

Research Paper

기후변화 시나리오에 의한 까치박달(*Carpinus cordata*)의 자생지 분포 예측

장채민 · 허 권

강원대학교 생물자원과학부 식물자원응용과학전공

Predicting the Natural Habitat of *Carpinus cordata* Based on Climate Change Scenarios

Chae-Min Jang · Kweon Heo

Department of Applied Plant Science, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University

요약: 본 연구는 한반도에 분포하는 까치박달의 현재 및 잠재 자생지를 예측하고, 기후변화 시나리오에 의한 자생지 변화와 민감성을 평가하였다. MaxEnt 모델을 이용하여 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 따른 까치박달의 잠재 자생지를 예측하고, 기후변화에 따른 자생지 감소 및 분포이동 유형을 분석하였다. 연구 결과 기온 및 강수량 등 주요 기후변수가 까치박달 자생지 변화에 중대한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 현재의 추세대로 온실가스를 배출하는 RCP 8.5 시나리오에서는 온실가스 감축 정책이 일정 부분 실현되는 RCP 4.5 시나리오보다 까치박달의 자생지 감소가 가속화되었다. 이러한 결과는 기후변화에 대응한 까치박달의 보전 전략 수립이 시급함을 시사하며, 기후변화 민감성이 높은 종의 자생지 보전을 위한 정책적 대응이 필요함을 강조한다. 본 연구는 한반도 내 기후변화에 따른 생물다양성 보전 및 관리 방안을 마련하는 데 중요한 기초자료를 제공한다.

주요어: 까치박달, 기후 민감성, 기후변수, 맥센트 모델, 잠재 자생지, 종 분포 예측

Abstract: This study predicts the current and future native habitats of *Carpinus cordata* on the Korean Peninsula and assesses the sensitivity of native habitat changes and vulnerability to climate change scenarios. The MaxEnt model was employed to predict the potential native habitats of *Carpinus cordata* under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios and analyzed native habitat shrinkage and climate zone shift patterns due to climate change. The study found that major climate variables such as temperature and precipitation had a significant impact on the changes in the native habitat of *Carpinus cordata*, and in particular, the RCP 8.5 scenario, which emits greenhouse gases according to the current trend, accelerated the reduction in the habitat of *Carpinus cordata* was accelerated compared to the RCP 4.5 scenario, in which the greenhouse gas reduction policy was partially realized. These results suggest an urgent need to develop conservation strategies for *Carpinus cordata* in response to climate change,

and emphasise the need for a policy response to conserve the native habitats of climate-sensitive species. This study provides an important basis for developing biodiversity conservation and management plans to cope with climate change on the Korean Peninsula.

Keywords: *Carpinus cordata*, Climate sensitivity, Climate variables, MaxEnt model, Potential habitat, Species distribution predict

I. 서론

산업화로 인해 다양한 공장들이 생기면서 온실가스가 증가하고 있다(Qureshi & Jamil 2021, Numata et al. 2022).

온실가스는 대표적으로 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등으로 구성되어 있다(Etminan et al. 2016). 증가된 온실가스는 기온을 상승시키며, 기후변화에 영향을 미친다 (Chen & Chen 2016, Huang et al. 2016, Ramanathan & Feng 2009). 전지구적 기후변화는 가뭄, 폭염, 폭우와 같은 극단적인 기상현상으로 나타난다 (IPOC 2007).

기후요소 중 기온 및 강수량은 식물의 성장과 생존, 분포에 다양한 영향을 미친다(Compant et al. 2010, Aguilar-Rodríguez et al. 2006). 기온은 식물 성장 속도에 영향을 미치는 주요 요인이며, 강수량은 기온보다 식물 성장에 미치는 영향은 크지 않지만, 여전히 식물 성장에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되었다(Hatfield & Prueger 2015, Wang et al. 2014). 기온과 수온이 증가하면 식물의 성장량은 증가하는 경향을 보이며, 반대로 감소하면 식물의 성장량도 감소한다(Madsen & Adams 1988, Riis et al. 2003). 식물은 가속화하는 기후변화로 인해 적합한 기후대를 따라 이동하지 못하는 종은 멸종할 것으로 보고되었다(Corlett & Westcott 2013).

기후변화에 영향을 받는 다양한 식물 중 자작나무과(Betulaceae)의 오리나무속(*Alnus*), 자작나무속(*Betula*), 서어나무속(*Carpinus*), 개암나무속(*Corylus*), 새우나무속(*Ostrya*)은 기후변화에 민감하게 반응한다(Mercuri et al. 2016). 기후변화에 의한 서어나무속의 까치박달(*Carpinus cordata*)은 고도가 높은 지역으로 자생지가 감소하고, 북쪽 및 동쪽으로 확장되며, 생육지역이 현재와 크게 달라진 것으로 보고되었다(Zhao et al. 2019).

까치박달은 한반도를 비롯하여 중국, 일본 등의 산림에 분포하는 것으로 알려져 있으며, 온대 북부 성숙림의 주요 수종이다(Koike 1990, Lee 2003, Kikuzawa 1983, Kwon et al. 2014). 성숙림은 멸종위기에 처한 종들에게 피난처를 제공하므로, 이를 보호하는 것은 전 지구적 산림 황폐화를 예방하는데 도움이 된다(Buotte et al. 2020, DellaSala et al. 2022, Lindenmayer et al. 2012). 한반도의 미래 기후는 2100년까지 지속적으로 기온이 증가할 것으로 예측되며, 연평균 기온은 전 세계 수준에 비하여 1.2배 이상 상승할 것으로 분석되었다(KMA 2012).

미래기후를 예측하기 위한 도구로는 Representative Concentration Pathways(RCP) 시나리오가 널리 사용되며, RCP의 네 가지 시나리오는 ① RCP 2.6은 강력한 온실가스 감축으로 기온 상승을 2°C 이하로 제한하는 시나리오, ② RCP 4.5는 온실가스 배출이 중간 수준에서 감소하는 시나리오, ③ RCP 7.0은 온실가스 배출이 지속적으로 증가하는 중간 시나리오, ④ RCP 8.5는 온실가스 배출이 계속 증가해 극단적인 기후변화를 초래하는 시나리오로 각각 온실가스 농도변화에 따른 다양한 미래 경로를 제시한다(Field et al. 2014). 이들 가운데 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5는 식물 분포 및 생태적 반응을 평가하는데 주로 활용되고 있다(Guzo et al. 2024, Paraseth & Banerjee 2024, Adhikari et al. 2019, Jeon et al. 2020).

한반도에서 소나무, 신갈나무의 적지 분포와 기후변화에 대한 변화를 MaxEnt 모형을 활용하여 예측하였다(Park et al. 2014, Lee et al. 2014). 한반도에서 성숙림의 주요 수종인 까치박달이 기후변화에 의한 잠재 자생지와 지리적 분포에 대한 확산 예측이 필요하다.

