



우리나라 산림·임업분야의 기후변화 영향 및 적응 시사점

박고은[†] · 김아름^{*} · 김수진^{**} · 천정화^{**} · 최형태^{**} · 장근창^{***} · 임종수^{****} · 이보라^{****} · 김동학^{*****} · 장영선^{*****} · 김철우^{*****} · 엄유리^{*****} · 김석주^{*****} · 안수정^{*****} · 유송^{***} · 남영우^{*****} · 정수영^{*****} · 박용환^{*****} · 박찬열^{*****} · 손동찬^{*****} · 조용찬^{*****} · 공예진^{*****} · 노희주^{*****}

[†]국립산림과학원 산림생태연구과 임업연구사, ^{**}국립산림과학원 산림생태연구과 임업연구관, ^{***}국립산림과학원 산사태연구과 임업연구사, ^{****}국립산림과학원 산림탄소연구센터 임업연구관, ^{*****}국립산림과학원 난대아열대산림연구소 임업연구사, ^{*****}국립수목원 산림생물보전연구과 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 산림미생물이용연구과 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 산림특용자원연구과 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 산림약용자원연구과 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 산림바이오소재연구소 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 산불연구과 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 산림병해충연구과 임업연구사, ^{*****}국립수목원 산림생물다양성연구과 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 생활권도시숲연구센터 임업연구관, ^{*****}국립수목원 DMZ산림생물자원연구과 임업연구사, ^{*****}국립산림과학원 산림생태연구과 석사연구원

Climate change impact and adaptation implications for the forest sector in the Republic of Korea

Park, Go Eun[†] · Kim, A Reum^{*} · Kim, Su-Jin^{**} · Chun, Junghwa^{**} · Choi, Hyungtae^{**} · Jang, Keunchang^{***} · Lim, Jongsu^{****} · Lee, Bora^{****} · Kim, Donghak^{*****} · Jang, Yeongseon^{*****} · Kim, Chul Woo^{*****} · Um, Yurry^{*****} · Kim, Seokju^{*****} · Ahn, Sujung^{*****} · Yu, Song^{***} · Nam, Youngwoo^{*****} · Jung, Su-Young^{*****} · Park, Yonghwan^{*****} · Park, Chan-Ryul^{*****} · Son, Dong Chan^{*****} · Cho, Yong-Chan^{*****} · Kong, Ye Jin^{*****} and Ro, Hee Ju^{*****}

^{*}Research Scientist, Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{**}Senior Research Scientist, Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{***}Research Scientist, Landslide Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{****}Senior Research Scientist, Forest Carbon Center on Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Research Scientist, Warm-Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Research Scientist, Forest Biodiversity Conservation Research Division, Korea National Arboretum, Pocheon, Korea

^{*****}Research Scientist, Forest Microbiology and Application Division, National Institute of Forest Science, Suwon, Korea

^{*****}Research Scientist, Special Forest Resources Division, National Institute of Forest Science, Suwon, Korea

^{*****}Research Scientist, Forest Medicinal Resources Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Research Scientist, Forest Biomaterials Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Research Scientist, Forest Fire Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Research Scientist, Forest Entomology and Pathology Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Research Scientist, Forest Biodiversity Research Division, Korea National Arboretum, Pocheon, Korea

^{*****}Senior Officials, Livable Urban Forests Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Research Scientist, DMZ Forest Biological Resources Research Division, Korea National Arboretum, Yanggu, Korea

^{*****}Research Assistant, Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

[†]Corresponding author : goeunpark@korea.kr (02455, 57, Hoegiro, Dongdaemungu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-961-2612)

ORCID 박고은 0000-0003-4686-2178	김석주 0000-0002-6869-8412
김아름 0000-0001-8637-3251	안수정 0000-0003-2769-4594
김수진 0000-0003-4050-5890	유 송 0000-0003-2529-4351
천정화 0000-0001-5455-5042	남영우 0000-0002-5450-9617
최형태 0000-0002-5472-9820	정수영 0000-0002-6755-1072
장근창 0000-0003-3132-2718	박용환 0000-0001-9997-9009
임종수 0000-0001-7316-6093	박찬열 0000-0003-3543-387X
이보라 0000-0002-6554-2252	손동찬 0000-0002-6773-0580
김동학 0000-0002-2437-5486	조용찬 0000-0003-4054-3328
장영선 0000-0001-7960-4306	공예진 0009-0007-7973-5462
김철우 0000-0001-8232-3046	노희주 0000-0001-7691-9054
엄유리 0000-0001-6697-9029	

Received: September 4, 2025 / Revised: September 29, 2025 1st, October 17, 2025 2nd / Accepted: October 27, 2025

ABSTRACT

This study assessed the impacts of climate change across six domains: mountain climate, forest resources, forest ecosystems, short-term income forest products, forest disturbances, and forest biodiversity. Key findings indicate a nationwide warming trend accompanied by altered precipitation patterns. These changes are driving northward movement of climate zones, with subtropical forests expanding into southern coastal regions, while subalpine evergreen coniferous forests, including Korean fir, are undergoing severe decline due to heatwaves and drought stress. Furthermore, the spread of invasive plants in coastal regions is exacerbating biodiversity loss. Forest phenology is changing, with earlier springs and delayed autumns extending the growing season. Carbon sequestration capacity varied by forest type, being highest in evergreen broad-leaved forests but lower in old-growth and disturbed stands. The study also revealed increases in the frequency and severity of forest disturbances such as fires, landslides, and pest outbreaks. Short-term income forest products-including medicinal resources, tree sap, mushrooms, and fruit-bearing trees are increasingly vulnerable to extreme weather events and warming temperature leading to reduced yields and disrupted harvest periods. The findings highlights the urgent need for adaptation strategies through policy, research, and field management perspectives to mitigate the accelerating impacts of climate change on each forest sectors.

