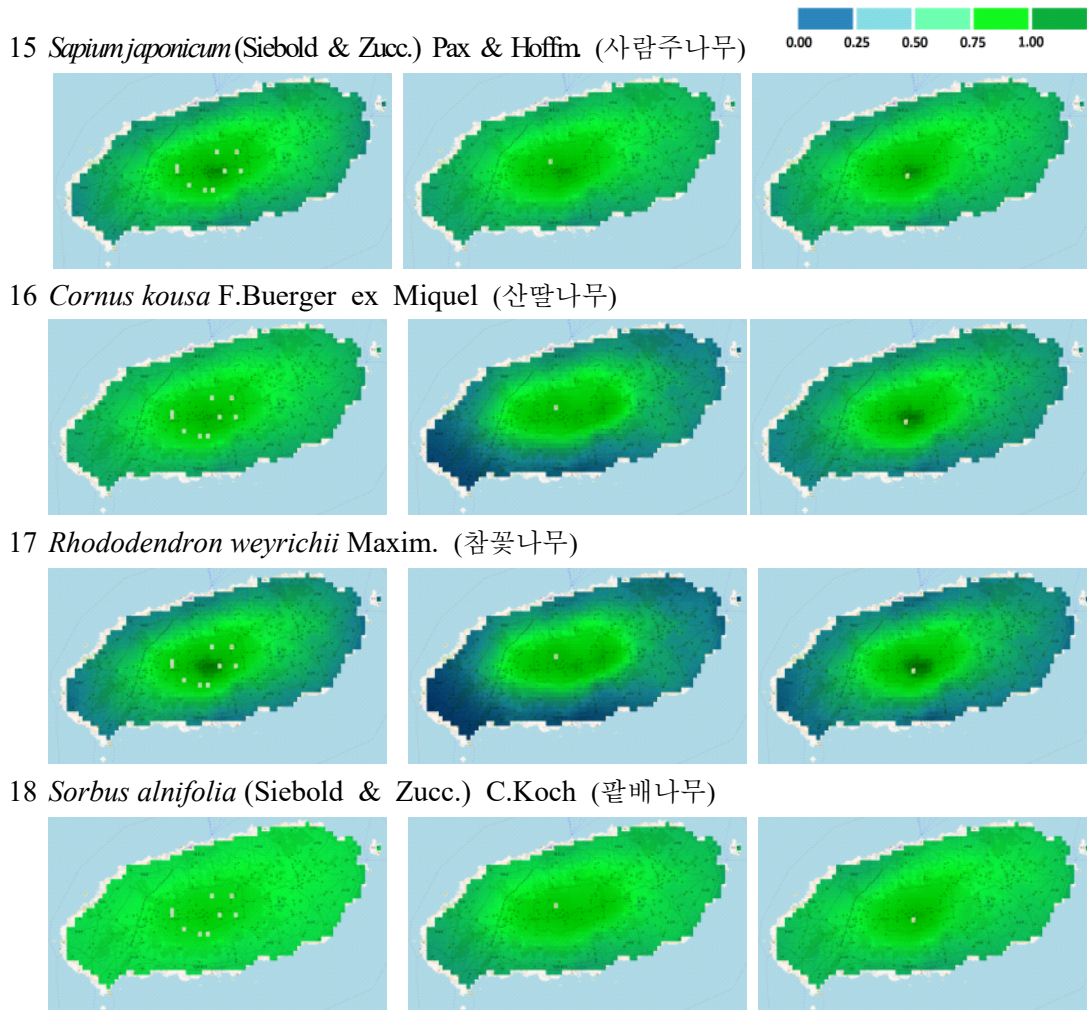


Fig. 3. Changes in climate-suitable areas of deciduous broad-leaved trees from RCP scenario 8.5

### 3. 기후변화전망과 연관성 분석

기상청에서 발간한 보고서 「제주특별자치도 기후변화 전망분석서」(KMA, 2018)는 전국 지방자치단체별 기후변화 적응대책 수립을 위해 작성된 것으로 RCP 4종 시나리오 기반의 전망정보를 한 번에 볼 수 있도록 제공하고 있다. 관측자료는 해발고도가 높은 일부 산악지역을 제외한 대부분의 지역을 고루 포함하고, 1 km 해상도의 격자자료를 평균하여 행정구역별 자료를 생산하였다고 되

어있으며, 기후변화시나리오 또한 본 연구에서 적용한 기준과 동일한 RCP 시나리오를 사용하였다. 기후변화에 대한 자료의 산출방법은 다르지만 「제주특별자치도 기후변화 전망분석서」(KMA, 2018)를 통하여 제주도의 연평균기온, 연평균 일최고기온, 연평균 일최저기온, 연강수량에 대한 전망을 살펴봄으로써 각 환경변수들의 변화와 대상수종의 기후적합지 결과와의 연관성을 알아보았다.

### 1) 연평균기온

현재 제주도 연평균기온 (14.4℃)은 우리나라 평균 (12.8℃)보다 1.6℃ 높으나, RCP 8.5에서 제주도의 미래(2071~2100년) 연평균기온 상승정도 (+3.8℃)는 우리나라 평균 상승폭보다 0.3℃ 작을 것으로 전망된다. 제주도 내 지역별 연평균기온의 변화량은 최고 0.7℃로 차이가 크다(Table 8).

**Table 8.** Annual average temperature forecast \_Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island)

Area	2001~2010s	2071~2100s	Gap
South Korea	12.8℃	16.9℃	4.1℃ ↑
Jeju Island	14.4℃	18.2℃	3.8℃ ↑

온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 RCP 4.5에서 제주도의 연평균기온은 현재 대비 21세기 중반기에 1.6℃, 후반기에 2.0℃ 상승할 것으로 전망되고, 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 RCP 8.5에서 제주도의 연평균기온은 현재 대비 21세기 중반기에 2.1℃, 후반기에 3.8℃ 상승할 것으로 전망된다(Table 9).

**Table 9.** Annual average temperature forecast \_Rise compared to present (Jeju Island)

Scenario	Mid 21C	Late 21C	Gap
RCP 4.5	1.6℃ ↑	2.0℃ ↑	0.4℃
RCP 8.5	2.1℃ ↑	3.8℃ ↑	1.8℃

제주도는 전지역이 21세기 전반기부터 모든 시나리오에서 아열대 기후에 속하고 있는데, 트레와다(Trewartha) 기후구분 기준에서 월평균기온이 10℃ 이상인 달이 8개월 이상, 가장 추운달의 평균기온이 18℃ 이하인 경우 아열대 기후구로 정의한다.

2) 연평균 일최고기온

현재 제주도 연평균 일최고기온 (18.1℃)은 우리나라 평균 (18.3℃)보다 0.2℃ 낮으며, RCP 8.5에서 제주도의 미래 (2071~2100년) 연평균 일최고기온 상승 정도 (+3.9℃)는 우리나라 평균 상승폭보다 0.4℃ 작을 것으로 전망된다. 제주도내 지역별 연평균 일최고기온의 변화량의 차이는 크지 않다(Table 10).

**Table 10.** Maximum daily temperature forecast \_Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island)

Area	2001~2010s	2071~2100s	Gap
South Korea	18.3℃	22.6℃	4.3℃ ↑
Jeju Island	18.1℃	22.0℃	3.9℃ ↑

온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 RCP 4.5에서 제주도의 연평균 일최고기온은 현재 대비 21세기 중반기에 1.6℃, 후반기에 2.0℃ 상승할 것으로 전망되며, 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 RCP 8.5에서 제주도의 연평균 일최고기온은 현재 대비 21세기 중반기에 2.1℃, 후반기에 3.9℃ 상승할 것으로 전망된다(Table 11).

**Table 11.** Maximum daily temperature forecast \_Rise compared to present (Jeju Island)

Scenario	Mid 21C	Late 21C	Gap
RCP 4.5	1.6℃ ↑	2.0℃ ↑	0.4℃
RCP 8.5	2.1℃ ↑	3.9℃ ↑	1.8℃

3) 연평균 일최저기온

현재 제주도연평균 일최저기온(11.0℃)은 우리나라 평균(8.1℃)보다 2.9℃ 높으며, RCP 8.5에서 제주도의 미래(2071~2100년) 연평균 일최저기온 상승 정도(+3.8℃)는 우리나라 평균 상승폭보다 0.1℃ 작을 것으로 전망된다. 제주도내 지역별 연평균 일최저기온의 변화량의 차이는 크다(Table 12).

**Table 12.** Minimum daily temperature forecast \_Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island)

Area	2001~2010s	2071~2100s	Gap
South Korea	8.1℃	12.0℃	3.9℃ ↑
Jeju Island	11.0℃	14.8℃	3.8℃ ↑

온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 RCP 4.5에서 제주도의 연평균 일최저 기온은 현재 대비 21세기 중반기에 1.6°C, 후반기에 2.0°C 상승할 것으로 전망되며, 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 RCP 8.5에서 제주도의 연평균 일최저기온은 현재 대비 21세기 중반기에 2.0°C, 후반기에 3.8°C 상승할 것으로 전망된다(Table 13).

**Table 13.** Minimum daily temperature forecast \_Rise compared to present (Jeju Island)

Scenario	Mid 21C	Late 21C	Gap
RCP 4.5	1.6°C ↑	2.0°C ↑	0.4°C
RCP 8.5	2.0°C ↑	3.8°C ↑	1.8°C

#### 4) 연강수량

현재 제주도의 연강수량(2,168.9 mm)은 우리나라 평균(1,358.5 mm)보다 많으며, RCP 8.5에서 제주도의 미래(2071-2100년) 연강수량 변화율(+12.0%)은 우리나라 평균(+9.0%)에 비해 증가폭이 클 것으로 전망된다. 지역별로 살펴보면, 대륜동에서 강수량 증가율(+38.0%)이 가장 크고 아라동에서 강수량 감소율(-3.0%)이 가장 클 것으로 나타나며, 그 차이는 41.0%이다(Table 14).

**Table 14.** Annual precipitation forecast \_Based on RCP 8.5 scenario (Jeju Island)

Area	2001~2010s	2071~2100s	Gap
South Korea	1,358.5 mm	1,480.2 mm	9.0% ↑
Jeju Island	2,168.9 mm	2,429.2 mm	12.0% ↑

온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 RCP 4.5에서 제주도의 연강수량은 현재 대비 21세기 중반기에 3.1% 감소하고, 후반기에 2.0% 증가할 것으로 전망되며, 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 RCP 8.5에서 제주도의 연강수량은 현재 대비 21세기 중반기에 4.3% 감소하고, 후반기에 12.0% 증가할 것으로 전망된다(Table 15).

**Table 15.** Annual precipitation forecast \_Rise compared to present (Jeju Island)

Scenario	Mid 21C	Late 21C	Gap
RCP 4.5	3.1% ↓	2.0% ↑	5.1%
RCP 8.5	4.3% ↓	12.0% ↑	16.3%

한라산이 중심에 위치하여 다양한 기후대가 나타나는 제주도에서 미래기온상승 정도는 해발고도에 따라 세분화 되고 상세 기후지역마다 상이하게 나타날 것으로 전망된다. 중심부에 위치한 산간지역과 해안지역의 기온차이가 크게 나타나고 고도가 높은 산간 북부와 남부의 기온이 낮고 해안으로 갈수록 기온이 높아지는데, 특히 남쪽해안에 위치한 송산동, 정방동, 중앙동, 천지동 등이 기온이 높게 나타난다. 최저기온은 평균기온이나 최고기온과는 달리 해안지역보다는 중산간과 산간지역으로 갈수록 기온상승 전망치가 더 높은 특징을 보인다(KMA, 2018).

RCP 8.5에 따르면 21세기 후반기 (2071-2100년)에 제주도의 강수량은 현재 대비 증가할 것으로 전망되는데 전체적으로 기온분포와 비슷하게 산간에서 많고 해안으로 갈수록 적으며, 서쪽 해안에서 가장 적게 나타난다. 21세기 후반기 (2071~2100년)에는 제주도의 대부분의 지역에서 강수량이 증가하고, 서귀포시 대륜동에서 강수량이 가장 많이 증가하는 것으로 나타난다(부록. 제주도 기후변화 전망분포도).

기후변화시나리오(RCP 8.5 기준)에 따르면 제주도는 우리나라의 다른 지역보다 강수량, 폭염일수, 열대야일수, 강수강도, 호우일수 등의 기후변화지표가 높게 나타나는 것으로 조사되었으며, 상대적으로 다른 타 지역에 비해 낮게 나타나는 기후변화지표는 여름일수와 서리일수, 결빙일수, 한파일수 등으로 결과적으로 제주지역은 극한기후지표에 대한 변화가 다른 지역에 비해 클 것으로 나타났다(KMA, 2018).