본 연구는 한반도에 분포하는 까치박달의 자생지 데이터를 기반으로 온실가스 저감정책이 상당히 실현되

는 RCP 4.5 시나리오와 현재 추세대로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP 8.5 시나리오에 따라 MaxEnt 모델을 활용하여 잠재 자생지 변화를 예측하고, 향후 까치박달 자생지 보전 및 관리 전략 수립을 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 위치자료 수집

까치박달의 잠재 분포를 예측하기 위하여 국립생물자원관(NIBR)에서 제공하는 분포 자료를 수집하였으며, 분포 자료는 한반도 전역을 포함하였다. 수집된 데이터는 산림청에서 제공하는 임상도(1:5000)를 기반으로 자연림에 분포하는 좌표정보인 137지점의 GPS 기반 분포 지점 데이터베이스를 구축하였다(Figure 1). 까치박달의 잠재 자생지를 예측하기 위하여 137개 지



Figure 1. Distribution map of *C. cordata* used in this study.

Table 1. Summary of site characteristics for *Carpinus cordata* habitat

No.	x-coordinate	y-coordinate	Annual Mean Temperature (°C)	Isothermality (°C)	Annual Precipitation (mm)
1	34°23'00.4"	126°12'20.0"	13.91	25.34	1,294
2	34°11'27.6"	126°34'58.0"	14.39	23.45	1,433
3	37°15'45.6"	126°35'00.3"	11.39	23.37	1,225
4	36°23'28.7"	127°07'15.6"	11.32	28.69	1,307
5	35°33'13.4"	127°08'04.5"	11.77	28.42	1,325
6	37°25'25.7"	127°08'07.6"	11.58	25.86	1,312
7	37°11'03.1"	127°10'04.4"	10.78	26.63	1,319
8	36°30'41.4"	127°12'12.0"	11.66	28.46	1,282
9	37°09'03.2"	127°14'35.0"	9.85	26.93	1,340
10	35°32'07.9"	127°15'09.0"	11.37	28.56	1,358
11	35°23'44.4"	127°15'09.1"	12.19	28.48	1,335
12	35°23'44.4"	127°15'09.1"	12.19	28.48	1,335
13	37°15'44.4"	127°16'15.0"	10.75	26.52	1,311
14	37°15'44.4"	127°16'15.0"	10.75	26.52	1,311
15	37°15'44.4"	127°16'15.0"	10.75	26.52	1,311
16	35°24'15.5"	127°16'21.0"	11.85	28.51	1,354
17	35°24'22.0"	127°16'22.0"	11.85	28.51	1,354
18	37°34'52.2"	127°17'31.0"	10.3	25.86	1,314
19	37°21'04.5"	127°17'36.0"	10.43	26.91	1,322
20	37°21'17.6"	127°17'37.0"	10.43	26.91	1,322
21	35°11'54.5"	127°18'14.0"	11.73	28.01	1,403
22	35°11'54.5"	127°18'14.0"	11.73	28.01	1,403

Table 1. Continued

No.	x-coordinate	y-coordinate	Annual Mean Temperature (°C)	Isothermality (°C)	Annual Precipitation (mm)
23	38°04'55.2"	127°18'39.0"	9.34	26.37	1,276
24	38°05'27.6"	127°18'40.0"	9.11	26.5	1,280
25	37°35'34.7"	127°18'45.0"	10.64	26.02	1,301
26	38°03'34.9"	127°18'45.0"	9.52	26.15	1,260
27	37°19'29.9"	127°19'57.0"	10.57	26.71	1,318
28	37°19'59.3"	127°21'53.0"	10.58	26.95	1,313
29	35°06'56.6"	127°24'12.0"	12.15	28.27	1,402
30	35°33'52.8"	127°24'44.0"	11.87	29.07	1,323
31	35°12'15.2"	127°24'45.0"	11.97	27.91	1,396
32	35°12'15.7"	127°24'54.0"	11.97	27.91	1,396
33	35°21'07.9"	127°25'21.0"	10.89	28.11	1,420
34	35°25'59.7"	127°27'18.0"	12.03	28.24	1,336
35	35°25'59.7"	127°27'18.0"	12.03	28.24	1,336
36	35°30'11.1"	127°28'47.0"	11.41	28.26	1,354
37	36°15'10.8"	127°30'09.7"	11.34	29.11	1,292
38	37°33'48.5"	127°30'36.0"	8.55	26.98	1,359
39	35°07'35.1"	127°31'30.0"	11.92	27.68	1,420
40	35°35'43.6"	127°31'35.0"	10.3	28.73	1,402
41	37°33'54.6"	127°33'09.7"	7.24	27.14	1,395
42	35°31'18.8"	127°34'27.0"	10.23	28.73	1,423
43	36°09'07.9"	127°34'51.0"	11.21	29.4	1,280
44	36°09'07.9"	127°34'51.0"	11.21	29.4	1,280
45	36°31'21.0"	127°35'06.0"	11.01	28.4	1,282
46	36°09'08.0"	127°35'11.0"	10.78	29.5	1,302
47	36°09'07.9"	127°35'11.0"	10.78	29.5	1,302
48	35°31'58.6"	128°02'23.6"	12.2	29.13	1,323
49	37°23'28.5"	128°06'44.4"	8.22	27.74	1,329
50	36°28'53.0"	128°08'08.9"	12.01	29.95	1,193
51	38°06'45.5"	128°09'41.6"	8.91	26.92	1,221
52	35°18'05.5"	128°09'48.2"	12.7	29.37	1,359
53	37°22'01.0"	128°09'56.8"	8.54	28.17	1,321
54	37°22'01.0"	128°09'56.8"	8.54	28.17	1,321
55	35°18'16.0"	128°10'17.0"	12.53	29.31	1,368
56	35°18'19.0"	128°10'21.0"	12.53	29.31	1,368
57	37°15'11.5"	128°10'53.0"	9.6	28.24	1,299
58	37°15'11.5"	128°10'53.0"	9.6	28.24	1,299
59	37°22'04.8"	128°10'58.0"	8.48	28.09	1,328
60	37°23'45.0"	128°11'34.0"	8.45	27.78	1,321
61	38°14'32.6"	128°11'42.0"	8.98	26.72	1,200
62	38°09'19.8"	128°14'00.3"	9.43	26.24	1,184
63	38°09'19.8"	128°14'00.3"	9.43	26.24	1,184
64	35°07'26.8"	128°14'02.0"	12.87	29.2	1,417