Key words : Climate Change, Adaptation, Impact Assessment, Forest Sector, Sustainable Management

1. 배경 및 연구목적

장기적인 온난화와 극한기상의 발생 빈도 및 강도의 증가는 산림생태계의 구조와 기능에 변화를 일으키며, 이는 산림생태계서비스와 산림생물다양성에도 영향을 미친다(Holzarth et al., 2020; Kappelle et al., 1999; Lindner et al., 2010; Schldt et al., 2020).

기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 제2실무자 그룹이 작성한 제6차 종합보고서에서는 산림생태계서비스 소실을 예방·완화하기 위해서는 기후변화 적응 조치를 통한 산림의 회복력 증진 및 산림생태계서비스 보전이 시급함을 시사하였다(IPCC, 2022). 이미 가시화된 산림의 피해를 저감하기 위해 이행한 현장 관리 조치의 효과는 생애주기가 긴 산림의 특성에 따라 장기간에 걸쳐 나타나므로 보다 신뢰할 수 있는 정보에 기반한 의사결정이 요구된다.

기후변화 영향평가 및 취약성 평가 결과는 과학적 근거에 기반한 기후변화 적응 의사결정을 지원할 수 있는 주요한 정보이다(Edwards et al., 2015; Keenan, 2015; Mimura et al., 2014; Siders and Pierce, 2021).영국의 경우 기후변화법(2008년 발효)에 의거하여 매 5년 기후변화 리스크를 평가(CCRA, Climate Change Risk Assessment)하여 결과 보고서를 발간하고 있다. 2022년에 발간된 제3차

보고서(2012년에 제1차 보고서, 2017년에 제2차 보고서 발간)는 실질적인 적응관리 조치를 위한 의사결정 지원을 고려하여 리스크와 기회의 평가를 보강했다(HM Government, 2022). 캐나다도 2008년 지속가능한 산림관리(SFM, Sustainable Forest Management)를 위해 기후변화와 미래 기후요인들을 고려해야 함을 선언하였다. 그리고 기후변화 리스크를 최소화하는 동시에 이익을 최대화하기 위해 캐나다산림장관협의회(CCFM, Canada Council of Forest Ministers)에서 기후변화 실무자그룹을 조성하고 임업의 기후변화 적응에 대해 지방정부와 협력하여 산림을 관리하고 있다(Edwards et al., 2015; Williamson et al., 2012). 2008년부터 2010년까지 다양한 수종에 대한 종합적인 평가와 적응을 위한 관리 옵션 도출을 시도한 이후 2011년부터는 산림생태계와 산림분야 전반에 대한 평가를 통해 산림분야 종사자들이 적합한 도구와 최신의 정보를 활용하여 더 나은 의사 결정을 할 수 있도록 지원하는 것을 목표로 취약성 평가를 수행하고 있다(Edwards et al., 2015).

우리나라는 법정계획인 국가기후위기적응대책의 근거가 되는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제38조에서 부문별, 지역별 기후위기의 영향과 취약성 평가, 기후위기 적응대책에 관한 사항을 포함하도록 명시하고 있다(제2항).

산림부문의 경우, 2015년, 「농업·농촌 및 식품산업기본법」 제47조의2 및 같은 법 시행령의 신설로 임업분야의 기후변화 영향과 취약성을 평가하는 의무가 법제화된 것을 계기로 적응 정보 산출을 위한 구체적인 제도적 기반을 갖추게 되었다. 신설된 법의 주요 내용은 매년 기후변화 영향 실태를 조사하고 기후변화 영향과 취약성을 5년마다 평가하여 공표함으로써 기후변화 적응 의사결정을 지원하는 과학적인 정보를 산출하는 것이다. 같은 법 시행규칙에서는 임업분야에 대한 기후변화 영향 취약성 평가의 의무를 산림청장에게 위임하였고, 산림청에서는 이를 국립산림과학원장에게 재위임하였다(산림청고시 제2017-14호). 또한 2019년 「산림자원의 관리에 관한 법률」 제51조의5를 신설함으로써 산림부문의 기후변화 영향평가의 법적 기반을 강화하였으며, 국립산림과학원은 국립수목원과 함께 전국 단위에서 산림·임업분야의 영향을 체계적으로 평가하기 위한 조사 및 평가 방법론을 정립하였다.