#### 4. 바람의 영향을 고려한 적합수종 선정

바람은 식물의 증산작용을 돕고, 이산화탄소를 공급해 주는 등 식물에게 긍정적으로 작용하는 반면, 나무를 부러뜨리거나 뿌리 채 넘기고, 가지를 부러뜨리는 피해를 입히기도 한다(Han et al., 2019). 바람에 의해 나타나는 물리적, 생리적 피해를 풍해라고 하는데, 강하고 지속적인 바람은 증산작용을 촉진시키며 줄기 기형, 기공 폐쇄, 잎의 손상, 토양침식 등으로 정상적인 수목의 성장을 방해한다. 풍속이 증가하면 대체로 증산량이 증가하는데 수종에 따라 증산정도가 다르므로 바람이 많이 부는 지역은 수목의 특성에 맞게 식재해야 한다(Joo, 2021).

제주도는 계절에 따라 강풍 및 태풍에 의한 피해가 자주 발생하고 지역과 고도에 따라서도 강풍이 빈번하게 불기 때문에 조경수목을 계획할 때 바람에 대한 고려는 필수적이다. 잔뿌리가 발달하고 뿌리의 인장강도가 높은 내풍성이 강한 심근성 수종으로 식재해야 피해를 줄일 수 있다. 내풍성이란, 강풍에 견디는 능력으로 심근성, 천근성 수종과 교목, 관목의 여부 및 낙엽수, 상록수를 가지고 상대적으로 평가한다(Kang et al., 2011). 심근성 뿌리, 작은 수관, 짧고 굵은 가지, 작은 잎 등은 내풍성 형질을 가진 수목의 특성이다. 천근성 수종은 심근성 수종에 비해 바람에 쓰러지기 쉽고, 성장속도가 빠른 수종은 성장 속도가 늦은 수종에 비해 재질이 약하므로 바람에 줄기와 가지가 잘 부러진다(Kim, 2011; Table 16, 17). 이와 같이 조경수종의 내풍성 및 뿌리의 형질적 특성을 파악하여 식재 적합성을 판단하는 과정을 통해 식재계획이 이루어진다면 풍해로 인한 상당량의 수목피해는 줄일 수 있을 것이다.

**Table 16.** Tree roots and wind resistance

Division		Species
Deep rooted	Narrow leaved evergreen tree	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc. / <i>Pinus thunbergii</i> Parl. <i>Torreya nucifera</i> L. Siebold & Zucc. <i>Abies holophylla</i> Maxim. / <i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.
	Broad-leaved evergreen tree	<i>Cinnamomum yabunikkei</i> H.Ohba / <i>Myrica rubra</i> (Lour.) Siebold & Zucc. <i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq. <i>Osmanthus fragrans</i> var. <i>aurantiacus</i> Makino <i>Camellia japonica</i> L. / <i>Ilex cornuta</i> Lindl. & Paxton <i>Cinnamomum camphora</i> L. J. Presl / <i>Castanopsis sieboldii</i> (Makino) Hatus. <i>Neolitsea sericea</i> (Blume) Koidz. / <i>Magnolia grandiflora</i> L. <i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. ex Meisn.
	Deciduous broad-leaved tree	<i>Quercus</i> $\chi$ / <i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino <i>Liriodendron tulipifera</i> L. / <i>Firmiana simplex</i> L. W.F.Wight <i>Aesculus turbinata</i> Blume / <i>Celtis sinensis</i> Pers. / <i>Juglans regia</i> Dode <i>Styphnolobium japonicum</i> L. <i>Acer palmatum</i> Thunb. <i>Pseudocydonia sinensis</i> (Thouin) C.K.Schneid. <i>Sorbus commixta</i> Hedl. / <i>Magnolia kobus</i> DC. / <i>Ginkgo biloba</i> L. <i>Prunus verecunda</i> var. <i>pendula</i> (Nakai) W.T.Lee
Shallow rooted	Narrow leaved evergreen tree	<i>Picea jezoensis</i> (Siebold & Zucc.) Carrière <i>Picea abies</i> L. H.Karst. / <i>Tsuga sieboldii</i> Carrière <i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carrière / <i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl. <i>Taxus caespitosa</i> Nakai / <i>Juniperus chinensis</i> L.
	Deciduous broad-leaved tree	<i>Populus deltoides</i> Marsh. / <i>Populus nigra</i> var. <i>italica</i> Koehne <i>Populus maximowiczii</i> A.Henry / <i>Robinia pseudoacacia</i> L. <i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i> (Miq.) H. Hara <i>Prunus mume</i> (Siebold) Siebold & Zucc. <i>Populus davidiana</i> Dode / <i>Populus tomentiglandulosa</i> T.B.Lee <i>Cedrus deodara</i> (Roxb. ex D.Don) G.Don / <i>Juniperus rigida</i> Siebold & Zucc.

**Table 17.** Tree species with strong flame resistance and composition resistance

Division		Species
Evergreen tree		<i>Cinnamomum camphora</i> L. J. Presl / <i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. ex Meisn. <i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume / <i>Castanopsis sieboldii</i> (Makino) Hatus. <i>Actinodaphne lancifolia</i> (Siebold & Zucc.) Meisn. <i>Ilex integra</i> Thunb. / <i>Cinnamomum yabunikkei</i> H.Ohba <i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton / <i>Ternstroemia gymnanthera</i> (Wight & Arn.) Bedd. <i>Ficus erecta</i> Thunb. / <i>Ilex rotunda</i> Thunb. / <i>Neolitsea sericea</i> (Blume) Koidz. <i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss. / <i>Camellia japonica</i> L.
	Deciduous tree	<i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) C.Koch / <i>Cornus walteri</i> F.T.Wangerin <i>Cornus macrophylla</i> Wall. / <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm. <i>Chionanthus retusus</i> Lindl. & Paxton / <i>Albizia julibrissin</i> Durazz. <i>Lindera obtusiloba</i> Blume / <i>Mallotus japonicus</i> (L.f.) Müll.Arg. <i>Aphananthe aspera</i> (Thunb.) Planch. / <i>Celtis sinensis</i> Pers. <i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino / <i>Quercus serrata</i> Thunb. ex Murray <i>Quercus variabilis</i> Blume / <i>Platycarya strobilacea</i> Siebold & Zucc. <i>Carpinus laxiflora</i> (Siebold & Zucc.) Blume / <i>Meliosma oldhamii</i> Maxim. <i>Carpinus tschonoskii</i> Maxim. / <i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i> (Maxim.) Ohashi <i>Prunus sargentii</i> Rehder / <i>Ilex macropoda</i> Miq. <i>Euscaphis japonica</i> (Thunb.) Kanitz / <i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc. <i>Rhamnus davurica</i> Pall. / <i>Acer buergerianum</i> Miq. / <i>Fraxinus sieboldiana</i> Blume <i>Euonymus hamiltonianus</i> Wall.



## 5. 결과 종합

### 1) 상록침엽수 (곰솔, 비자나무, 소나무, 주목, 향나무)

RCP 4.5와 8.5 모두에서 2100년까지 곰솔, 비자나무, 소나무 3개 수종의 기후적합지 면적은 다소 확장되거나 유지될 것으로, 주목은 RCP 8.5에서 점차 축소될 것으로 나타났다. 향나무의 경우 21세기 중반기인 2031~2060년에는 기후적합지가 확장 또는 유지되다가 후반기인 2061~2100년에는 축소될 것으로 예상되며, 소나무, 주목의 적합지는 중산간 이상에서 점차 고지대쪽으로 분포할 것으로 보인다. 상록침엽수 중 주목을 제외한 대상수종의 뿌리형질이 심근성인 수종이며, 내풍성이 강한 것으로 조사됨에 따라 제주도에서 향후 바람을 고려한 적합수종을 선정할 때 적극적으로 도입이 가능할 것으로 보인다. 그 중 주목의 내풍성이 강하지 않은 점과 향나무의 21세기 후반기에 기후적합지가 국지적으로 축소되는 경향이 있는 것은 고려할 점이다.

### 2) 상록활엽수 (까마귀쪽나무, 굴거리나무, 돈나무, 아왜나무, 후박나무)

RCP 4.5와 8.5에서 5개의 상록활엽수종 모두 적합지역이 확장 또는 유지되는 경향을 보임에 따라 식재가능범위가 확대되고 현재 제주에서 식재되어 생육중인 해당 수목들의 생육여건은 더 나은 여건으로 변화할 것으로 보이나, 21세기 후반기인 2061~2100년에는 적합한 기후환경을 갖추더라도 한파와 같은 극한기후로 인해 동해 피해에 취약한 상록활엽수종의 생육특성(Jung et al., 2014)을 고려하면 식재 가능범위는 증가하더라도 동해예방과 같은 유지관리의 노력은 미래에도 지속적으로 요구될 것으로 판단된다. 까마귀쪽나무와 돈나무의 21세기 후반기 기후적합지 변화는 서북 해안지역 애월읍, 외도동에서의 기후변화패턴과 비슷한 양상을 띠고 있는데 이 지역은 제주도에서 연평균 최저, 최고기온의 편차가 상대적으로 두드러지게 나타나는 곳이다(부록. 제주도 기후변화 전망분포도). 상록활엽수종 까마귀쪽나무, 돈나무, 아왜나무는 천근성 뿌리형질임에도 내풍성은 강한 것으로 알려져 있어, 제주도에서 향후 바람을 고려한 적합수종 선정시 2031~2060년에 대부분의 수종이 활용이 가능하나, 2061년 이후에 까마귀쪽나무, 돈나무, 아왜나무는 국지적으로 부적합 또는 고려대상임을 나타내고 있다.

3) 낙엽활엽수 (단풍나무, 때죽나무, 마가목, 벚나무, 사람주나무, 산딸나무, 참꽃나무, 팔배나무)

RCP 4.5와 8.5에서 단풍나무, 벚나무, 사람주나무, 팔배나무는 제주도 전 지역에서 기후적합성을 나타내고 있다. 때죽나무, 마가목, 산딸나무, 참꽃나무는 중산간 이상의 지역에서 기후적합성을 띠고 있는데 RCP 8.5에서는 기후적합지가 다소 축소되다가 2061~2100년에 다시 유지될 것으로 예상된다. 낙엽활엽수 중 단풍나무, 사람주나무, 팔배나무는 기후변화에도 적응하며 유지될 것으로 보이며, 내풍성이 강한 수종으로 조사됨에 따라 제주도에 향후 바람을 고려한 적합수종을 선정할 때 적극적으로 도입이 가능할 것으로 보인다. 그러나 벚나무, 참꽃나무는 내풍성과의 관계를 교차로 분석한 결과 수종 선정 시 고려해야할 대상임을 보여준다.

이와 같이 MaxEnt 모형에 의해 도출된 대상수종별 기후적합성 결과를 분석하고, 바람의 영향을 고려한 수목의 뿌리형질 및 내풍성 여부를 조사함으로써 (KNHC, 1998; Kim, 2007; Kang et al., 2011; GBFER, 2021) 각 시나리오별로 제주도에 미래 적합한 수종을 선별하였다(Table 18).