Table 1. Continued

No.	x-coordinate	y-coordinate	Annual Mean Temperature (°C)	Isothermality (°C)	Annual Precipitation (mm)
65	37°32'05.2"	128°14'31.0"	8.42	27.88	1,320
66	38°08'55.3"	128°16'17.0"	8.72	26.01	1,221
67	37°12'09.5"	128°16'43.0"	9.73	29.1	1,299
68	37°31'53.2"	128°17'32.0"	7.3	27.64	1,354
69	37°16'24.7"	128°19'23.0"	9.74	28.53	1,281
70	37°18'16.2"	128°19'57.0"	9.56	28.16	1,287
71	37°15'08.6"	128°19'58.0"	10.08	28.64	1,273
72	37°15'46.2"	128°20'01.5"	10.15	28.44	1,271
73	37°28'21.0"	128°20'05.6"	7.72	28.07	1,346
74	37°24'57.5"	128°20'05.9"	7.88	28.19	1,344
75	37°12'23.0"	128°20'08.2"	10.52	28.88	1,262
76	37°28'35.8"	128°20'57.0"	8.22	27.74	1,331
77	37°26'40.0"	128°21'54.0"	8.8	28.07	1,311
78	37°08'35.6"	128°25'10.0"	10.4	29.13	1,258
79	37°21'11.9"	128°25'22.0"	9.35	28.17	1,289
80	36°16'19.2"	128°27'06.4"	11.76	30.2	1,141
81	36°17'02.0"	128°27'10.0"	11.71	30.28	1,139
82	37°25'32.8"	128°27'42.0"	7.81	28.37	1,343
83	37°22'17.1"	128°28'22.0"	8.24	28.61	1,330
84	37°22'17.1"	128°28'22.0"	8.24	28.61	1,330
85	36°44'30.3"	128°30'14.0"	11.32	30.29	1,184
86	36°44'30.3"	128°30'14.0"	11.32	30.29	1,184
87	36°44'30.3"	128°30'14.0"	11.32	30.29	1,184
88	36°44'30.3"	128°30'14.0"	11.32	30.29	1,184
89	36°44'30.3"	128°30'14.0"	11.32	30.29	1,184
90	37°23'40.7"	128°30'44.0"	7.13	28.46	1,394
91	38°07'38.2"	128°30'54.0"	8.65	26.57	1,296
92	36°12'42.4"	128°30'55.0"	11.74	30.15	1,119
93	37°21'19.5"	128°31'33.0"	8.88	28.72	1,308
94	37°21'19.5"	128°31'33.0"	8.88	28.72	1,308
95	37°21'19.5"	128°31'33.0"	8.88	28.72	1,308
96	37°40'44.4"	128°32'38.0"	8.11	28.11	1,325
97	37°08'35.9"	128°32'44.0"	10.03	28.43	1,263
98	37°08'35.9"	128°32'44.0"	10.03	28.43	1,263
99	37°08'35.9"	128°32'44.0"	10.03	28.43	1,263
100	37°19'07.0"	128°32'51.0"	12.22	28.44	1,286
101	36°19'07.0"	128°32'51.0"	9.44	30.5	1,092
102	37°20'29.4"	128°32'53.0"	9.74	28.19	1,285
103	37°20'29.4"	128°32'53.0"	9.74	28.19	1,285
104	37°23'07.7"	128°33'06.5"	8.69	28.13	1,323
105	37°08'38.5"	128°33'12.0"	9.75	28.6	1,275
106	37°08'38.5"	128°33'12.0"	9.75	28.6	1,275

Table 1. Continued

No.	x-coordinate	y-coordinate	Annual Mean Temperature (°C)	Isothermality (°C)	Annual Precipitation (mm)
107	37°08'35.8"	128°33'19.0"	9.75	28.6	1,275
108	37°08'35.8"	128°33'19.0"	9.75	28.6	1,275
109	37°08'35.8"	128°33'19.0"	9.75	28.6	1,275
110	37°20'39.4"	128°33'21.0"	9.32	28.32	1,295
111	37°41'03.1"	128°33'22.0"	8.38	27.92	1,314
112	37°10'37.6"	128°33'25.0"	9.65	28.4	1,275
113	37°08'38.5"	128°33'28.0"	9.75	28.6	1,275
114	37°08'38.5"	128°33'28.0"	9.75	28.6	1,275
115	37°12'45.6"	128°33'31.0"	9.08	28.36	1,305
116	37°19'45.8"	128°33'49.0"	8.99	28.37	1,301
117	37°09'14.1"	128°34'58.0"	8.5	28.8	1,337
118	35°20'32.9"	128°35'23.0"	12.81	28.7	1,327
119	35°20'32.9"	128°35'23.0"	12.81	28.7	1,327
120	36°25'33.0"	128°35'42.0"	11.18	30.53	1,154
121	36°25'33.0"	128°35'42.0"	11.18	30.53	1,154
122	36°25'33.0"	128°35'42.0"	11.18	30.53	1,154
123	37°16'36.2"	128°40'26.0"	8.98	28.47	1,304
124	37°10'28.1"	128°45'23.0"	8.28	28.85	1,315
125	36°14'37.1"	128°48'41.0"	11.14	29.71	1,121
126	36°14'37.1"	128°48'41.0"	11.14	29.71	1,121
127	35°28'56.1"	128°49'47.0"	11.76	28.51	1,327
128	35°21'08.9"	129°00'45.7"	13.16	28.21	1,330
129	37°01'15.6"	129°06'08.1"	7.83	29.11	1,350
130	37°10'05.5"	129°07'26.4"	8.96	28.88	1,297
131	35°19'56.3"	129°08'00.2"	12.5	27.79	1,394
132	35°19'56.3"	129°08'00.2"	12.5	27.79	1,394
133	36°11'22.6"	129°08'03.8"	11.17	29.5	1,140
134	35°24'09.9"	129°15'34.0"	13.52	27.84	1,296
135	35°24'09.9"	129°15'34.0"	13.52	27.84	1,296
136	37°15'49.9"	129°16'35.0"	11.3	28.6	1,245
137	37°15'49.9"	129°16'35.0"	11.3	28.6	1,245

점의 GPS 좌표를 바탕으로 주요 입지 조건(연평균 기온, 연평균 등온선, 연평균 강수량)을 분석하였다(Table 1). 입지 조건 정보는 WorldClim v2.1 자료를 활용하였으며, 까치박달의 분포지를 포함한 지역의 공간변수를 해상도 1km × 1km로 구축하였다. 한반도와 까치박달의 자생지의 온도 및 강수량을 통계적으로 검토하여 까치박달 자생지가 특정 기후 조건에 적합하다는 점을 규명하고자 잠재 분포 모델링을 위한 변수로 연평균 기온

(BIO1), 연평균 등온선(BIO3), 연평균 강수량(BIO12)을 선정하였다. 위성 및 기후 모델 데이터는 생태계 연구 및 기후변화 영향을 평가하기에 적합하며, 데이터의 신뢰성과 활용 가능성이 높다고 보고되었다(Colston et al. 2018).