본 논문은 산림청이 산림·임업부문의 세부분야별 표준화한 방법으로 실태조사한 결과를 토대로 실시한 기후변화 영향 평가의 주요한 결과를 요약 정리하고, 평가 결과를 토대로 적응의 시사점을 정책·연구·현장관리의 측면에서 제시하였다.

2. 산림·임업부문의 세부분야별 평가 방법

우리나라 산림·임업부문은 위의 두 관계법을 준용하여 Table 1과 같이 6대 부문(산림기상, 산림자원, 산림생태계, 단기소득임산물, 산림교란, 산림생물다양성) 17개 세부분야로 구분하여 Table 2와 같이 기후변화 영향실태를 조사하고 평가하였다(NIFoS, 2023; Park et al., 2023).

산림기상은 우리나라 산림지역의 기상특성을 파악하기 위해 산림청에서 운영 중인 산악기상관측망 중 2018년부터 2022년까지 자료가 연속적으로 존재하는 156개 관측 지점의 기온과 강수량 자료를 평가의 자료로 활용하였다(NIFoS, 2020). 과거 기상의 평균상태(평년, '81~'10년) 대비 현재의 산림지역 기상특성 변화를 분석하고 기상청이 제공하는 최근 20년간('00~'19년) 전국 평균기온(11.9℃) 대비 2090년대까지 우리나라 산림지역 내 기상의 중장기 변화를 분석하였다.

산림의 임목자원의 기후변화 영향 평가를 위하여 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)에서 수집된 수종별 연륜생장 자료를 활용하여 기후변화가 임상 및 수

종 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 국가산림자원조사는 산림청이 1971년부터 주기적으로 우리나라 산림현황 및 변화를 파악하기 위해 실시하고 있는 전국단위 조사로 제5차 조사('06~'10년)부터는 고정표본점에서 임목자원 뿐 아니라 조사구내 모든 수종과 출현 식물종에 관한 자료를 수집하고 있으므로 각 종의 현존 분포 자료로서의 활용가치가 있다.

산림생태계 부문에서는 기후변화에 취약한 아고산 상록침엽수림, 산림수문, 산림생태계의 탄소흡수능력, 산림식물계절에 대한 기후변화 영향평가를 실시하였다. 구상나무, 분비나무 등을 포함하는 아고산 상록침엽수림의 전국단위 분포 및 생육 현황의 변화를 조사·분석하고, 기후변화 시나리오(SSP)에 따른 잠재 생육 가능면적의 변화를 전망하였다. 산림수자원의 변화를 평가하기 위해 16개의 산림수문 분야 기후변화 영향 평가 지표(연유출량, 10일 단위의 최대·최저 유출량, 갈수·홍수 발생 횟수 등)를 선정하였고, 국립산림과학원의 전국 산림수자원 유역시험지에서 장기 강우-유출 시계열 자료를 보유하고 있는 21개 시험유역 대상으로 실태를 조사하였다. 또한 분포형수문-토양-식생모델 “DHSVM” (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)(Wigmosta et al., 1994)을 기반으로 산림수문 과정을 반영할 수 있도록 모델 알고리즘을 개선하여 개발된 산림수문 장기 예측 모델을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 기후변화영향 평가 지표를 장기 전망하였다('23~'80년). 산림생태계의 탄소흡수능력은 국립산림과학원이 산림생태계 유형을 고려하여 8개 지점(광릉 활엽수림, 광릉 전나무림, 평창 활엽수림, 안면도 소나무림, 흥천 낙엽송림, 완도 난대상록활엽수림, 제주 활엽수혼효림, 삼척 소나무림)에서 관측한 산림생태계 플릭스 자료를 활용하여 평가하였다. 산림생태계 플릭스 관측 자료로 순생태계탄소교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE), 즉 산림생태계의 탄소 흡수·배출을 반영하는 지표를 산출하였다. 전국 단위 산림식물계절의 변화를 분석하기 위해서 2009년부터 10개의 수목원에서 15 수종을 대상으로 현장관측한 자료와 과거 20년간('03~'22년) 1 km 공간해상도의 MODIS 위성영상을 활용하였다.

기후변화가 단기소득임산물에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 각 임산물의 생장, 생산량 및 품질에 영향을 미치는 기후인자와 이에 대한 작물의 반응기작 구명이 선행되어야 한다. 이를 위해 2018년부터 버섯류, 산림과수, 산림약용자원, 수액류에 해당하는 작물들을 대상으로 임가 소득에 차지하는 비중과 기후변화에 민감한 정도를 고려

Table 1. The detailed-sectors of climate change impact assessment in the forest sector
(rearranged from Lim et al., 2017)

Classification	Detailed-Sectors
Forest Meteorology	Extreme climate events in the Forest
Forest Resources	Forest biomass resources and seed production
Forest Ecosystem	Forest Ecosystem Vulnerable to Climate Change
	Forest Hydrology
	Forest Productivity (Carbon Squestration Capacity)
	Forest Plant Phenology
Non-timber Products	Mushrooms
	Forest Fruit Trees
	Medicinal Forest Resources
	Tree Sap
Forest Disturbances	Forest Fires
	Landslides
	Forest Pests
Forest Biodiversity	Forest Plants
	Forest Insects
	Forest Wildlife
	Invasive Alien Plants