**Table 18.** Prediction of climate suitability by target species

Species	RCP 4.5		RCP 8.5		Root trait	Wind Resistance	Future suitability considering wind		Etc.
	Mid 21C	Late 21C	Mid 21C	Late 21C			Mid 21C	Late 21C	
<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	Ex.	Ke.	Ex.	Ke.	Deep-rooted Dispersed	Strong	Suitable	Suitable	
<i>Torreya nucifera</i> L. Siebold & Zucc.	Ke.	Ke.	Ke.	Ke.	Deep-rooted Middle Type	Strong	Suitable	Suitable	
A <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	Ke.	Ke.	Ke.	Ke.	Deep-rooted Dispersed	Strong	Suitable	Suitable	
<i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.	Ke.	Ke.	Re.	Re.	Deep-rooted	Middle	Careful	Careful	
<i>Juniperus chinensis</i> L.	Ex.	Re.	Ke.	Re.	Middle-rooted	Strong	Suitable	Unsuitable	Local
<i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss.	Ke.	Re.	Ke.	Re.	Shallow-rooted	Strong	Careful	Unsuitable	Local
<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	Ex.	Ke.	Ex.	Ke.	Middle-rooted Middle Type	Middle	Suitable	Suitable	
B <i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton	Ke.	Re.	Ke.	Re.	Shallow-rooted	Strong	Suitable	Careful	
<i>Viburnum odoratissimum</i> Ker Gawl. ex Rümpler var. awabuki (K.Koch) Zabel	Ke.	Ke.	Ke.	Re.	Shallow-rooted Middle Type	Strong	Suitable	Careful	Local
<i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. ex Meisn.	Ke.	Ke.	Ke.	Ke.	Middle-rooted	Middle	Careful	Careful	
<i>Acer palmatum</i> Thunb.	Ke.	Ke.	Ke.	Ke.	Deep-rooted	Strong	Suitable	Suitable	
<i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc.	Ke.	Ke.	Re.	Ke.	Shallow-rooted Concentrated	Middle	Careful	Suitable	
<i>Sorbus commixta</i> Hedl.	Ke.	Ke.	Re.	Ke.	Deep-rooted Dispersed	Strong	Careful	Suitable	
<i>Prunus serrulata</i> Lindl. f. <i>spontanea</i> (E.H.Wilson) Chin S.Chang	Ke.	Ke.	Ke.	Ke.	Middle-rooted Middle Type	Middle	Careful	Careful	
C <i>Sapium japonicum</i> (Siebold & Zucc.) Pax & Hoffm.	Ke.	Ke.	Ke.	Ke.	Shallow-rooted Middle Type	Strong	Suitable	Suitable	
<i>Cornus kousa</i> F.Buerger ex Miquel	Ke.	Ke.	Re.	Ke.	Deep-rooted Dispersed	Strong	Careful	Suitable	
<i>Rhododendron weyrichii</i> Maxim.	Ke.	Ke.	Re.	Ke.	Shallow-rooted	Middle	Unsuitable	Careful	
<i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) C.Koch	Ke.	Ke.	Ke.	Ke.	Shallow-rooted Dispersed	Strong	Suitable	Suitable	

A: Narrow leaved evergreen tree, B: Broad-leaved evergreen tree, C: Deciduous broad-leaved tree

Ex.: Expansion, Ke.: Keep up, Re: Reduction

## 6. 연구의 한계 및 향후 발전 방향

본 연구에 사용된 대상수종의 분포자료는 국립수목원에서 1997년부터 2010년까지 전국자연환경조사에서 수집한 출현자료를 기반으로 도출하고 그 자생식물의 목록은 수집된 증거표본만을 바탕으로 작성되었기 때문에 그 분포가 확인되지 않은 표본에 대한 것은 본 연구의 한계를 나타낸다. 수목분포에 대하여 실증적으로 유의미하고 모델링에 적합한 데이터가 있다면 더욱 다양한 조경수목을 대상으로 기후적합성 모델을 도출할 수 있게 될 것이다. 또한 수목의 생존과 생육에 가장 많은 영향을 주는 요소 4개만을 환경변수로 선정하였으나 계절적 기온의 변동이나, 단기 강우량과 같은 변수 또한 수목의 성장별로 고려하여 적용한다면 더욱 정확한 예측에 도움이 될 것으로 판단된다.

현재까지는 수종별 식재 적합지역을 판단하기 위한 체계적인 기준이 없었으나, 대표적인 조경수목 총 18종, 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 따라 기후 적합성 및 바람에 영향에 대한 취약성에 대해 규명하였다. 이는 현재 식재되어있는 수목에 대해서는 효율적인 관리방향을 제안할 수 있을 것이고, 향후 식재할 수종을 선정함에 있어서는 합리적인 의사결정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

## VI. 결 론

한반도 내륙지방에 비하여 평균기온과 강수량이 높고, 강한 바람이 자주 부는 기후적 요인은 제주도의 생태계에도 큰 영향을 미치고 있기 때문에 조경수목을 계획할 때는 이 점에 주목하여 대상지의 기후변화에 대한 면밀한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 제주도에서 지속적인 생장 및 적응 가능한 조경수목을 제안하고 조경수목 관리와 계획분야를 위한 방안으로 향후 합리적인 수종을 선택하기 위하여 수행하였다.

제주도 내에 유입되어 분포하고 있는 조경수목의 현재 분포지점을 기반으로 기후변화시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 의한 미래의 기후적합성을 MaxEnt 모델을 사용하여 확인하였다. 대상 수종의 잠재 기후적합지는 연평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량을 가장 중요한 환경변수로 적용되었다. 제주도는 지형의 영향으로 인해 중심부의 고도가 높은 산간 북부와 남부의 기온이 낮고 해안으로 갈수록 기온이 높아지는데, 미래 기온상승의 정도는 해발고도에 따라 세분되는 상세 기후지역마다 상이하게 나타날 것으로 전망된다. 식물의 생존을 좌우하는 온도 하한 값의 지표인 최저기온은 해안지역보다는 중산간과 산간지역으로 갈수록 기온상승의 전망치가 더 높아지는 특징을 보였다. 기후변화시나리오 RCP 8.5 기준에 따르면 제주도는 우리나라의 다른 지역보다 강수량, 폭염일수, 열대야일수, 강수강도, 호우일수 등의 기후변화지표가 높게 나타나는 것으로 조사되었으며, 상대적으로 다른 지역에 비해 낮게 나타나는 기후변화지표는 여름일수와 서리일수, 결빙일수, 한파일수 인데 결과적으로 제주도는 극한기후지표에 대한 변화가 다른 지역에 비해 클 것으로 나타났다. 또한 지역별, 고도별 특성에 따라 강풍과 태풍이 빈번하게 발생한다는 특성이 있어 조경수목을 계획할 때 바람에 대한 고려는 필수적이기 때문에 이에 따라 MaxEnt 모형에 의해 도출된 대상 수종별 기후적합지 예측에 관한 결과물과 해당 수종 각각의 내풍성 여부를 조사하여 교차분석 하였다.

그 결과 상록침엽수 중 곱솔, 비자나무, 소나무는 미래에도 기후적합지 면적이

다소 확장되거나 유지될 것으로 나타났는데, 뿌리형질이 심근성이며 내풍성이 강하여 제주도에서 향후 바람을 고려한 적합수종을 선정할 때 적극적으로 도입이 가능할 것으로 보인다. 상록활엽수도 기후적합면적이 확장 또는 유지될 것으로 예측됨에 따라 식재가능범위가 확대되고 현재 제주에서 식재되어 생육중인 해당 수목들의 생육여건은 더 나은 여건으로 변화할 것으로 보인다. 그러나 21세기 후반기인 2061~2100년에 식재 가능범위는 증가하더라도 까마귀쪽나무, 돈나무, 아왜나무의 모형에서 국지적으로 부적합 또는 고려할 대상임을 나타냄에 따라 동해예방과 같은 유지관리의 노력은 미래에도 지속적으로 요구될 것으로 판단된다. 낙엽활엽수 중 단풍나무, 사람주나무, 팔배나무는 기후변화에도 적응하며 유지될 것으로 보이며, 내풍성이 강한 수종으로 조사됨에 따라 제주도에서 향후 바람을 고려한 적합수종을 선정할 때 적극적으로 도입이 가능할 것으로 보인다. 그러나 벗나무, 참꽃나무는 내풍성과의 관계를 교차로 분석한 결과 수종 선정 시 다양한 측면에서 고려해야할 대상임을 보여준다.

이와 같이 조경수목의 기후적합성 예측 및 평가의 결과물은 현재 식재된 수목에 대해서는 유지관리의 방향과 강도를 설정할 수 있으며, 식재계획의 단계에서는 지속적인 성장 및 적응 가능한 조경수목의 수종 선택에 있어서 유용한 자료가 될 것이다. 향토수종 중에서도 기후적합성이 장기적으로 양호한 여건에 놓이는 수종을 발굴하여 다양한 종을 포함한 식재계획을 수립한다면 기후변화에 대한 적응뿐 아니라 높은 종 다양성을 가진 도시생태계를 유지하는 것에도 기여할 수 있을 것이다. 수종마다 환경에 대한 적응력이 다르고, 생육과 생존에 결정적으로 작용하는 변수가 다르기 때문에 기후적합성만을 가지고는 국지적인 범위에서의 식재계획은 다소 어려울 수 있지만 지역적 스케일에서 중요한 환경필터로 작용하는 기후에 대한 수종별 적합범위를 규명하고자 했다는 점에서 본 연구의 의의가 있다.

## Ⅶ. 적 요

본 연구에서는 제주도 내에 유입되어 분포하고 있는 대표적인 조경수목의 현재 분포지점을 기반으로 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 의한 미래의 기후적합성을 MaxEnt 모델을 사용하여 확인하였다. 상록침엽수, 상록활엽수, 낙엽활엽수로 구분되는 주요 조경수목 가운데 대상 수종 18종의 미래 기후적합지역에 대한 결과와 바람의 영향이 큰 제주도의 기후적 특성을 고려하여 해당 수종 각각의 내풍성 여부를 조사하여 교차분석 하였다.

대상 수종 중 상록침엽수는 미래에도 기후적합지 면적이 다소 확장되거나 유지될 것으로 나타나며 대부분 뿌리형질이 심근성인 수종이며 내풍성이 강한 것으로 조사됨에 따라 제주도에서 향후 바람을 고려한 적합수종을 선정할 때 적극적으로 도입이 가능할 것으로 예측된다. 상록활엽수도 기후적합지역이 확장 또는 유지됨에 따라 식재가능한 범위가 확대되고 현재 제주에서 식재되어 생육중인 해당 수목들의 생육여건은 더 나은 여건으로 변화할 것으로 보인다. 그러나 국지적으로 부적합 또는 고려할 대상임을 나타내는 수종도 있어 동해예방과 같은 유지관리의 노력은 미래에도 지속적으로 요구될 것이다. 낙엽활엽수 역시 대체로 제주도의 기후변화에도 적응하며 유지될 것으로 나타났지만 바람을 고려한 적합수종을 선정할 때에 수종별 내풍성 여부를 확인한 후 도입이 가능할 것으로 판단된다.

현재까지는 제주도 내 수종별 식재 적합지역을 판단하기 위한 체계적인 기준과 방향이 없었으나, 대표적인 조경수목(18종)에 대하여 기후변화시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에 따라 기후적합성 및 바람에 의한 취약성 여부를 규명하고자 했다는 점에서 본 연구의 의의가 있다. 이는 현재 식재 되어있는 수목에 대해서는 효율적인 관리방향을 제안하고 향후 식재할 수종을 선정함에 있어서는 합리적인 의사결정을 하는 데에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 대상수종의 분포자료가 수집된 증거표본만을 바탕으로 작성되었기 때문에 그 분포가 확인되지 않은 표본에 대한 것은 본 연구의 한계성을 나타낸다. 더불어 수목의 생존과 생

육에 가장 많은 영향을 주는 4개 요소만을 환경변수로 선정하였으나 계절적 기온의 변동이나, 단기 강우량과 같은 변수 또한 수목의 성장별로 고려하여 적용한다면 더욱 정확한 예측에 도움이 될 것으로 판단된다.



## 인 용 문 헌

- Adhikari, P., Jeon, J.Y., Kim, H.W., Shin, M.S., Adhikari, P., Seo, C. 2019. Potential impact of climate change on plant invasion in the Republic of Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 43(1):1-12.
- Attorre, F., Alfò, M., De Sanctis, M., Francesconi, F., Valenti, R., Vitale, M., Bruno, F. 2011. Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula. *Applied Vegetation Science*, 14(2):242-255.
- Attorre, F., Alfò, M., De Sanctis, M., Francesconi, F., Valenti, R., Vitale, M., Bruno, F. 2011. Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula. *Applied Vegetation Science*, 14(2):242-255.
- Austin, M.P. 2002. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157(2-3):101-118.
- Berry, P.M., Dawson, T.P., Harrison, P.A., Pearson, R.G. 2002. Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Global Ecology and Biogeography*, 11(6):453-462.
- Brune, M. 2016. Urban trees under climate change. Potential impacts of dry spells and heat waves in three German regions in the 2050s. p. 24.
- Cho, N.H., Kim, E.S., Lee, B.R., Lim, J.H., Kang, S.K. 2020. Predicting the potential distribution of *Pinus densiflora* and analyzing the relationship with environmental variable using MaxEnt model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 22(2):47-56.
- Choi, J.Y., Lee, P.S.H., Lee, S.H. 2015. Anticipation of the future suitable cultivation areas for Korean pines in Korean peninsula with climate change. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 18(1):103-113.
- Chun, J.H., Lee, C.B. 2013. Assessing the effects of climate change on the geographic distribution of *Pinus densiflora* in Korea using Ecological Niche Model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 15(4):219-233.