2. 기후변수

식물분포에 영향을 미치는 환경요인은 다양하며, 이

중 식물분포의 지리적 제한 요인은 기후이다(Watling et al. 2012). 본 연구에서 까치박달의 분포를 결정하는 기후변수는 WorldClim v2.1 자료를 통해 측정하였다. WorldClim v2.1에서 2030년(2021~2040년의 평균), 2050년(2041~2060년의 평균), 2070년(2061~2080년의 평균)의 생물기후인자는 bioclim의 19가지 변수를 이용하였으며, 각 기후변수의 설명은 Table 2와 같다(Fick & Hijmans 2017). 공간변수의 해상도는 1km x 1km로 구축하고, QGIS Desktop Version 3.22.0을 이용하여 제작하였으며, 좌표계는 WGS84로 통일하였다. 그러나, 19개의 변수는 다중공선성(Multicollinearity)을 가질 수 있으므로(Khanum et al. 2013), 이를 제거하기 위하여 19개의 변수를 대상으로 상관관계 분석을 수행하여 상관관계수가 높은 요인($|r| > 0.75$)은 회귀분석에서 제외하였다. 회귀분석은 통계분석 소프트웨어 R (ver 4.3.1)을 사용하여 수행하였으며, 변수 간 관계를 평가하기 위해 피어슨 상관분석을 병행하여 상관계수를 확인하였다(Table 3). 최종적으로 Bio3, Bio5, Bio7, Bio12, Bio13, Bio14 등 6개 변수가 선발되었다. 이를 활용하여 RCP 4.5와 RCP 8.5의 두 가지 다른 시나리오에 따른 잠재 분포 변화를 비교하여 까치박달의 자생지 변화를 예측하였다. RCP 4.5는 온실가스 감축 정책이 대폭 실현되는 것을 가정한 기후변화 시나리오이며, RCP 8.5는 현재 추세대로 온실가스가 배출되는 것을 가정한 기후변화 시나리오이다.

3. 종 분포 예측 모형 및 정확도 검증

까치박달의 출현 데이터와 기후변수를 활용하여 Maximum Entropy Modeling (MaxEnt) 모형을 구축하였다. 모형 검증을 위하여 Training data와 Test data를 15회 반복 설정하였다. 모형 예측 정확도는 Receiver Operating Characteristics Analysis(ROC)의 Area Under the Curve(AUC) 값으로 판정하였다. 유의성을 평가하기 위해 독립 표본 t-검정을 사용한 AUC 값이 0.5에서 0.7 사이이면 모형 성능이 신뢰도가 낮은 것으로 간주하고, 0.7에서 0.8 사이이면 모형 성능의 신뢰도가 높다는 연구를 바탕으로 검증하였다(Swets 1988).

분석 과정에서 임계값을 기준으로 시기별 까치박달의 자생지를 도출하였으며, 이를 위해 공간변수를 활

용한 데이터를 기반으로 연평균 기온, 연평균 강수량, 연평균 등온선의 평균값을 산출하였다. 이러한 변수들을 통해 기후변화가 까치박달의 분포에 미치는 영향을 분석하였다.

4. 자료의 통계처리

실험 결과의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 통계 분석 소프트웨어 SPSS (ver. 30)를 사용하여 데이터를 분석하였다. 검정 방법은 독립표본 t 검정을 사용하여 $p < 0.05$ 수준의 유의성을 검정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 까치박달 자생지의 환경 특성

연평균 기온은 까치박달의 자생지 10.4°C, 한반도 11.3°C로 확인되었다(Figure 2). 까치박달의 자생지는 한반도와 비교하여 0.9°C로 통계적 유의성이 확인되었다. 연평균 강수량은 까치박달의 자생지 1,296.1mm, 한반도 1,292.1mm로 확인되었다. 까치박달의 자생지 강수량은 한반도의 강수량과 비교하여 4.0mm 차이로 통계적 유의성은 확인되지 않았다(Figure 3). 연평균 등온선 값은 까치박달의 자생지는 28.2°C, 한반도는 28.1°C로 확인되었다. 까치박달의 자생지 등온선 값은 한반도 등온선 값과 비교하여 0.1°C 차이로 통계적 유의성은 확인되지 않았다(Figure 4). 까치박달은 고도 500~2,500m의 그늘진 경사면, 계곡이 혼합된 산림지역에 분포한다(Zhao et al. 2019). 한라산에서는 고도가 100m 증가할 때마다 기온이 평균적으로 약 0.58°C 낮아지는 것이 보고되었다(Kong 1999). 이러한 고도 특성이 자생지의 낮은 기온을 설명하는 중요한 요인이다.

2. 모형의 정확도 및 환경변수 기여도

본 연구에서 사용한 MaxEnt 모형의 정확도는 독립 표본 t-검정을 사용한 AUC 값으로 나타내었다. 측정 결과 까치박달의 AUC 값은 0.717로 높은 신뢰성을 지니는 것으로 확인되었다(Figure 5). 까치박달의 현재 분포에 관여하는 환경변수는 MaxEnt의 알고리즘에 의한 기여도 평가로 분석하였다. 환경변수 중 Bio5에서 52.3%의 가장 높은 기여율을 보였으며, Bio7, Bio12,

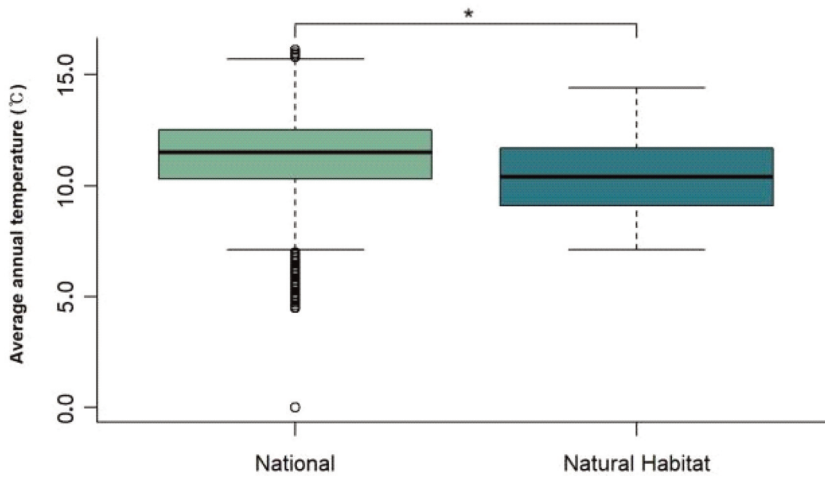


Figure 2. Average annual temperature in *C. cordata* habitat (* p<0.001).

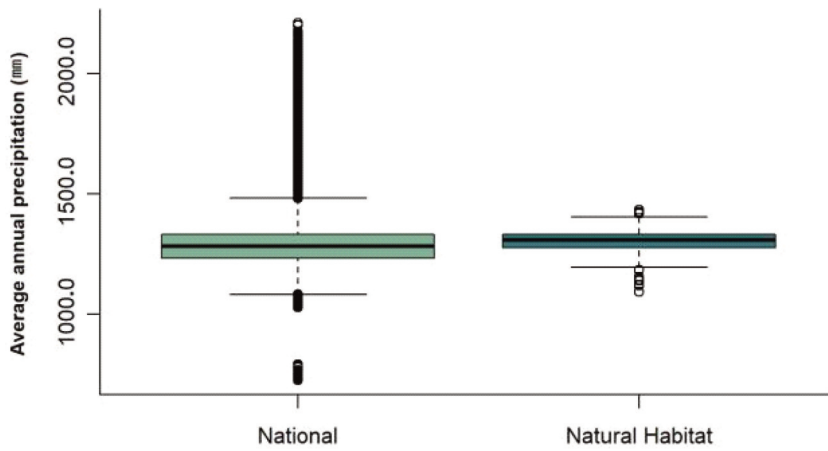


Figure 3. Average annual precipitation in *C. cordata* habitat.