Table 2. Methodology on climate change impact investigation and assessment of the forest sector

Classification	Detailed-Sectors	Investigation	Assessment
Forest Meteorology	Extreme climate events in the Forest	Monitored temperature, precipitation from 156 automated weather stations within mountain meteorological observation network from 2018 to 2022	Analyzed the medium-long-term meteorological changes in forest area, projected weather patterns up to the 2090s
Forest Resources	Forest biomass resources and seed production	Examined the impact on forest stand and tree species distribution using National Forest Inventory data	Analyzed the impact on forest stand and tree species distribution using climate change scenarios
Forest Ecosystem	Forest Ecosystem Vulnerable to Climate Change	Examined distributions and growth conditions of subalpine evergreen coniferous forests	Projected the changes in the potential distribution ranges of subalpine evergreen coniferous forests using SSP scenarios
	Forest Hydrology	Monitored sixteen indicators maximum and minimum runoff per year and every 10 days, the number of drought and flood events	Projected the climate impact indicators' changes during 2023 ~ 2080 using SSP scenarios
	Forest Productivity (Carbon Squestration Capacity)	Monitored the forest ecosystem flux from eight forest types	Analyzed the Net Ecosystem Exchange (NEE) of forest
	Forest Plant Phenology	Monitored leaf-out, flowering, pollen dispersal periods for 15 species in 10 arboretums	Analyzed the changes in forest plant phenology

Classification	Detailed-Sectors	Investigation	Assessment
Non-timber Products	Mushrooms	Examined annual <i>Lentinula edodes</i> production	Analyzed the changes in shiitake mushroom production due to climate factors
	Forest Fruit Trees	Monitored forest fruit tree(<i>Castanea crenata</i> , <i>Diospyros kaki</i> , <i>Ziziphus jujuba</i> , <i>Juglans regia</i>) cultivation area, leaf-out, and flowering	Analyzed the changes in phenology of forest fruit tree and suitable distribution changes of cultivation
	Medicinal Forest Resources	Monitored habitats area for <i>Angelica gigas</i> , growth and physiological effects of <i>Cnidium officinale</i>	Analyzed the physiological effectiveness for <i>C. officinale</i> and projected the changes in habitat area for <i>A.gigas</i> using SSP scenarios
	Tree Sap	Monitored sap production volume, sap tapping periods of <i>Acer mono</i> , and microclimatic factors	Analyzed the changes in sap tapping and onset of sap flow production
Forest Disturbances	Forest Fires	Monitored year of occurrences, number of incidents, and impacted areas	Projected the future probability of forest fire using HAPPI and SSP scenarios
	Landslides	Analyzed a multivariate regression model with 7 key rainfall indicators: mean annual rainfall totals, number of days with heavy rainfall, rainfall intensity, and maximum rainfall over a 5-day period	Analyzed the impact of climate change on landslide damage areas using SSP scenarios
	Forest Pests	Monitored emergence and peak-activity periods, occurrence area	Analyzed changes in occurrences patterns of 4 major domestic and sporadic forest pests
Forest Biodiversity	Forest Plants	Examined species richness for 93 northern plant species and 90 southern plant species	Projected the shift of plant diversity hotspots and areas of reduced diversity under SSP scenarios
	Forest Insects	Monitored changes in moth species composition at 18 sites at intervals of 12~36 years and examined the impact of climate change on forest insects	Analyzed the changes in the community temperature index values and the impact of climate change on forest insects
	Forest Wildlife	Monitored habitats of forest mammals and birds during the breeding (spring) and non-breeding (autumn) seasons in 7 area within Backdudaegan mountain range and on Mt. Hallasan	Analyzed the diversity and populations of birds, activity level of forest mammals
	Invasive Alien Plants	Surveyed 195 taxa of alien plants	Projected the future distribution-range shifts toward suitable habitats under SSP scenarios

하여 주산지 내 고정조사구를 설치하고 작물을 모니터링 하여 각 작물의 생산량 및 품질에 영향을 미치는 기후인자, 임계점 등을 파악하기 위한 분석을 하였다.

산림의 주요 교란 요인인 산불, 산사태, 산림병해충 분야의 경우, 산불과 산사태는 발생연도, 발생건수, 면적 등 관련 통계자료를 활용하여 주요 기상요인을 분석하고 미래 산불, 산사태 발생 가능성을 예측하였다. 산림병해충은

발생이력, 발생면적 등의 자료와 기계학습법을 활용하여 현재 발생위험도를 산출하고 미래의 발생위험도를 예측하였다.

산림생물다양성 부분에서는 산림식물, 산림곤충, 산림동물과 침입외래식물을 대상으로 현장 모니터링에서 수집된 위치 자료와 종 분포 모델을 활용하여 기후변화 영향평가를 수행하였다.