- Chun, J.H., Shin, M.Y., Kwon, T.S., Lim, J.H., Lee, Y.K., Park, G.E., Kim, T.W., Sung, J.H. 2014. Predicting the changes of productive areas for major tree species under climate change in Korea. Korea Forest Research Institute, 14(21):10-94.
- Do, M.S., Lee, J.W., Jang, H.J., Kim, D.I., Park, J.W., Yoo, J.C. 2017. Spatial distribution patterns and prediction of hotspot area for endangered herpetofauna species in Korea. Korean Journal of Environment and Ecology, 31(4):381-396.
- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., E. Zimmermann, N. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography, 29(2):129-151.
- Franklin J. 2009. Mapping species distributions : spatial inference and prediction. Cambridge University Press. Cambridge, xviii p.320
- Guisan, A., Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters, 8(9):993-1009.
- Gyeongsangbuk-do Forest Environment Research Institute (GBFER). 2021. [https://www.gb.go.kr/Main/open\\_contents/section/kbfoa/page.do](https://www.gb.go.kr/Main/open_contents/section/kbfoa/page.do) (cited by 2021 April 27).
- Han, A.R., Jung, J.B., Park, P.S. 2019. Effects of micro-topography on the crown growth of *Picea jezoensis* under different wind conditions on Mt. Deokyu, Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 21(4):277-285.
- Hannah, L. 2014. Climate Change Biology. Academic Press.
- Harrison, P., Berry, P.M., Butt, N., New, M. 2006. Modelling climate change impacts on species' distributions at the European scale: implications for conservation policy. Environmental Science & Policy, 9(2):116-128.
- Horikawa, M., Tsuyama, I., Matsui, T., Kominami, Y., Tanaka, N. 2009. Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*). Landscape Ecology, 24(1):115-128.
- Hunter, M. 2011. Using ecological theory to guide urban planting design: An adaptation strategy for climate change. Landscape Journal, 30(2):173-193.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, 1-450.

- Iverson, L.R., Prasad, A.M. 2002. Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. *Forest Ecology and Management*, 155(1-3):205-222.
- Jeong, U.J., Kim, H.S., Eom, M.R., Sim, U.G. 2012. Consideration on the expertise of selecting landscape plants. In *Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference*, p.153-156.
- Joo, B.H. Korean Apartment Newspaper. <http://www.hapt.co.kr> (cited by 2021 April 27).
- Jung, S.Y., Lee, K.S., Yoo, B.O., Park, Y.B., Ju, N.G., Kim, H.H., Park, J.H. 2014. Freezing injury characteristics of evergreen broad-leaved trees in southern urban area, Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 103(4):528-536.
- Kang, H.S. 2013. Ecological responses of plants to climate change: Research trends and its applicability in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 46(3):319-331.
- Kang, Y.H., Lee, C.Y., Bae, Y.T., Kim, C.B. 2011. Characteristics analysis of site condition and disturbance resistance of tree species for damaged forested land in South Korea. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 14(6):1-15.
- Kim, D.G. 2011. The development of ecological planting model for the make up of coastal windbreak forest on Suncheon bay in Suncheon-si, Korea. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 14(1):89-104.
- Kim, H.G. 2017. Impacts and vulnerability assessment of landslides to climate change in various scales. Seoul National University, Ph.D. Thesis
- Kim, J.Y. 2019. Predicting climate suitability of landscape tree species under climate change. Seoul National University, Ph.D. Thesis, p.1-2.
- Kim, K.D., Lee, S.H. 2001. The characteristics of folk house related to climate in Cheju island, *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 7(3):29-43.
- Kim, S.S. 2007. *Korean Landscape Trees*. Kimoondang.
- Kim, W.S. 2014, A Study on the tendency of planting tree defects according to the changes of landscape in apartment. Hanyang University, Ph.D. Thesis

- Koo, K.A., Kong, W.S., Kim, C.K. 2001. Distribution of evergreen broad-leaved plants and climatic factors. *Journal of the Korean Geographical Society*, 36(3):247-257.
- Korea Land & Housing Corporation (LH). 2018. Design guidelines (Landscape). <https://www.lh.or.kr/index.do> (cited by 2020 October 28).
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2018. Jeju-do Climate Change Forecast Analysis Report.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2021a. Climate Change Scenario. <http://www.climate.go.kr/home> (cited by 2021 April 27).
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2021b. Domestic climate data, Jeju-do. [https://www.weather.go.kr/weather/climate/average\\_regional05.jsp](https://www.weather.go.kr/weather/climate/average_regional05.jsp) (cited by 2021 April 27).
- Korea National Housing Corporation (KNHC). 1998. Landscape Tree Book, Kimoodang.
- Kwon, H.S., Ryu, J.E., Seo, C.W., Kim, J.Y., Tho, J.H., Suh, M.H., Park, C.H. 2012. Climatic and environmental effects on distribution of narrow range plants. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 15(6):17-27.
- Land and Housing Institute (LHI). 2017. A preliminary study on the planting condition improvement by climate changes. Research support, 2017-00
- Lee, C.S., Lee, W.K., Yoon, J.H., Song, C.C. 2006. Distribution pattern of *Pinus densiflora* and *Quercus* Spp. stand in Korea using spatial statistics and GIS. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 95(6):663-671.
- Lee, J.H., Choi, B.H. 2010. Distribution and northernmost limit on the Korean peninsula of three evergreen trees. *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 40(4):267-273.
- Lee, S.H., Choi, J.Y., Lee, Y.M. 2011. Projection of climate change effects on the potential distribution of *Abeliophyllum distichum* in Korea. *Korean Journal of Agricultural Science*, 38(2):219-225.
- Lee, S.H., Jung, H., Choi, J. 2012. Projecting climate change impact on the potential distribution of endemic plants (*Megaleranthis saniculifolia*) in Korea. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 15(3):75-84.
- Lee, Y.G., Sung, J.H., Chun, J.H., Shin, M.Y. 2014. Effect of climate changes on

- the distribution of productive areas for *Quercus mongolica* in Korea. Journal of Korean Society of Forest Science, 103(4):605-612.
- Lee, Y.H., Hong, S.H., Na, C.S., Sohn, S.I., Kim, M.H., Kim, C.S., Oh, Y.J. 2016. Predicting the suitable habitat of *Amaranthus viridis* based on climate change scenarios by MaxEnt. Korean Journal of Environmental Biology, 34(4):240-245.
- Lee, Y.H., Oh, Y.J., Hong, S.H., Na, C.S., Na, Y.E., Kim, C.S., Sohn, S.I. 2015. Predicting the suitable habitat of invasive alien plant *Conyza bonariensis* based on climate change scenarios. Journal of Climate Change Research, 6(3):243-248.
- McKenney, D.W., Hutchinson, M.F., Kesteven, J.L., Venier, L.A. 2001. Canada's plant hardiness zones revisited using modern climate interpolation techniques. Canadian Journal of Plant Science, 81(1):129-143.
- Nakao, K., Matsui, T., Horikawa, M., Tsuyama, I., Tanaka, N. 2011. Assessing the impact of land use and climate change on the evergreen broad-leaved species of *Quercus acuta* in Japan. Plant ecology, 212(2):229-243.
- National Forestry Administration (NFA). 2010. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula, VIII. Jeju-do Province.
- National Institute of Meteorological Research (NIMR). 2010. Understanding climate change VI Jeju's climate change, p.1,53.
- Ottaviani, D., Lasinio, G.J., Boitani, L. 2004. Two statistical methods to validate habitat suitability models using presence-only data. Ecological Modelling, 179(4):417-443.
- Park, H.C., Lee, J.H., Lee, G.G. 2014. Predicting the suitable habitat of the *Pinus pumila* under climate change. Journal of Environmental Impact Assessment, 23(5):379-392.
- Park, J.C., Yang, K.C., Jang, D.H. 2010. The movement of evergreen broad-leaved forest zone in the warm temperate region due to climate change in South Korea. Journal of Climate Research, 5(1):29-41.
- Park, J.Y., Cho, S.H. 2014. An analysis of the types of planting design change orders and on its feasibility cognition in the landscape planting construction - Focused on the planting construction of apartment complex practiced by 'A' housing corporation-

- Korean Institute of Landscape Architecture, 42(1):18-26.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4):231-259.
- Quantum Geographic Information System (QGIS), 2021, <https://qgis.org/ko/site/index.html> (cited by 2021 April 27).
- Swets, J.A, 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240:1285-1293.
- Thuiller, W. 2003. BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology*, 9(10):1353-1362.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., Sykes, M.T., Prentice, I. C. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23):8245-8250.
- Trisurat, Y., Shrestha, R.P., Kjelgren, R. 2011. Plant species vulnerability to climate change in peninsular Thailand. *Applied Geography*, 31(3):1106-1114.
- Woodward, F.I., Williams, B.G. 1987. Climate and plant distribution at global and local scales. *Vegetatio*, 69(1):189-197.
- Yang, K.C., Shim, J.K. 2007. Distribution of major plant communities based on the climatic conditions and topographic features in South Korea. *Korean Journal of Environmental Biology*, 25(2):168-177.
- Yoon, E.J., Lee, E.Y., Kim, M.N., Oh, S.B., Lee, Y.J. 2017. Preliminary study on the planting condition improvement by climate changes. Land & Housing Institute.
- Yun, J.H., Kim, J.H., Oh, K.H., Lee, B.Y. 2011a. Distributional change and climate condition of warm-temperate evergreen broad-leaved trees in Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 25(1):47-56.
- Yun, J.H., Nakao, K., Park, C.H., Lee, B.Y. 2011b. Potential habitats and change prediction of *Machilus thunbergii* Siebold & Zucc. in Korea by climate change. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 25(6):903-910.
- Yun, J.H., Nakao, K., Park, C.H., Lee, B.Y., Oh, K.H. 2011c. Change prediction for potential habitats of warm-temperate evergreen broad-leaved trees in Korea by climate change. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 25(4):590-600.

## ※ Appendix

### 1. 종속변수 데이터

: 대상수종별 표본의 위치정보(위도, 경도) 값이 포함된 CSV형식의 파일)

NM_SPC		LC_LAT	LC_LON
곰솔	<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	33.31208470	126.1732351
		33.36684237	126.3003297
		33.50214955	126.6368397
		33.45279409	126.7606052
		33.49463247	126.7128619
		33.52893289	126.7714749
		33.45880707	126.9425429
		33.47045177	126.8560983
		33.34694962	126.8328511
		33.40571328	126.7976052
		33.40949970	126.6350520
		33.30645133	126.6765912
		33.28439865	126.6037085
		33.24192883	126.3134038
참식나무	<i>Neolitsea sericea</i> (Blume) Koidz.	33.31208470	126.1732351
		33.50214955	126.6368397
		33.45819261	126.6533300
		33.45279409	126.7606052
		33.48500690	126.7993177
		33.40571328	126.7976052
		33.40949970	126.6350520
		33.30645133	126.6765912
		33.28439865	126.6037085
		33.30653181	126.5168939
돋나무	<i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton	33.31073724	126.4538315
		33.26720058	126.5138600
		33.31208470	126.1732351
		33.50214955	126.6368397
		33.54276171	126.7445204
		33.52893289	126.7714749
		33.50016036	126.9019166
		33.50577662	126.9541105

돈나무	<i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton	33.45880707	126.9425429
		33.25860175	126.3528140
소나무	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	33.36352491	126.5286145
주목	<i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.	33.37087370	126.4418057
		33.42514624	126.5496234
		33.45819261	126.6533300
		33.36352491	126.5286145
		33.33759352	126.4739104
측백나무	<i>Platyclusus orientalis</i> L.	33.50214955	126.6368397
		33.47540566	126.5071890
편백나무	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Siebold & Zucc.) Endl.	33.38492859	126.3870351
		33.50214955	126.6368397
		33.45819261	126.6533300
		33.47540566	126.5071890
		33.45279409	126.7606052
		33.49463247	126.7128619
		33.48500690	126.7993177
		33.34694962	126.8328511
		33.40571328	126.7976051
		33.40949970	126.6350520
		33.30645133	126.6765912
비자나무	<i>Torreya nucifera</i> L. Siebold & Zucc.	33.24192883	126.3134038
		33.38492859	126.3870351
		33.37087370	126.4418057
		33.50214955	126.6368397
		33.49463247	126.7128619
		33.48500690	126.7993177
향나무	<i>Juniperus chinensis</i> L.	33.31073724	126.4538315
		33.45819261	126.6533300
		33.47540566	126.5071890
종가시나무	<i>Quercus glauca</i> Thunb.	33.49463247	126.7128619
		33.31208470	126.1732351
		33.33408635	126.2508015
		33.40088431	126.4489960
		33.45819261	126.6533300
굴거리나무	<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	33.49463247	126.7128619
		33.25860175	126.3528140
		33.37087370	126.4418057
		33.36352491	126.5286145
		33.30653181	126.5168939
		33.33759352	126.4739104