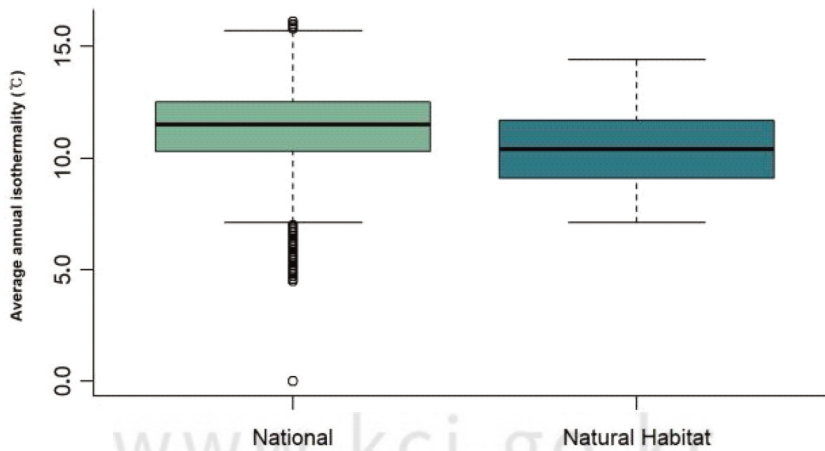


Figure 4. Average annual isothermality in *C. cordata* habitat.

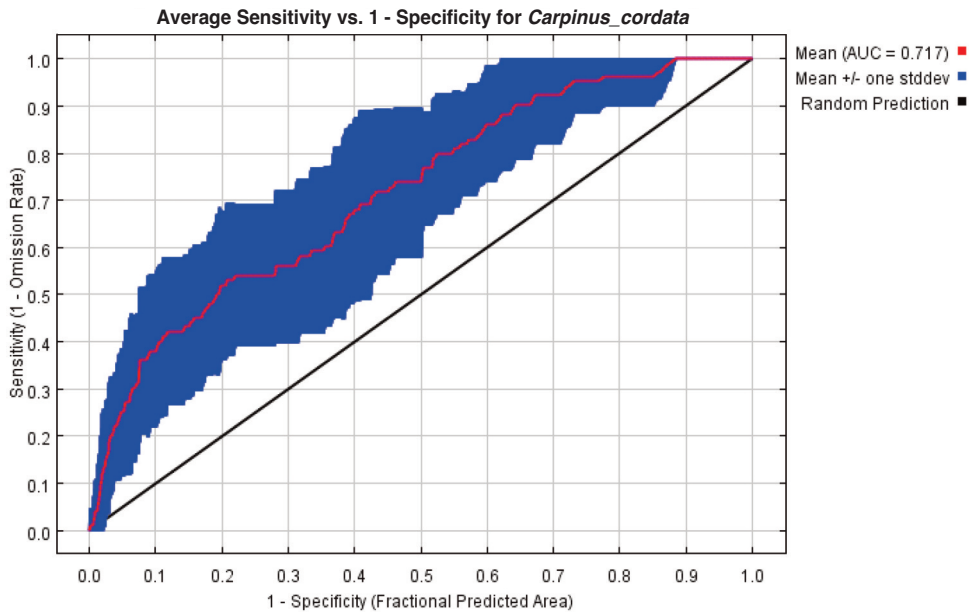


Figure 5. The AUC value for the prediction of potential habitat by the MaxEnt model.

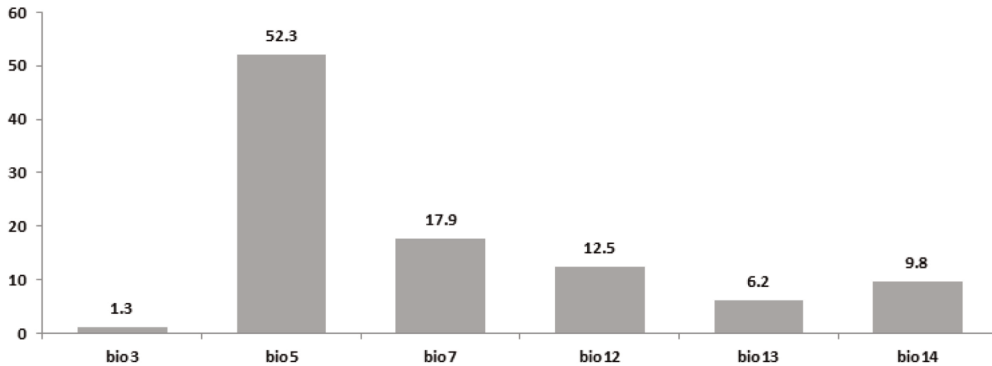


Figure 6. The contribution percentage of environmental variables by the MaxEnt model.

Bio14, Bio13, Bio3의 순으로 기여율을 나타내었다 (Figure 6).

3. RCP 4.5 시나리오에 따른 생물기후 변화

연평균 기온은 까치박달의 자생지에서 2030년에 11.2°C, 2050년 11.4°C, 2070년 11.1°C로 분석되었다. 연평균 강수량은 2030년에 1,414.2mm, 2050년 1,458.9mm, 2070년 1,284.5mm로 분석되었다. 등온선 값은 2030년에 27.8°C, 2050년에 27.6°C, 2070년에 27.8°C로 분석되었다. 한반도의 연평균 기온은 2030년에 13.2°C, 2050년에 14.0°C, 2070년에 14.8°C로 분석되었다. 연평균 강

수량은 2030년에 1,351.2mm, 2050년에 1,430.4mm, 2070년에 1,292.4mm로 분석되었다. 등온선 값은 2030년에 26.6°C, 2050년에 26.4°C, 2070년에 26.8°C로 분석되었다.

까치박달의 자생지는 한반도와 평균값을 비교하여 연평균 기온은 2030년에 -2.0°C, 2050년에 -2.6°C, 2070년에 -3.7°C로 점차 감소하는 경향을 보인다. 연평균 강수량은 2030년에 63.0mm, 2050년에 28.5mm, 2070년에 -7.9mm로 점차 감소하는 경향을 보인다. 등온선 값은 2030년에 1.2°C, 2050년에 1.2°C, 2070년에 1.0°C 높은 것으로 분석되었다.