3. 기후변화 영향평가 결과

3.1. 산악기상

과거 평년('81 ~ '10년) 평균기온에 기온감율효과를 적용하여 산출한 산림지역의 평년값은 10.1℃로 고도가 낮은 생활권 소재 45개 기상청 관측소 자료로 생산한 남한 전체 평년 평균기온(12.5℃)보다 약 2.4℃ 낮게 나타났다. 최근 5년('18 ~ '22년)간 기온은 평년 대비 대체로 높았고, 특히 겨울철(12 ~ 2월)과 봄철(3 ~ 5월)의 기온이 높았다. 평년 대비 기온상승폭은 평균기온 0.4 ~ 1.0℃, 최고기온 0.1 ~ 0.8℃, 최저기온 1.0 ~ 1.6℃을 보였다. 최근 5년간 강수량의 월 변동성이 컸고, 대체로 겨울철부터 봄철까지의 강수량이 평년보다 적은 반면 여름철에는 집중호우가 수차례 발생하였다. 2020년 최장 장마를 기록하고 2021년과 2022년 집중호우 및 태풍으로 평년(1,210.1 mm)보다 강수가 많았다. 기후변화 시나리오를 적용한 미래 변화를 전망한 결과, 평균기온은 2090년대에 1.5℃(SSP1-2.6 적용)에서 최대 5.8℃(SSP5-8.5 적용)까지 상승하여 2000 ~ 2019년 전국 평균기온 상승(1.9 ~ 6.3℃)과는 차이가 있으나 지속적으로 증가할 것으로 전망되었다. 강수량은 SSP1-2.6 시나리오에서 2060년대 1,549.7 mm까지 증가한 후, 2090년대 1,431.6 mm로 감소하는 반면 SSP5-8.5 시나리오에서는 2090년대에 1,670.1 mm까지 지속적으로 증가할 것으로 전망되었다.

3.2. 산림자원

침엽수림이 전국 산림에서 차지하는 면적비율이 1980년에 49.5%였으나, 2010년에 40.5%, 2020년에 36.9%로 감소하고, 지난 10년간 소나무 순림 중 약 25%가 혼효림으로 변화하는 추세를 보였다. 난대수종에 속하는 동백나무의 출현지역이 제주, 전라남도에서 경상남도 남부지역으로 확장되고, 중가시나무 성목이 출현하는 평균 위도가 2010년에 33.40°에서 2020년 33.51°로 북상하였다. 또한 평균기온이 상승함에 따라 기후대가 북상하며, 평균기온이 4℃ 상승할 때 제주 대부분 지역과 남해안 일대가 아열대림으로 전환될 것으로 전망되었다.

3.3. 산림생태계

기후변화의 직접적인 영향으로 쇠퇴 위협을 받고 있는 아고산 상록침엽수림의 경우, 우리나라 고도 1,000 m 이

상인 지역에 고립되어 분포하고 있는 구상나무, 분비나무 등의 개체군 존속이 어려울 것으로 평가되었다. 구체적으로 4년간('16년 대비 '20년) 덕유산 구상나무와 태백산 분비나무의 입목쇠퇴도가 각각 29.6%, 77.3% 증가하였고, 고사나 진계생장으로 소실되는 어린나무의 개체수 대비 새로 발생하는 개체의 수가 적어 전체 어린나무의 개체수가 감소하거나 진계생장(입목이 성장하여 일정크기 이상의 생육단계로 진입하는 것을 의미)이 제한적이었다. Park et al. (2022)은 이와 같은 입목쇠퇴도의 증가가 어린나무 개체수 감소에 영향을 미쳐 해당 개체군의 구조적 존속을 어렵게 할 것이라고 평가하였다. 미래기후에서 생육가능면적이 감소하는 정도는 수종별로 상이하었는데, 눈잣나무, 가문비나무, 분비나무, 눈썬백, 주목, 눈향나무, 구상나무의 순으로 감소하며, 구상나무, 분비나무의 2050년대 생육 가능 면적은 현재 대비 각각 최대 16.2%, 81.2% 감소할 것으로 전망되었다. 눈잣나무와 가문비나무의 경우 2050년대에 남한에서는 생육하기에 적합한 기후환경이 절멸할 것으로 전망되었다. 이는 아고산 상록침엽수들의 잠재 서식 가능 면적이 점차 줄어들 것으로 예상한 기존의 연구와 같은 경향을 보인 것이다(Adhikari et al., 2018; Lee et al., 2020).

산림수문의 경우 최근 10년간('12 ~ '21년) 연도별 연유출량이 동기간 평균의 20.3 ~ 239.4%에 달하는 등 대부분의 평가지표에서 변동성이 매우 컸으며, 이는 극한호우 및 지역적 가뭄 발생 영향에 의한 것으로 판단된다. 최근 10년을 전·후반기 5년씩으로 구분하여 16개 산림수문 분야 기후변화 영향 평가 지표 시간경과에 따른 변화를 분석한 결과, 전반기에 비해 후반기에 연유출량, 순별 최대·최소 유출량, 유량변동계수 등 유출량 관련 지표가 4.4%에서 216.2%까지 증가하였다. 지난 10년간 산림유역에서는 전반적으로 유출량은 증가하였으나 홍수 발생의 규모와 기간이 현저히 늘어나고 지역적으로 가뭄이 빈발하는 등 산림수문 현상의 변동성이 크게 증가한 것으로 나타났다. 향후 기후변화로 인한 강수량 부족과 증발량 증가로 인해 연유출량 감소 경향은 2030년대에 가장 클 것으로 예상되며('10년대 대비 32% 감소), 이후 2070년대까지 지속될 것으로 전망되었다. 장기 가뭄이 반복적으로 발생할 우려가 높아지며, 1년 중 최소, 최대 및 기간별 유출량의 변동성이 현저히 커지고 지역적인 불균일성이 더욱 심화될 것으로 예상되었다. 또한 연유출량의 감소 경향에 반해, 계절적으로 홍수 발생의 집중도가 높아지고 지속기간이 길어질 것으로 예상되며 시기와 지역에 따른