굴거리나무	<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	33.31073724	126.4538315
녹나무	<i>Cinnamomum camphora</i> L. J. Presl	33.49463247	126.7128619
동백나무	<i>Camellia japonica</i> L.	33.40088431	126.4489960
		33.45819261	126.6533300
		33.45279409	126.7606052
		33.49463247	126.7128619
		33.52893289	126.7714749
		33.45880707	126.9425429
		33.40571328	126.7976051
		33.30653181	126.5168939
		33.25860175	126.3528140
담팔수	<i>Elaeocarpus sylvestris</i> var. <i>ellipticus</i> (Thunb.) H. Hara	33.33408635	126.2508015
먼나무	<i>Ilex rotunda</i> Thunb.	33.52893289	126.7714749
		33.25860175	126.3528140
후박나무	<i>Machilus thunbergii</i> Siebold & Zucc. ex Meisn.	33.48500690	126.7993177
		33.34694962	126.8328511
		33.40571328	126.7976051
		33.30645133	126.6765912
		33.28439865	126.6037085
		33.30653181	126.5168939
		33.26720058	126.5138600
		33.24192883	126.3134038
아왜나무	<i>Viburnum odoratissimum</i> Ker Gawl. ex Rümpler var. <i>awabuki</i> (K.Koch) Zabel	33.49463247	126.7128619
		33.48500690	126.7993177
		33.50577662	126.9541105
		33.45880707	126.9425429
		33.34694962	126.8328511
		33.36352491	126.5286145
		33.30653181	126.5168939
후피향나무	<i>Ternstroemia gymnanthera</i> (Wight & Arn.) Bedd.	33.47540566	126.5071890
호랑가시나무	<i>Ilex cornuta</i> Lindl. & Paxton	33.31208470	126.1732351
		33.49463247	126.7128619
사철나무	<i>Euonymus japonicus</i> Thunb.	33.31208470	126.1732351
		33.33408635	126.2508015
		33.38492859	126.3870351
		33.50214955	126.6368397
		33.47540566	126.5071890
		33.49463247	126.7128619
		33.54276171	126.7445204
		33.45880707	126.9425429

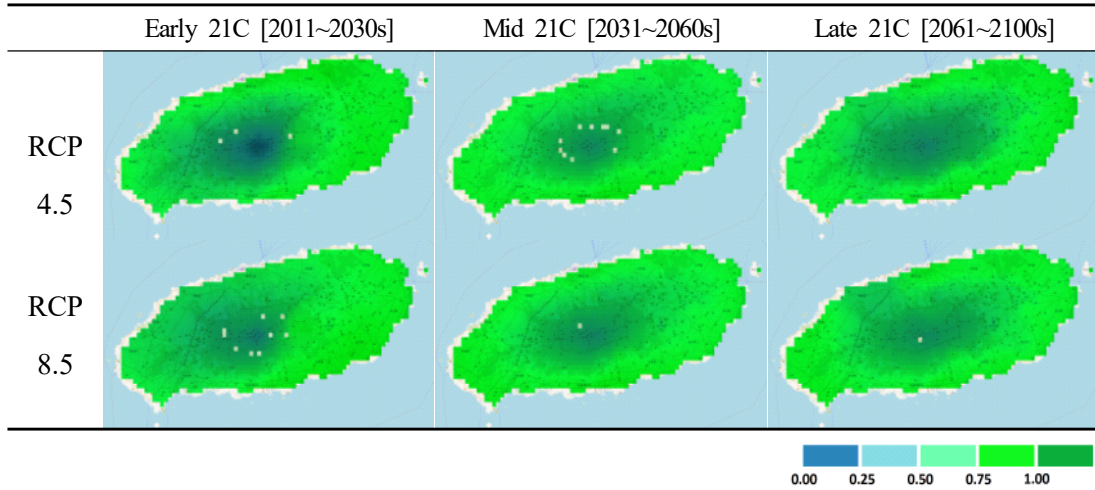
사철나무	<i>Euonymus japonicus</i> Thunb.	33.34694962	126.8328511
		33.28439865	126.6037085
		33.33759352	126.4739104
		33.31073724	126.4538315
까마귀쪽나무	<i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss.	33.31208470	126.1732351
		33.33408635	126.2508015
		33.50214955	126.6368397
		33.47540566	126.5071890
		33.49463247	126.7128619
		33.54276171	126.7445204
		33.52893289	126.7714749
		33.48500690	126.7993177
		33.50016036	126.9019166
		33.50577662	126.9541105
		33.50577662	126.9541105
		33.47045177	126.8560983
		33.34694962	126.8328511
		33.30645133	126.6765912
33.24192883	126.3134038		
33.19862024	126.2917502		
매죽나무	<i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc.	33.38492859	126.3870351
		33.37087370	126.4418057
		33.40088431	126.4489960
		33.42514624	126.5496234
		33.50214955	126.6368397
		33.45819261	126.6533300
		33.45279409	126.7606052
		33.45880707	126.9425429
		33.34694962	126.8328511
		33.40949970	126.6350520
		33.34538307	126.6994052
		33.36352491	126.5286145
		33.30653181	126.5168939
		33.31073724	126.4538315
벗나무	<i>Prunus serrulata</i> Lindl. f. <i>spontanea</i> (E.H.Wilson) Chin S.Chang	33.31208470	126.1732351
		33.47540566	126.5071890
		33.36352491	126.5286145
목련	<i>Magnolia kobus</i> DC.	33.45819261	126.6533300
배롱나무	<i>Lagerstroemia indica</i> L.	33.49463247	126.7128619
		33.54276171	126.7445204

단풍나무	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	33.38492859	126.3870351
		33.42514624	126.5496234
		33.45819261	126.6533300
		33.49463247	126.7128619
		33.48500690	126.7993177
		33.40949970	126.6350520
		33.34538307	126.6994052
		33.30653181	126.5168939
		33.31073724	126.4538315
은행나무	<i>Ginkgo biloba</i> L.	33.45819261	126.6533300
참꽃나무	<i>Rhododendron weyrichii</i> Maxim.	33.38492859	126.3870351
		33.37087370	126.4418057
		33.40088431	126.4489960
		33.45819261	126.6533300
		33.40949970	126.6350520
		33.34538307	126.6994052
		33.36352491	126.5286145
		33.31073724	126.4538315
		산딸나무	<i>Cornus kousa</i> F.Buenger ex Miquel
산딸나무	<i>Cornus kousa</i> F.Buenger ex Miquel	33.37087370	126.4418057
		33.42514624	126.5496234
		33.50214955	126.6368397
		33.45819261	126.6533300
		33.40949970	126.6350520
		33.34538307	126.6994052
		33.36352491	126.5286145
		33.33759352	126.4739104
		멀구슬나무	<i>Melia azedarach</i> L.
33.36684237	126.3003297		
33.38492859	126.3870351		
33.40088431	126.4489960		
33.50214955	126.6368397		
33.45819261	126.6533300		
33.47540566	126.5071890		
33.49463247	126.7128619		
33.52893289	126.7714749		
팽나무	<i>Celtis sinensis</i> Pers.	33.24192883	126.3134038
		33.45279409	126.7606052
		33.52893289	126.7714749
팔배나무	<i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) C.Koch	33.45880707	126.9425429
		33.38492859	126.3870351

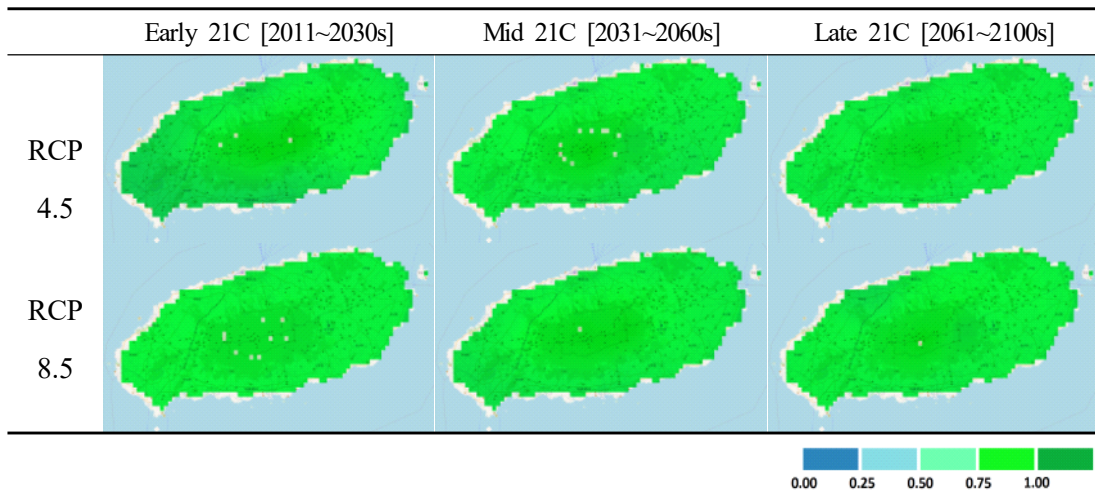
활배나무	<i>Sorbus alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) C.Koch	33.37087370	126.4418057
		33.50214955	126.6368397
		33.45819261	126.6533300
		33.49463247	126.7128619
		33.36352491	126.5286145
마가목	<i>Sorbus commixta</i> Hedl.	33.37087370	126.4418057
		33.42514624	126.5496234
		33.38542502	126.6198167
		33.36352491	126.5286145
		33.33759352	126.4739104
자귀나무	<i>Albizia julibrissin</i> Durazz.	33.38492859	126.3870351
		33.50214955	126.6368397
		33.45819261	126.6533300
		33.49463247	126.7128619
		33.48500690	126.7993177
		33.40571328	126.7976051
		33.40949970	126.6350520
		33.36352491	126.5286145
		33.28439865	126.6037085
		33.24192883	126.3134038
사람주나무	<i>Sapium japonicum</i> (Siebold & Zucc.) Pax & Hoffm.	33.38492859	126.3870351
		33.45819261	126.6533300
		33.48500690	126.7993177
		33.40949970	126.6350520
		33.34538307	126.6994052
		33.36352491	126.5286145
		33.30653181	126.5168939
		33.31073724	126.4538315
말오줌때	<i>Euscaphis japonica</i> (Thunb.) Kanitz	33.33408635	126.2508015
		33.50214955	126.6368397
		33.49463247	126.7128619
		33.48500690	126.7993177
		33.45880707	126.9425429
		33.34694962	126.8328511
		33.40571328	126.7976051
		33.30645133	126.6765912
		33.36352491	126.5286145
		33.28439865	126.6037085
33.30653181	126.5168939		

## 2. 수종별 기후적합지역 변화

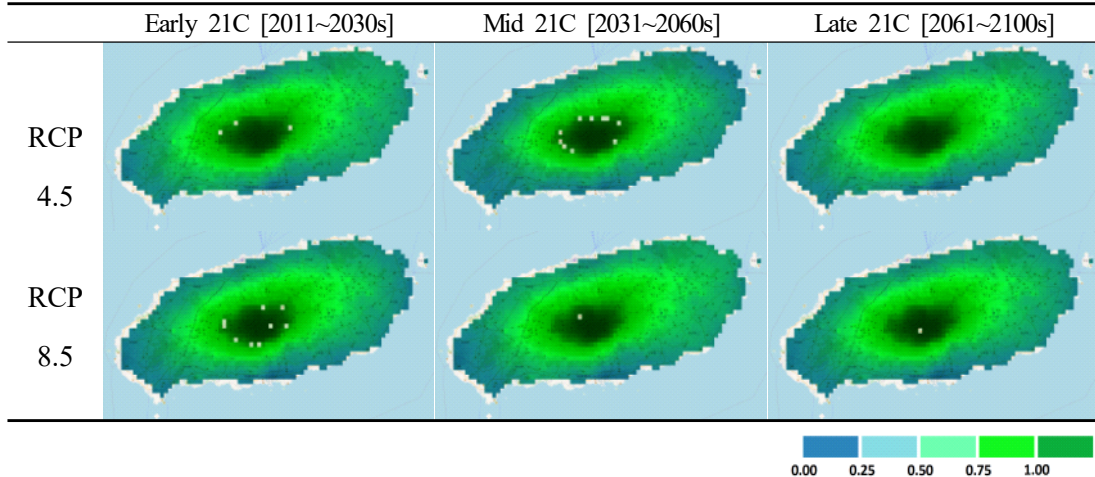
### 1) 상록침엽수 *Pinus thunbergii* Parl. (곰솔)