Table 4. Climate information of *C. cordata* habitat by RCP scenarios

Climate variables	Current	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2030	2050	2070	2030	2050	2070
Temperature (°C)	10.4	11.2	11.4	11.1	11.0	11.5	12.1
Precipitation (mm)	1,296.1	1414.2	1458.9	1284.5	1423.9	1538.0	1572.3
Isothermality (°C)	28.2	27.8	27.6	27.8	27.4	27.6	27.5

Table 5. Changes in the potential distribution areas of *C. cordata* by climate change scenarios

Scenario	Period	Area (km ²)	Loss (%)
RCP 4.5	Current	41,914	0.0
	2030	34,053	18.8
	2050	30,939	26.2
	2070	17,203	59.0
RCP 8.5	2030	28,306	32.5
	2050	19,758	52.9
	2070	9,857	76.5

4. RCP 8.5 시나리오에 따른 생물기후 변화

연평균 기온은 까치박달의 자생지에서 2030년에 11.0°C, 2050년에 11.5°C, 2070년에 12.1°C로 분석되었다. 연평균 강수량은 2030년에 1,423.9mm, 2050년에 1,538.0mm, 2070년에 1,572.3mm로 분석되었다. 등온선 값은 2030년에 27.4°C, 2050년에 27.6°C, 2070년에 27.5°C로 분석되었다. 한반도의 연평균 기온은 2030년에 13.4°C, 2050년에 14.9°C, 2070년에 16.2°C로 분석되었다. 연평균 강수량은 2030년에 1,387.6mm, 2050년에 1,439.6mm, 2070년에 1,480.7mm로 분석되었다. 등온선 값은 2030년에 26.4°C, 2050년에 26.5°C, 2070년에 26.5°C로 분석되었다(Table 4).

까치박달의 자생지는 한반도와 평균값을 비교하여 연평균 기온은 2030년에 -2.4°C, 2050년에 -3.4°C, 2070년에 -4.1°C로 점차 감소하는 경향을 보인다. 연평균 강수량은 2030년에 36.3mm, 2050년에 98.4mm로 증가하다가 2070년에 91.6mm로 감소하였다. 등온선 값은 2030년에 1.0°C, 2050년에 1.1°C, 2070년에 1.0°C 높은 것이 분석되었다.

5. 잠재 자생지 변화

본 연구에서 한반도 내 예측된 현재 기후의 자생지는 41,914km²이다. RCP 4.5 시나리오에서 2030년 34,053

km², 2050년 30,939km², 2070년 17,203km²로 예측되었다(Table 5). 또한, RCP 8.5 시나리오에서 2030년 28,306 km², 2050년 19,758km², 2070년 9,857km²로 예측되었다(Table 5).

한반도에 분포하는 까치박달은 기후변화에 의해 2070년까지 잠재 자생지의 분포면적은 전반적으로 감소하였다. 현재의 추세대로 온실가스를 배출하는 RCP 8.5 시나리오보다 저감 정책을 실현하는 RCP 4.5 시나리오에서 분포면적의 감소는 완만하였다.

까치박달의 자생지는 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 동일하게 백두대간을 따라 북동쪽 방향으로 이동하는 양상을 보인다(Figure 7). 북방계 식물인 눈썹백, 나도국수나무, 갈기조팝나무는 백두대간을 따라 지리산에서 함경남도 산림지역으로 이동한다는 연구 결과가 보고되었다(Oh et al. 2010, Jung 2021). 본 연구는 한반도에 분포하는 까치박달의 잠재 자생지면적이 기후변화에 따라 점차 감소하며, 그 분포역이 북동쪽으로 이동하는 경향을 나타내는데, 이는 선행연구 결과와 일치하였다(Oh et al. 2010, Jung 2021).

IV. 결론

본 연구는 국립생물자원관에서 제공한 까치박달의

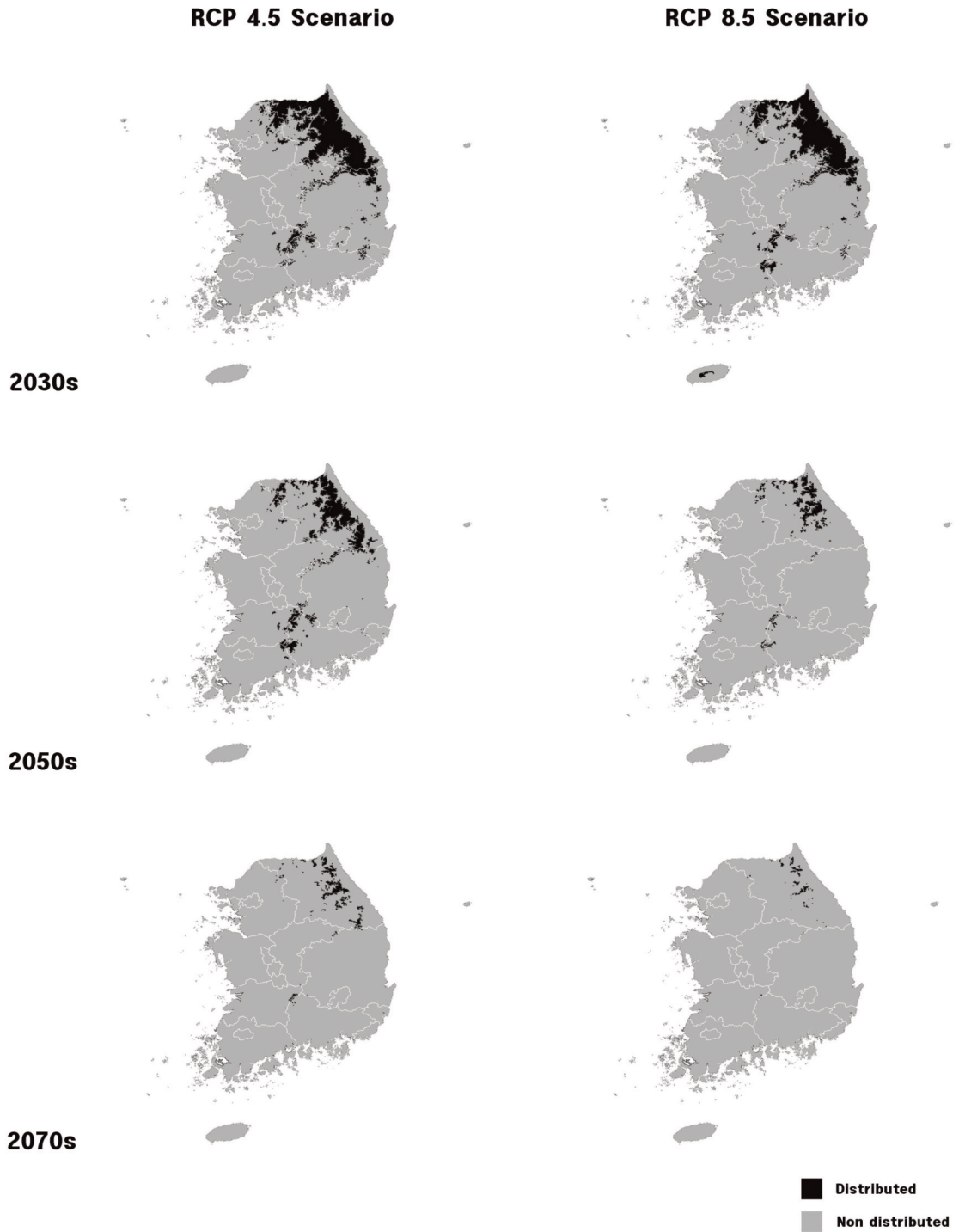


Figure 7. Potential distribution map of *C. cordata* based on thresholds by RCP scenarios.