홍수의 규모와 빈도의 변동성이 크게 증가할 것으로 전망되었다.

2016~2021년 기간 내 산림생태계 플릭스 관측지에 대한 연간 순생태계교환량(NEE)은 평균 $-263. \pm 335.7 \text{ gC/m}^2$ 였으나 연도별, 대상지별 차이를 보였다. 산림의 탄소흡수 능력은 난대상록활엽수림(완도)에서 높고, 노령림(광릉)과 교란 지역(삼척)에서 낮았으며, 전반적으로 임령이 낮을수록 탄소흡수능력이 높은 경향을 보였다. 이러한 결과는 기존에 NIFoS (2019)가 제시한 산림의 연령별 탄소흡수 경향과 유사하게 나타났으며, 위성영상과 플릭스 자료를 활용해 전국 규모로 산림의 탄소흡수능력을 1.7~2.6 tC/ha/yr로 추정된 연구(Cho et al., 2021)와 산림통계 기반으로 2018년 평균 순탄소흡수량을 약 2.0 tC/ha/yr로 산정한 결과(Kim et al., 2022)와도 유사한 수준을 보였다.

2009년부터 전국 10개의 수목원에서 15개 수종의 식물계절을 현장관측하여 분석한 결과 개엽일은 0.79일/년, 개화는 1.16일/년, 꽃가루 비산시기는 1.36일/년 빨라진 반면 낙엽일은 0.34일/년 늦어지는 경향을 보였다. MODIS 위성영상으로 분석한 전국 산림식물계절은 개엽시기가 0.26일/년 빨라지고 낙엽시기는 0.24일/년 늦어져 산림식물이 광합성하며 성장하는 생육기간이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 국외에서 수행된 장기 식물계절 연구에서도 유사한 경향으로 보고되고 있다. 미국 옐로스톤 지역의 51종을 대상으로 한 장기 관측 연구에서는 2016~2019년의 개화일이 1970~1980년대 대비 평균 10~17일 빨라진 것으로 나타났다(Bloom et al., 2022). 또한 유럽의 주요 수종과 농작물에서도 개엽 및 개화 시기가 앞당겨지고 단풍시기는 늦어지는 경향이 보고되었다(Cortázar-Atauri et al., 2017; Ma et al., 2020; Škrk et al., 2020). 이러한 변화 양상은 지역에 따라 차이는 있으나, 전세계적으로 봄철 개화 및 개엽 시기가 빨라진 반면 단풍시기는 지연되는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

3.4. 단기소득임산물

단기소득임산물 중에서 산림약용자원에 속하며 이상고온에 취약한 참당귀는 기후변화 시나리오에 따라 생육 적지가 점차 고산지대로 제한되어 감소할 것으로 전망되었다. 현재 참당귀 서식지 평균 고도는 약 671 m이나, SSP5-8.5 기준 2030년에는 907 m, 2050년에는 1,089 m, 2090년 1,225 m까지 상승할 것으로 전망되었다. 2030년에 참당귀의 평균 서식 적지 면적이 현재 대비 59~83%

줄어들고, 2090년에는 100% 손실될 것으로 전망되었다. 고로쇠수액의 경우 고로쇠수액 생산량의 70%를 차지하는 서부지방산림청을 포함한 5개 지방청 관할지역에 고정시험지를 구축하고 수액채취량, 채취기간, 미기상인자등을 직접 조사하여 수액생산량의 변화를 관측한 결과, 과거 전통적으로 지리산 일대에서 채취해 온 시기(2월 20일~3월 15일) 대비 최소 12일 이상 수액의 출수시기가 빨라졌음을 확인할 수 있었다. 출수 가능일수는 경상남도 기준 현재(약 88일) 대비 2041~2060년대에 약 73일(SSP1-2.6)에서 약 58일(SSP5-8.5)까지 감소함에 따라 출수기간과 출수량이 감소할 것으로 전망되었고, 출수시작일은 현재 하동과 진주지역의 평균 출수시작일(각각 1월 25일, 1월 18일) 대비 2041~2060년대에 각각 약 9일, 2일(SSP1-2.6) 빨라지고, SSP5-8.5 시나리오에서는 약 10일, 약 4일 빨라질 것으로 전망되었다. 그 밖에도 버섯류에서는 봄철과 가을철 표고버섯이 생산되는 일평균 기온의 범위가 6~20℃인 것으로 확인하였고, 최근 5년간('18~'22년) 발생한 이상저온으로 짧은감나무의 생산피해면적이 6.8천 ha로 다른 산림과수 중 피해면적이 가장 넓었다.