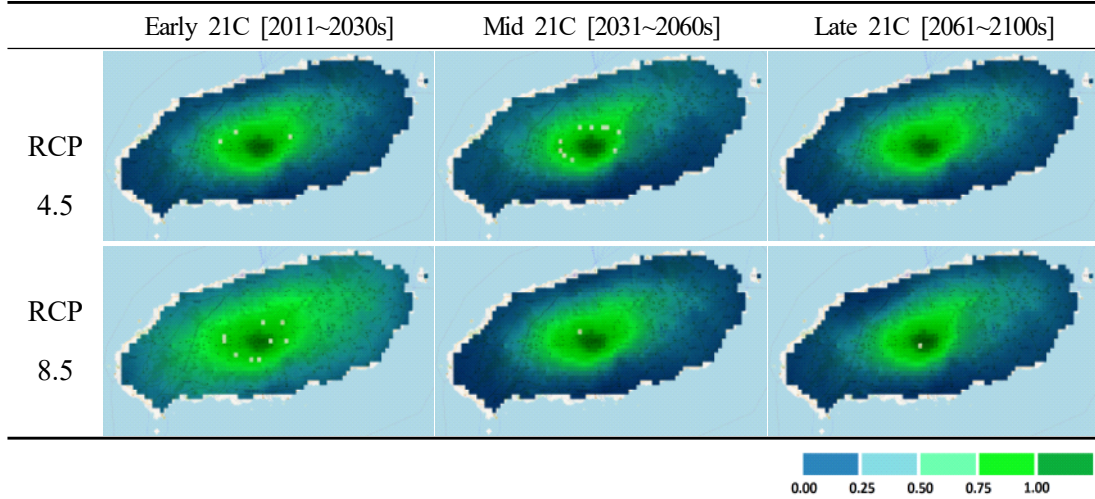
### 2) 상록침엽수 *Torreya nucifera* L. Siebold & Zucc. (비자나무)



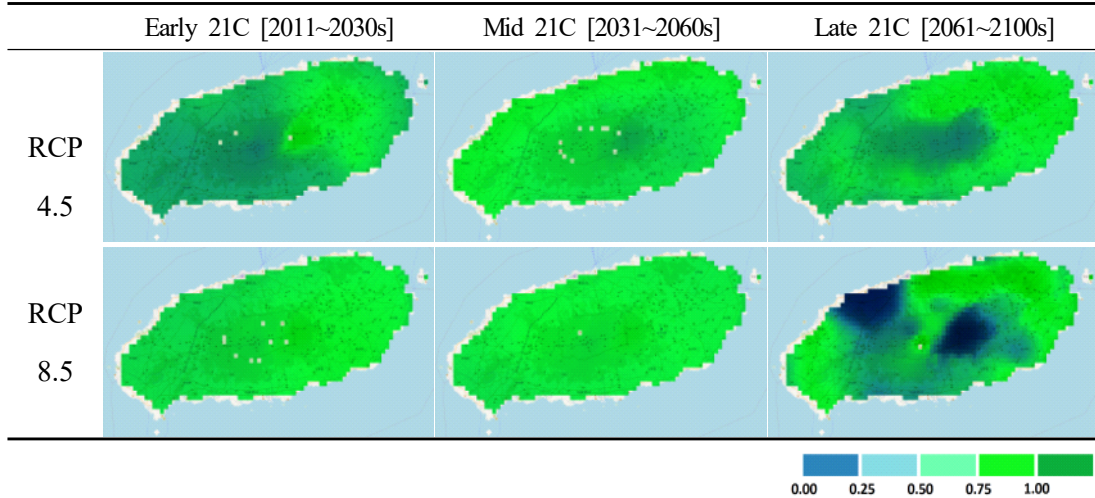
### 3) 상록침엽수 *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. (소나무)



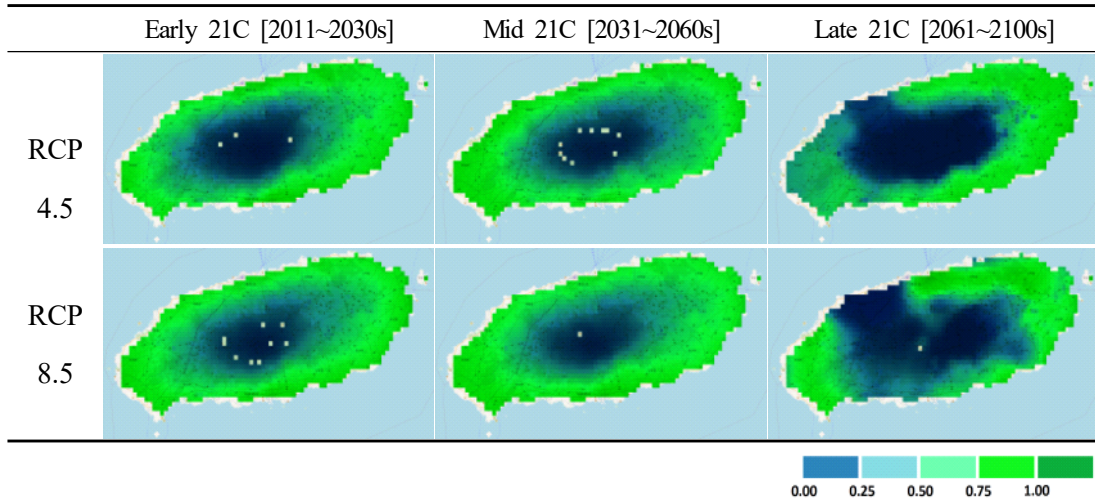
4) 상록침엽수 *Taxus cuspidata* Siebold & Zucc. (주목)



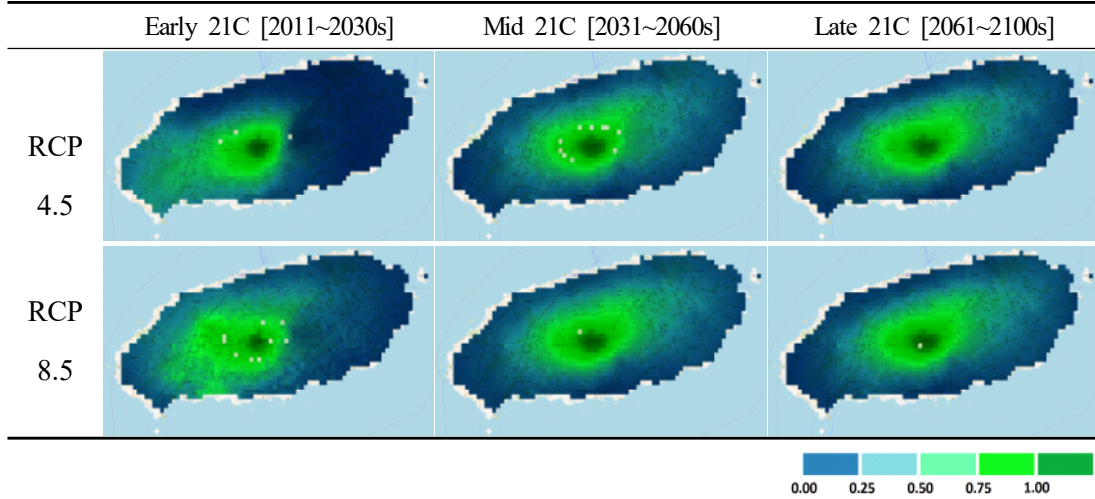
5) 상록침엽수 *Juniperus chinensis* L. (향나무)



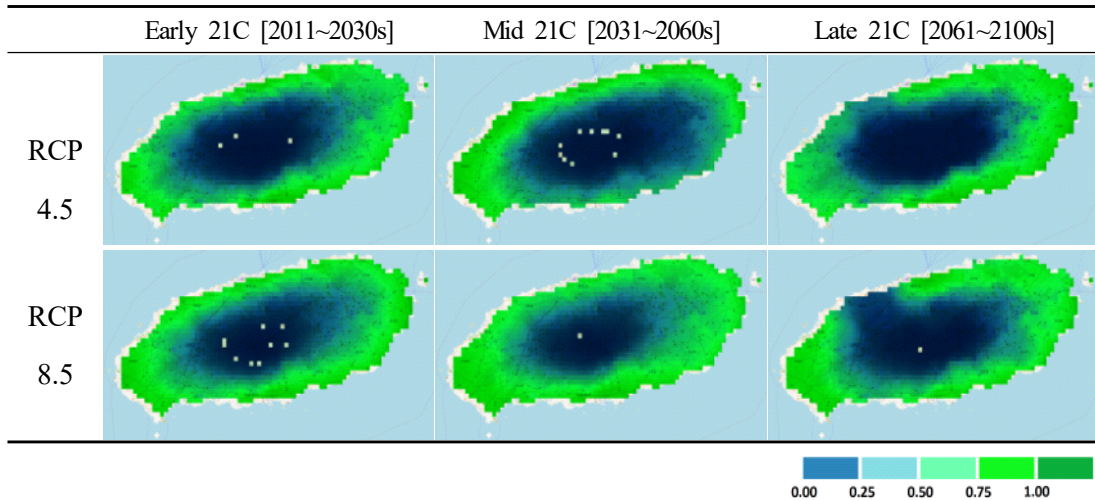
6) 상록활엽수 *Litsea japonica* (Thunb.) Juss. (까마귀쪽나무)



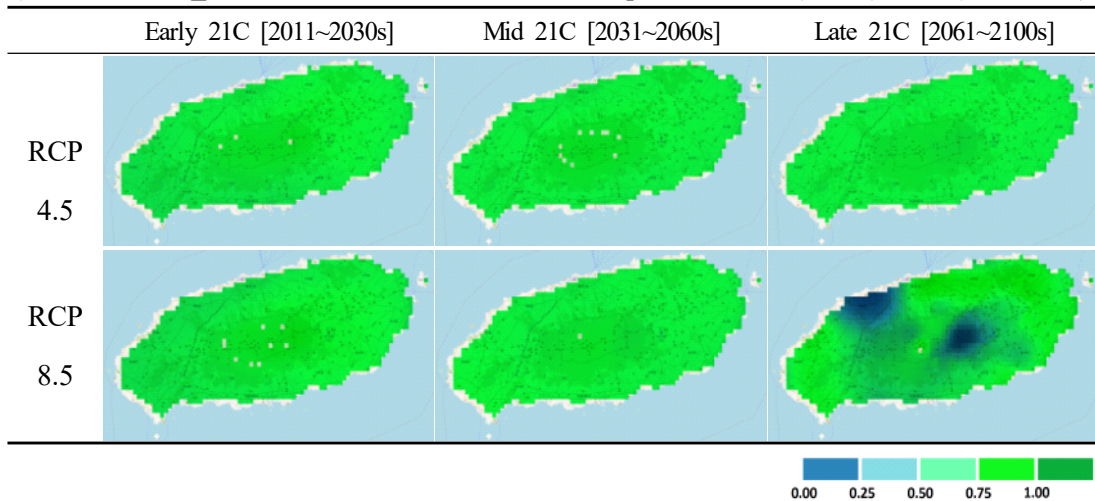
7) 상록활엽수 *Daphniphyllum macropodum* Miq. (굴거리나무)



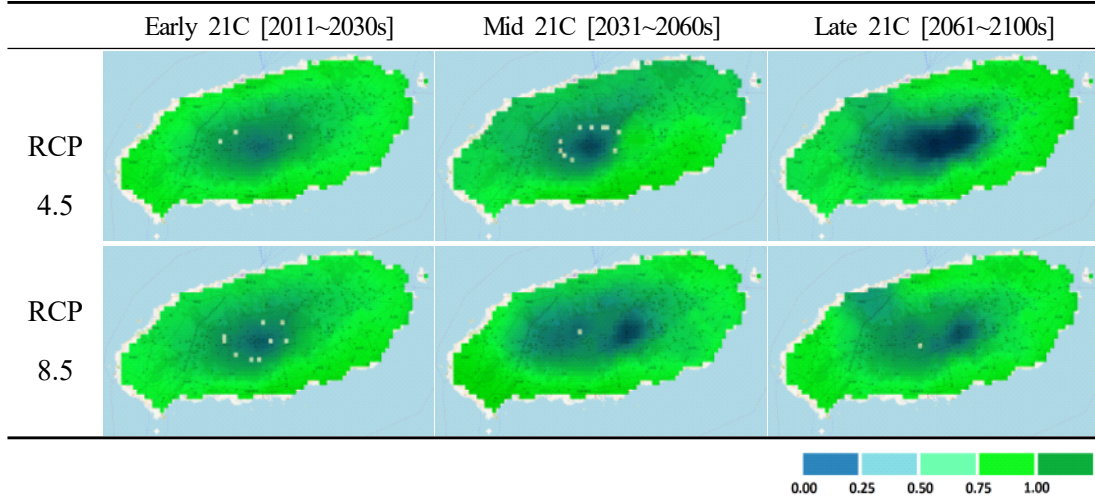
8) 상록활엽수 *Pittosporum tobira* (Thunb.) W.T.Aiton (돈나무)