GPS 위치 데이터(137지점)와 WorldClim v2.1의 기후 데이터를 결합하여 MaxEnt 모형을 통해 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 의한 미래의 종 분포 확산 예측을 검증하였다. 까치박달의 잠재 자생지는 Bio5(최고기온), Bio7(온도 연교차), Bio12(연간 총 강수량)의 환경변수가 가장 중요한 변수로 나타났다. 자작나무과의 경우, 꽃가루 생산을 포함한 생리적 기능은 기온 상승에 따라 제한될 수 있으며, 강수량에 민감하게 반응하고 성장에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Mercuri et al. 2016, Zhang et al. 2014). 본 연구 결과에서 까치박달의 자생지는 한반도의 평균 고도보다 높은 것으로 나타났으며, 까치박달의 자생지의 높은 고도로 인한 두 지역 간 기온의 차이가 확인되었다. 까치박달은 기후변화에 따라 자생지의 고도가 점차 높은 지역으로 이동할 가능성이 제기되었으며(Zhao et al. 2019), 본 연구 결과와 동일한 경향을 보였다. 기후변화로 저지대의 식물들이 고지대로 자생지를 확장하면서, 고지대 식물들은 새로운 환경에 적응하거나, 더 적합한 새로운 서식처를 찾아 이동해야 할 필요성이 제기되고 있다(Kong 1998). RCP 시나리오에서 기간이 지날수록 외래식물인 실망초, 청비름의 면적이 점차 확산되며(Lee et al. 2015, Lee et al. 2018), 분비나무, 구상나무는 기후변화 민감성 평가에 따라 잠재 자생지 면적은 감소하였다(Park et al. 2015). 기후변화의 속도가 가속화될 경우, 이동성이 높은 식물은 혜택을 받지만, 이동성이 낮은 식물은 생존 가능성을 위협한다(Corlett & Westcott 2013). 그러므로, 한반도의 평균 고도보다 높은 곳에서 확인된 까치박달의 자생지는 기후변화에 따른 감소 및 이동 가능성이 예측된다.

RCP 4.5 시나리오에서는 온실가스 감축 정책이 일정 부분 실현됨에 따라 까치박달의 잠재 자생지가 시간이 지남에 따라 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 반면, RCP 8.5 시나리오에서는 온실가스 배출이 계속 증가하여 기후변화가 가속화됨으로써, 까치박달의 잠재 자생지 감소는 가속화될 것으로 예측되었다. 우리나라는 급속한 경제성장에 의한 온실가스 배출 증가로 직접적인 영향을 받을 것으로 전망되고 있다(Park et al. 2015). 이러한 결과는 기후변화로 인한 자생지 감소와 파편화로 인한 개체군 풍부도 감소, 유전적 다양성 감소, 단순

화된 영양 구조, 종간 상호 작용이 변화할 것으로 보고되었다(Fahrig 2003, Fischer & Lindenmayer 2007). 따라서 기후변화의 영향을 이해하고 부정적 영향을 최소화하기 위한 적응 대책 수립이 필요하다고 보고되었으며(KMA 2014), 여러 분야에서 기후변화 적응 계획과 정책 개발이 시작되고 있다(IPCC 2014).

본 연구는 기후변화가 까치박달과 같은 기후 민감성이 높은 종의 자생지 변화에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 시사한다. 특히, Bio5, Bio12 변수가 까치박달의 자생지 변화에 중요한 역할을 한다는 점에서, 기후변화 시나리오에 따른 기온 및 강수량의 변화가 까치박달의 자생지 보전에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

또한, RCP 4.5 시나리오에 비해 RCP 8.5 시나리오에서 자생지 감소는 더욱 가속화되는 것으로 나타나, 기후변화에 대한 적극적인 대응이 절실하다는 결론을 도출할 수 있었다. 따라서, 까치박달의 장기적 보전을 위해서는 기후변화 대응 정책을 개발하고, 자생지 보전과 복원에 대한 전략적 접근이 필요하다.

본 연구는 한반도 내 까치박달의 잠재 서식지 변화를 예측하고 기후변화 시나리오에 따른 잠재적 위험을 평가함으로써, 기후변화에 대한 효과적인 대응 방안을 마련하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 특히 까치박달의 자생지가 특정 기후 조건에 적합하며, 잠재 분포 예측 모델(MaxEnt)의 변수 선택 근거를 명확히 하여 기후변화에 따른 보전 전략 수립을 위한 기초자료를 제공하였다. 또한 향후 기후변수와 환경변수 등을 추가 연구함으로써 앞으로 다가올 기후변화에 따른 까치박달의 자생지 보전 및 관리 대책을 마련하는데 중요한 자료로 활용될 것으로 기대한다.

References

- Adhikari P, Jeon JY, Kim HW, Shin MS, Adhikari P, Seo C. 2019. Potential impact of climate change on plant invasion in the Republic of Korea. *J Ecol. Environ.* 43(1): 1-12.
- Aguilar-Rodríguez S, Terrazas T, Lopez-Mata L. 2006. Anatomical wood variation of *Buddleja cordata* (Buddlejaceae) along its natural range in Mexico.

- Trees. 20: 253-261.
- Buotte PC, Law BE, Ripple WJ, Berner LT. 2020. Carbon sequestration and biodiversity co-benefits of preserving forests in the western United States. *Ecol. Appl.* 30(2): e02039.
- Chen JW, Chen XS. 2016. No rosy picture for net-zero emissions goal by century end. *Sino-Glob. Energy.* 21(6): 1-7.
- Compant S, Van Der Heijden MG, Sessitsch A. 2010. Climate change effects on beneficial plant-microorganism interactions. *FEMS Microbiol. Ecol.* 73(2): 197-214.
- Corlett RT, Westcott DA. 2013. Will plant movements keep up with climate change? *Trends Ecol. Evol.* 28(8): 482-488.
- DellaSala DA, Mackey B, Norman P, Campbell C, Comer PJ, Kormos CF. 2022. Mature and old-growth forests contribute to large-scale conservation targets in the conterminous United States. *Front. For. Glob. Change.* 5: 979528.
- Etmiman M, Myhre G, Highwood EJ, Shine KP. 2016. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophys. Res. Lett.* 43(24): 12-614.
- Fahrig L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 34(1): 487-515.
- Fick SE, Hijmans RJ. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37(12): 4302-4315.
- Field CB, Van Aalst M, Adger WN, Arent D, Barnett J, Betts R, Yoh G. 2014. Part a: Global and Sectoral Aspects: Volume 1, global and sectoral aspects: Working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: *Clim. Change 2014, Impacts, Adapt. Vulnerability.*
- Fischer J, Lindenmayer DB. 2007. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 16(3): 265-280.
- Guzo S, Nemomissa S, Lulekal E. 2024. Predicting current and future distribution of wild edible *Syzygium afromontanum* (F. White) Byng. under climate change in Ethiopia. *Braz. J Bot.* 47(2): 563-576.
- Hatfield JL, Prueger JH. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather Clim. Extrem.* 10: 4-10.
- Huang SK, Kuo L, Chou KL. 2016. The applicability of marginal abatement cost approach: A comprehensive review. *J Clean. Prod.* 127: 59-71.
- IPCC. 2014. Summary for Policymakers. In: *Clim. Change 2014, Impacts, Adapt. Vulnerability.* Cambridge University Press.
- IPOC. 2007. Climate Change 2007: The physical science basis. *Agenda.* 6(07): 333.
- Jeon JY, Adhikari P, Seo C. 2020. Impact of climate change on potential dispersal of *Paeonia obovata* (Paeoniaceae), a critically endangered medicinal plant of South Korea. *Environ. Conserv.* 26: S145-S155.
- Jung JH. 2021. A study on the evaluation of climate change sensitivity of 100 taxa plants in the Korean Peninsula. Ph.D. dissertation. Daejin University, Gyeonggido. [Korean Literature]
- Colston JM, Ahmed T, Mahopo C, Kang G, Kosek M, Sousa Junior F, Shrestha PS, Svensen E, Turab A. 2018. Evaluating meteorological data from weather stations, and from satellites and global models for a multi-site epidemiological study. *Environ. Res.* 165: 91-109.
- Khanum R, Mumtaz AS, Kumar S. 2013. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using MaXent modeling. *Acta Oecol.* 49: 23-31.