3.5. 산림교란

산불의 경우, 기후변화에 따른 산불발생위험도의 변화를 SSP 시나리오와 HAPPI 시나리오를 적용하여 전망하였다. 2015년 파리협약을 통해 제시된 5개의 모델(CAM4, CanAM4, ECHAM6, MIROC5, NorESM1)을 활용한 HAPPI 시나리오를 적용한 결과 1971~2000년 대비 기온이 1.5℃ 상승할 경우, 우리나라에서의 산불발생위험도가 8.6%, 2.0℃ 상승 시 13.5% 증가할 것으로 전망되었으며 SSP시나리오에 따르면 2071~2100년에 산불발생위험도가 20세기 후반(1971~2000년) 대비 47.1% (SSP1-2.6)~158.1% (SSP5-8.5) 증가할 것으로 전망되었다. 연평균 산사태 피해면적은 기후변화에 따라 2030년대 이후는 현재(1981~2010년, 422.73 ha/년) 대비 2배 이상 증가할 것으로 전망되었으며 SSP1-2.6 시나리오에서는 2070년대, SSP5-8.5 시나리오에서는 2090년대에 산사태 피해면적이 최대가 될 것으로 전망되었다. 주요 산림병해충에 속하는 소나무재선충의 매개충(북방수염하늘소, 솔수염하늘소)의 활동시기가 빨라지는 지역이 점차 확대될 것으로 전망되며(RCP4.5 시나리오), 소나무재선충병 발생위험도가 현재('13~'22년) 35.3에서 2050년대에는 40.0으로 증가할 것으로 전망되었다(SSP5-8.5). 또한 국내 소나무허리노린재

의 발생위험도가 전 국토의 76.7%에서 증가할 것으로 전망되었다(SSP5-8.5).

3.6. 산림생물다양성

우리나라 북부식물(분포 중심이 한반도 이북에 위치하는 고위도 생물종) 93종과 남부식물 90종 등 총 183종을 대상으로 기후변화 영향을 분석한 결과, 북부식물의 다양성은 경기북부, 경상도, 전라도, 제주도에서 감소되고, 남부식물은 전반적으로 유지되나 핵심지역, 즉 한반도 산림식물종 다양성이 높은 지역이 북상할 것으로 전망되었다. 북부식물은 남부연안과 동해연안, 남부식물은 호남 내륙과 동해연안에서 다양성이 감소할 것으로 전망되고 경상도 내륙의 건조 기후에서만 분포하는 등근잎팽의비름과 애기자운은 미래 기후환경에서 절멸할 위험이 있는 것으로 평가되었다. 과거 나방조사지 18 지역에서 12~36년 후 재조사를 통해 나방 종 조성 변화를 조사한 결과 일부 나방류종 상대적으로 낮은 온도 범위에서 출현하는 종들은 기후변화 적응하지 못해 감소할 가능성이 있는 것으로 평가되었고, 전국 산림의 곤충을 모니터링한 결과, 딱정벌레목의 노랑털검정반날개 등 건조한 서식처를 선호하는 종은 강수량 증가에 따라 개체수의 감소 가능성이 높은 것으로 전망되었다. 흰눈썹깡충거미, 왕발깡충거미 등은 기후변화가 진행됨에 따라 개체수가 증가할 것으로 전망되었다. 2018년부터 번식기(봄)와 비번식기(가을)에 백두대간 내 7개 지역과 한라산에서 산림성 포유류 및 조류의 서식 실태를 파악한 결과, 기온이 증가함에 따라 국내에 도래하는 나그네새와 여름철새의 종수가 증가하고, 텃새와 여름철새의 개체수는 감소하였다. 국내 자연생태계에 성공적으로 침입, 정착, 확산된 외래식물 195 분류군을 대상으로 실태조사한 결과와 출현지점의 기후환경자료를 활용하여 현재(1970~2000년) 대비 미래 기후환경(SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5)에서의 분포범위의 변화를 전망한 결과, 기후변화로 인해 침입외래식물은 모든 연안 지역과 내륙 및 고위도 방향으로 확산되고, 모든 시나리오에서 대부분의 침입외래식물의 분포면적이 증가하는 것으로 전망되었다.

4. 산림·임업분야의 기후적응 시사점

산림·임업분야에서 기후변화 영향평가를 하는 궁극적인 이유는 과학적 근거에 기반한 적응을 하기 위함이다.

그리고 산림·임업분야의 기후변화 적응을 통해 도모하고자하는 목표는 기후변화 압력하에서 산림의 건강과 국민의 안전, 지속가능한 산림생태계서비스의 보장하는 것이다. 앞선 기후변화 영향평가 결과를 고려하여, 적응을 위해 각 부문별 기후적응을 위해 기울여야 할 노력은 Table 3과 같다.