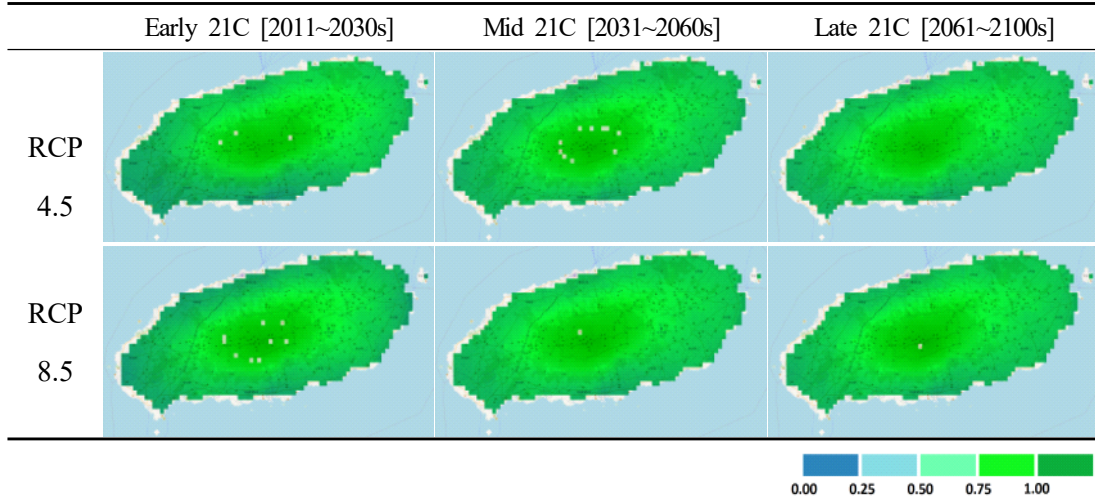
9) 상록활엽수 *Viburnum odoratissimum* Ker Gawl. ex Rümpler var. *awabuki* (K Koch) Zabel (아왜나무)



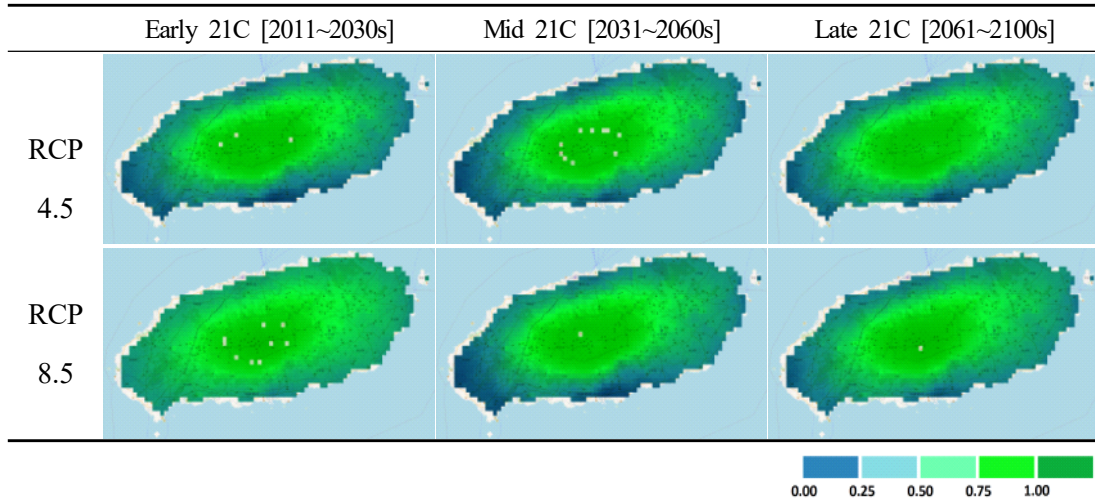
10) 상록활엽수 *Machilus thunbergii* Siebold & Zucc. ex Meisn. (후박나무)



11) 낙엽활엽수 *Acer palmatum* Thunb. (단풍나무)

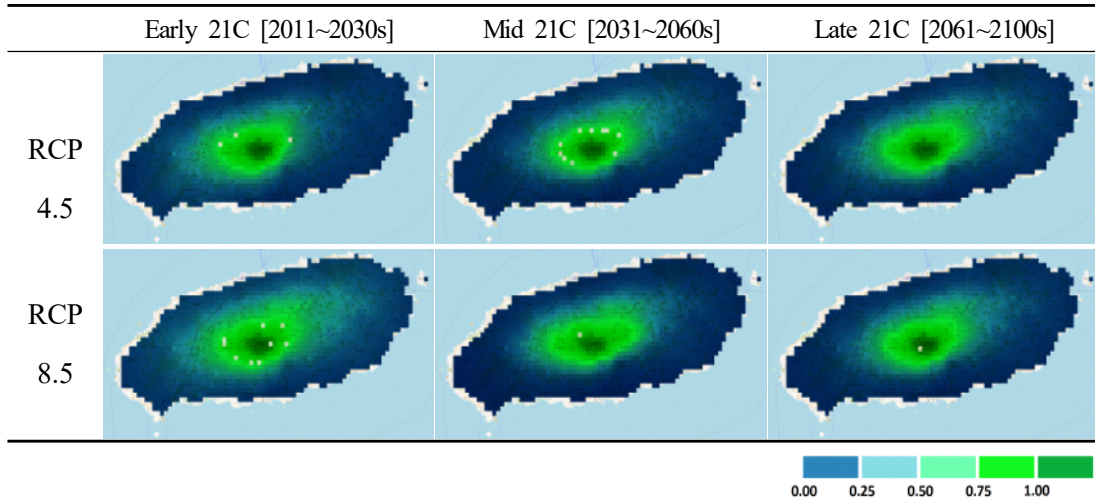


12) 낙엽활엽수 *Styrax japonicus* Siebold & Zucc. (때죽나무)

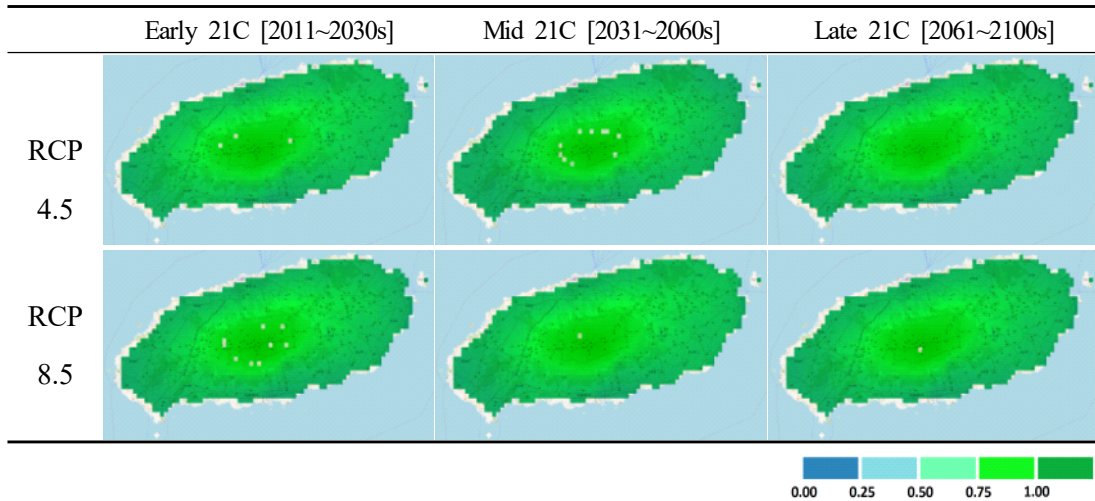




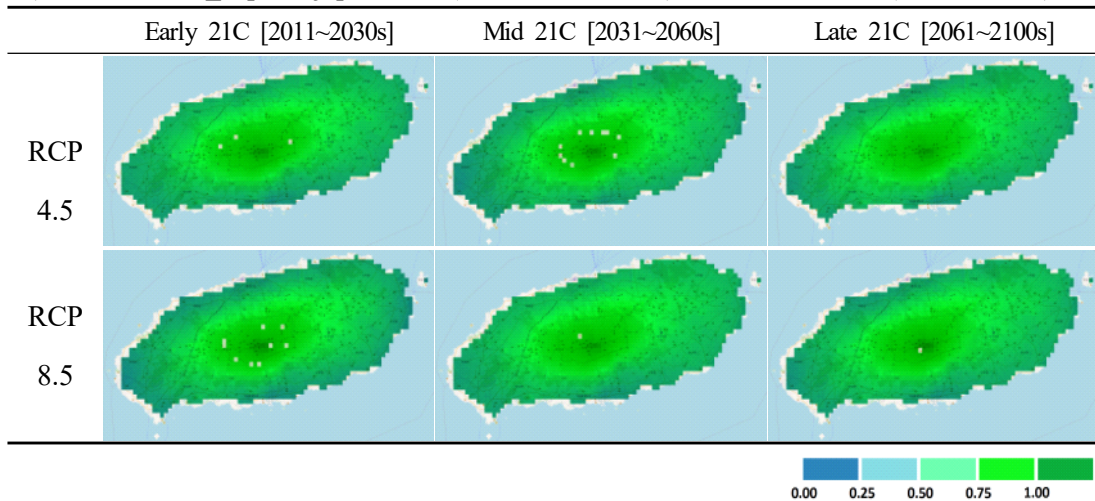
13) 낙엽활엽수\_ *Sorbus commixta* Hedl.(마가목)



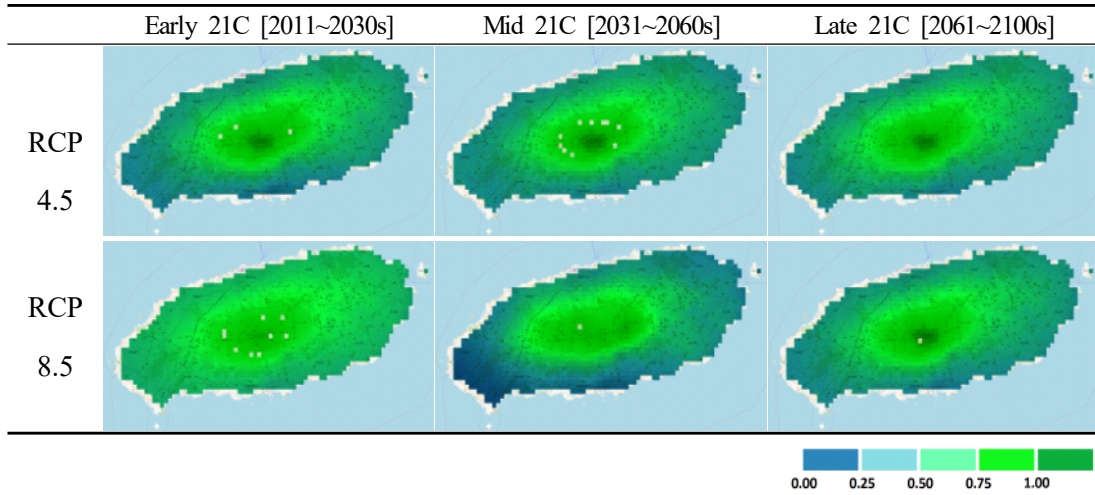
14) 낙엽활엽수\_ *Prunus serrulata* Lindl. f. *spontanea* (E.H.Wilson) Chin S.Chang (벚나무)



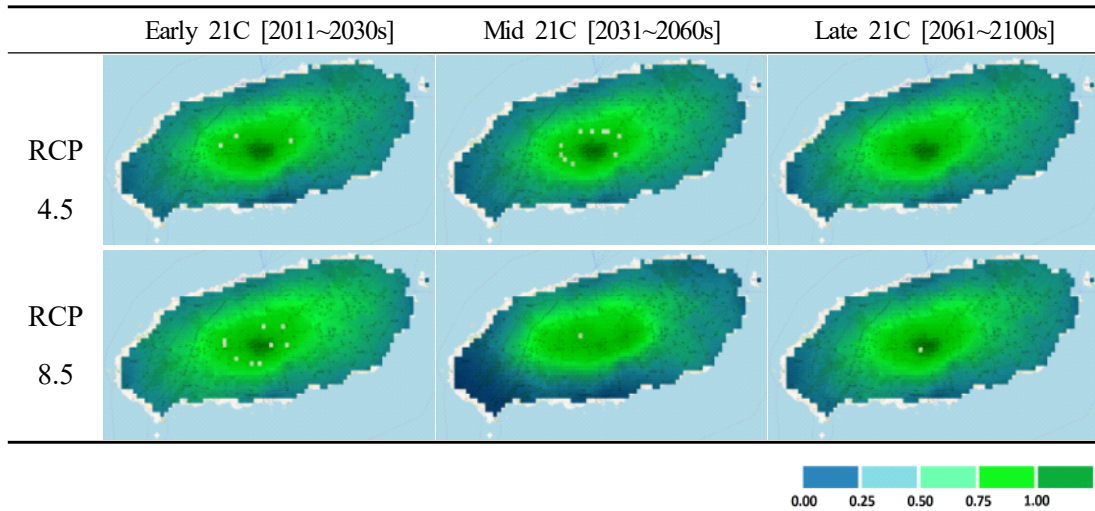
15) 낙엽활엽수\_ *Sapium japonicum* (Siebold & Zucc.) Pax & Hoffm. (사람주나무)