- Kikuzawa K. 1983. Leaf survival of woody plants in deciduous broad-leaved forests. 1. tall trees. *Can. J Bot.* 61(8): 2133-2139.
- Koike T. 1990. Autumn coloring, photosynthetic performance and leaf development of deciduous broad-leaved trees in relation to forest succession. *Tree Physiol.* 7(4): 21-32.
- Kong WS. 1998. The alpine and subalpine geocology of the Korean Peninsula. *Korean J Ecol.* 21(4): 383-387. [Korean Literature]
- Kong WS. 1999. The vertical distribution of air temperature and thermal amplitude of alpine plants on Mt. Halla, Cheju Island, Korea. *J Korean Geogr. Soc.* 34(4): 385-393. [Korean Literature]
- KMA. 2012. Prospect Report of Climate Change in Korea. Korea Meteorological Administration. [Korean Literature]
- KMA. 2014. Korean Climate Change Assessment Report 2014. Korea Meteorological Administration. [Korean Literature]
- Kwon B, Heo N, Shin H, Kim HS, Park PS, Yi MJ. 2014. Nutrient use strategy of *Carpinus cordata* saplings growing under different forest stand conditions. *Korean J Agric. For. Meteorol.* 16(3): 188-196. [Korean Literature]
- Lee CB. 2003. Color Korean Plant Encyclopedia. Hyangmunsa Press. [Korean Literature]
- Lee YH, Oh YJ, Hong SH, Na CS, Na YE, Kim CS, Sohn SI. 2015. Predicting the suitable habitat of invasive alien plant *Conyza bonariensis* based on climate change scenarios. *J Clim. Change Res.* 6(3): 243-248. [Korean Literature]
- Lee YH, Hong SH, Na CS, Sohn SI, Kim MH, Kim CS, Oh YJ. 2018. Predicting the suitable habitat of *Amaranthus viridis* based on climate change scenarios by MaxEnt. *Korean J Environ. Biol.* 36(4): 672-679. [Korean Literature]
- Lee YG, Sung JH, Chun JH, Shin MY. 2014. Effect of climate changes on the distribution of productive areas for *Quercus mongolica* in Korea. *J Korean Soc. For. Sci.* 103(4): 605-612. [Korean Literature]
- Lindenmayer DB, Laurance WF, Franklin JF. 2012. Global decline in large old trees. *Science.* 338: 1305-1306.
- Madsen JD, Adams MS. 1988. The seasonal biomass and productivity of the submerged macrophytes in a polluted Wisconsin stream. *Freshw. Biol.* 20(1): 41-50.
- Mercuri AM, Torri P, Fornaciari R, Florenzano A. 2016. Plant responses to climate change: the case study of Betulaceae and Poaceae pollen seasons (Northern Italy, Vignola, Emilia-Romagna). *Plants.* 5(4): 42.
- Numata S, Yamaguchi K, Shimizu M, Sakurai G, Morimoto A, Alias N, Azman NZN, Hosaka T, Satake A. 2022. Impacts of climate change on reproductive phenology in tropical rainforests of Southeast Asia. *Commun. Biol.* 5(1): 311.
- Oh BU, Jo DG, Ko SC, Choi BH, Paik WK, Chung GY, Lee YM, Jang CG. 2010. 300 Target Plants Adaptable to Climate Change in the Korean Peninsula. Korea Forest Serv., Korea Natl. Arbor. Press. [Korean Literature]
- Park HC, Lee JH, Lee GG. 2014. Predicting the suitable habitat of the *Pinus pumila* under climate change. *J Environ. Impact Assess.* 23(5): 379-392. [Korean Literature]
- Park HC, Lee JH, Lee GG, Um GJ. 2015. Environmental features of the distribution areas and climate sensitivity assesment of Korean Fir and Khinghan Fir. *J Environ. Impact Assess.* 24(3): 260-277. [Korean Literature]
- Paraseth P, Banerjee K. 2024. Goat weed (*Ageratum conyzoides* L.): A biological threat to plant diversity in Eastern Ghats of India. *J Biosci.* 49(3): 72.
- Qureshi A, Jamil M. 2021. The footprint of industrialization

- on climate change. *J Bus. Econ.* 13(1): 95-112.
- Ramanathan V, Feng Y. 2009. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmos. Environ.* 43(1): 37-50.
- Riis T, Biggs BJ, Flanagan M. 2003. Seasonal changes in macrophyte biomass in South Island lowland streams, New Zealand. *N. Z. Dep. Sci. Ind. Res.*
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science.* 240: 1285-1293.
- Wang X, Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, Myneni RB, Cox P, Chen A. 2014. A two-fold increase of carbon cycle sensitivity to tropical temperature variations. *Nature.* 506: 212-215.
- Watling JI, Romanach SS, Bucklin DN, Speroterra C, Brandt LA, Pearlstine LG, Mazzotti FJ. 2012. Do bioclimate variables improve performance of climate envelope models? *Ecol. Model.* 246: 79-85.
- Zhang Y, Bielory L, Georgopoulos PG. 2014. Climate change effect on *Betula* (birch) and *Quercus* (oak) pollen seasons in the United States. *Int. J. Biometeorol.* 58: 909-919.
- Zhao RN, He QQ, Chu XJ, Lu ZQ, Zhu ZL. 2019. Prediction of potential distribution of *Carpinus cordata* in China under climate change. *Chin. J Appl. Ecol.* 30(11): 3833-3843.