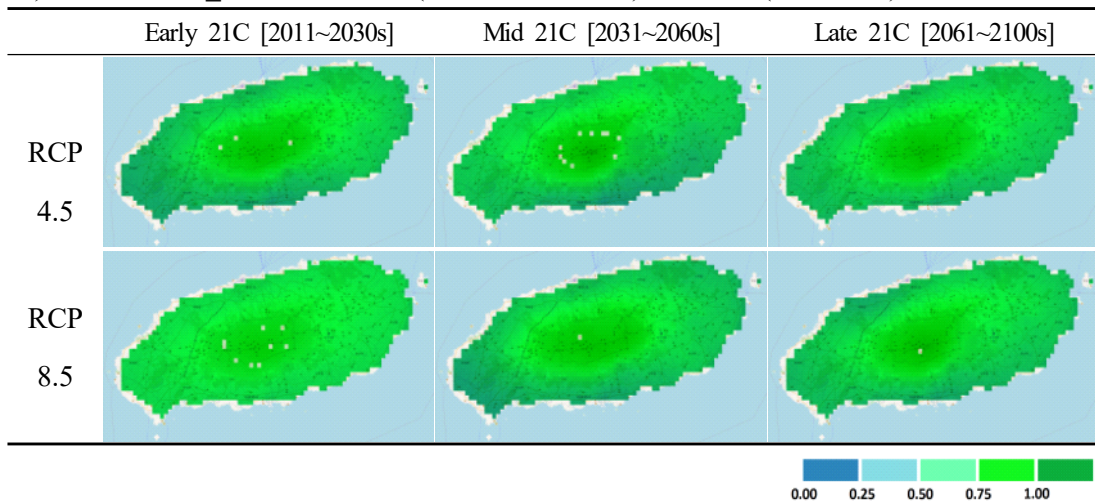
16) 낙엽활엽수\_ *Cornus kousa* F.Buerger ex Miquel (산딸나무)



17) 낙엽활엽수\_ *Rhododendron weyrichii* Maxim. (참꽃나무)



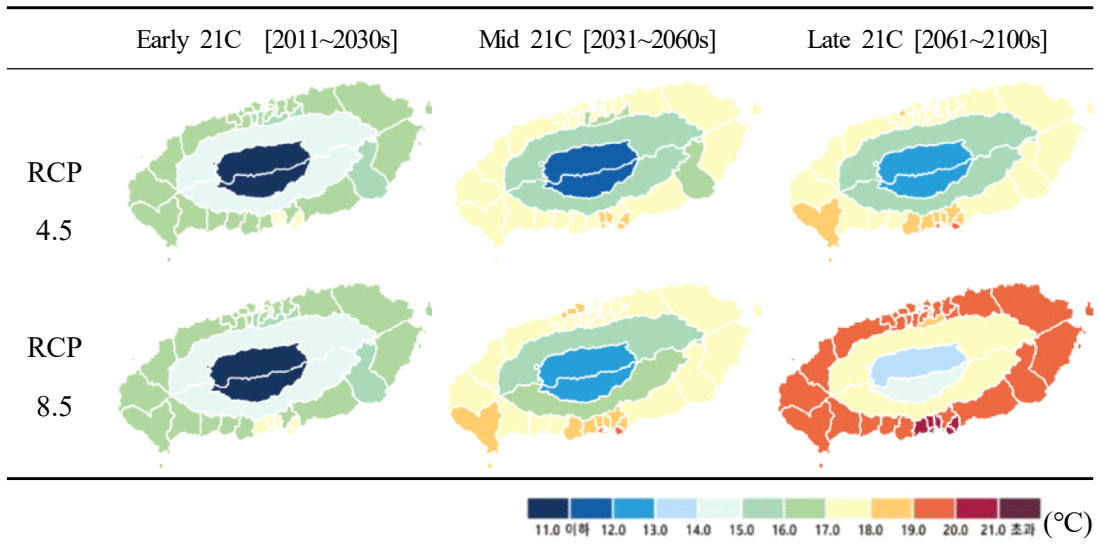
18) 낙엽활엽수\_ *Sorbus alnifolia* (Siebold & Zucc.) C.Koch (팔배나무)



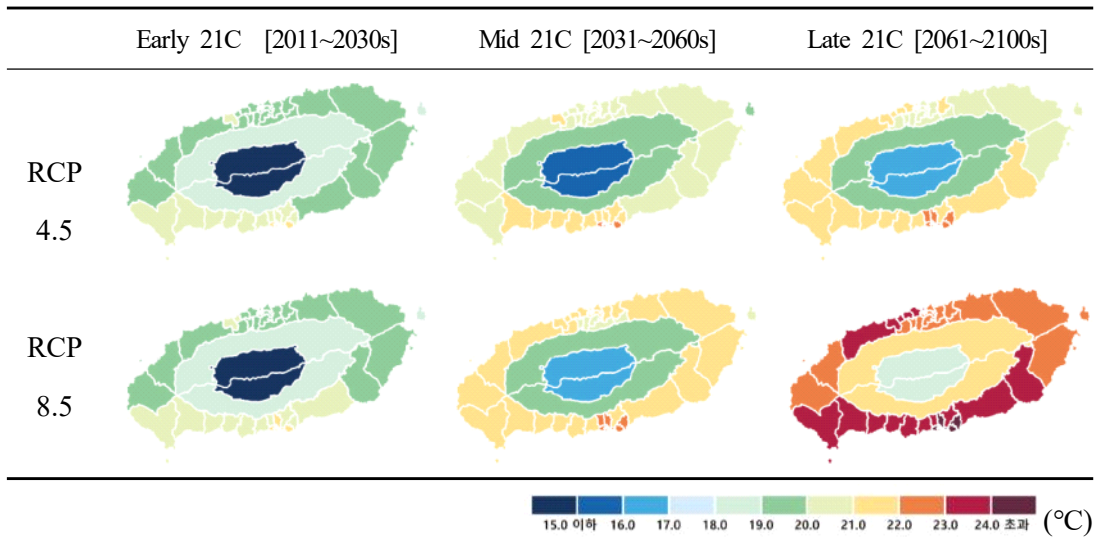
### 3. 제주도 기후변화 전망분포도

(자료: 기상청(2018), 제주특별자치도 기후변화 전망분석서 발췌)

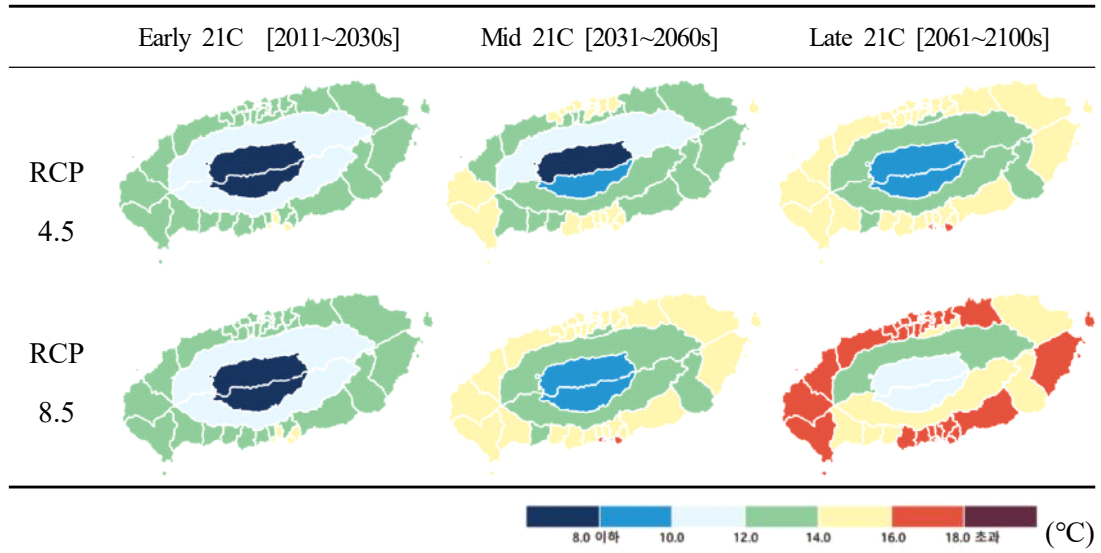
#### 1) 연평균기온 전망분포도



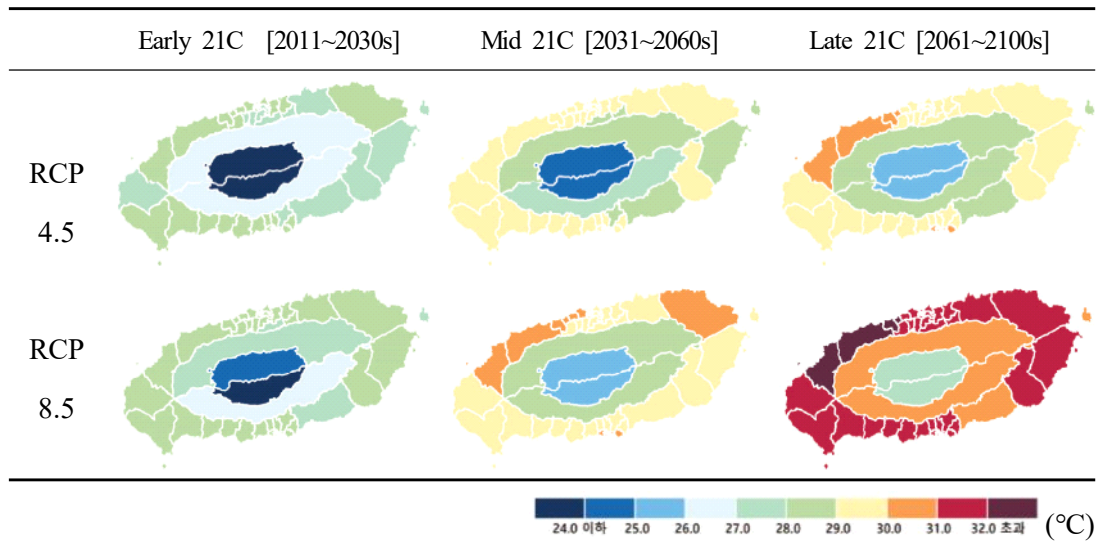
#### 2) 연평균 일최고기온 전망분포도



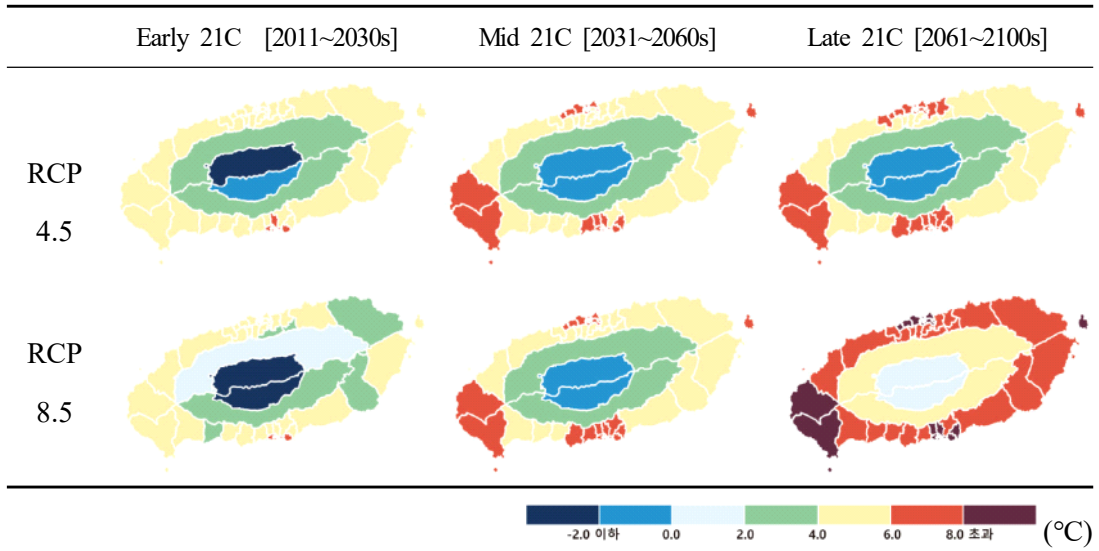
3) 연평균 일최저기온 전망분포도



4) 여름철 일최고기온 전망분포도



5) 겨울철 일최저기온 전망분포도



6) 연강수량 전망분포도