첫째, 이상기상 및 재해 대응력 강화를 위한 기상·관측 인프라의 고도화가 요구된다. 산악기상관측망의 확충과 장비 현대화를 통해 고해상도 관측 자료를 확보하고, 이를 활용한 예측 및 경보 체계를 정교화해야 한다(Kwon et al., 2023). 또한, 현장 관측-수치모델-원격탐사 자료의 융합을 통해 세밀한 공간 단위의 산림기상 예측과 실시간 모니터링 체계를 구축할 필요가 있다. 이러한 체계적 관측 인프라는 산불·산사태 등 산림재해의 조기경보 및 대응 역량 향상에 기여할 것이다.

둘째, 기후변화에 따른 수종 분포 변화에 대응한 산림 자원 관리 전략의 전환이 시급하다. 주요 수종의 분포역 북상과 침엽수림 감소는 산림 구조·기능의 변화 의미하며, 이에 대응하여 미래 수종 분포를 고려한 산림 관리 방향 수립이 필요하다. 취약 수종에 대해서는 장기 모니터링, 유전적 다양성 보전, 난대수종 채종원 확보 및 묘목 생산 체계 강화를 통해 적응 기반을 마련해야 한다. 동시에, 침엽수림과 활엽수림의 적정 비율 및 임분 구조 개선을 통해 산림의 탄소흡수능력과 목재 공급 안정성을 함께 고려한 자원관리가 요구된다.

셋째, 고산 침엽수림을 포함한 기후변화 취약 생태계의 보전·복원 전략 강화가 필요하다. 모니터링-진단-관리-사후 평가의 선순환 체계를 확립하고 지역별 쇠퇴 양상에 맞춘 맞춤형 관리 전략을 실행할 필요가 있다(Park et al., 2024). 유전적 다양성 복원, 현지 외 보전, 부처 간 협력 체계를 통해 기후변화 취약 생태계를 종합적으로 관리하고, 잠재적 적응 관리 방안을 현장 실연 연구로 검증함으로써 현장관리에 실효적인 정보 산출을 위해 힘써야 한다.

넷째, 물 부족에 대비해 수원 함양 숲가꾸기와 수자원 관리 강화를 추진해야 한다. 지하수 함양과 홍수 조절 기능을 강화하기 위해 상·하류 유역을 아우르는 통합 거버넌스를 구축하고, 수문 모니터링 체계를 확충할 필요가 있다. 또한 빅데이터·AI 기반 홍수 예측 및 산사태 대응 시스템을 마련하여 기후변화로 증가하는 수문 재해 위험에 체계적으로 대비해야 한다.

다섯째, 단기소득임산물의 기후적응형 생산체계 구축이 요구된다. 약용자원·수액·버섯·산림과수 등 임산물의

Table 3. Key findings and implications on climate change impact of the forest sector

Classification	Detailed-Sectors	Key Findings	Implications
Forest Meteorology	Extreme climate events in the Forest	Annual average temperature in forest areas 2.4°C lower than Republic of Korea average	-Expand and modernize mountain meteorological observation networks, and establish legal and institutional frameworks. -Integrate field observations, numerical models, and remote sensing to enhance fine-scale weather forecasting and monitoring. -Develop customized weather information production technologies.
Forest Resources	Forest biomass resources and seed production	-Reduction in habitats of temperate and cold-climate conifers -Northward shift of subtropical tree species -Expansion of subtropical forest areas	-Establish forest resource management strategies that consider future species distribution shifts. -Monitor vulnerable and subtropical species over the long term, and secure seed orchards. -Optimize the conifer–broadleaf forest ratio to improve timber supply, stand structure, and overall forest functions. -Advance species distribution models, and develop subtropical afforestation and silviculture technologies.
Forest Ecosystem	Forest Ecosystem Vulnerable to Climate Change	-Over 25% decline in subalpine evergreen coniferous forests -Up to 16.2% reduction in potential growth area for <i>Abies koreana</i> by the 2050s -Projected extinction of habitats for <i>Picea excelsa</i> and <i>Pinus pumila</i>	-Continue implementing the Conservation and Restoration Plan for endangered subalpine conifers through adaptive management, inter-agency cooperation, and region-specific restoration of forests affected by climate change.
	Forest Hydrology	-Annual runoff reduction of up to 32% in the 20320s -Exacerbating water scarcity and increasing the frequency of droughts and floods	-Enhance forest water resource management by expanding long-term hydrological monitoring, promoting upstream–downstream flood governance, and improving forests' groundwater recharge and flood mitigation functions.
	Forest Productivity (Carbon Sequestration Capacity)	Younger forests absorb more carbon	-Advance research and technology for climate adaptation, including ecosystem change assessment, site-specific water management, and AI-based flash-flood forecasting and risk mapping for mountainous areas.
	Forest Plant Phenology	Shifting in start of season earlier by 0.26 days/year and end of season later by 0.24 days/year	
Non-timber Products	Mushrooms	Decline in <i>L. edodes</i> production with observed direct and pest damage	-Strengthen climate resilience of forest non-timber products.
	Forest Fruit Trees	Average temperature increase of up to 0.43°C in primary production zones	-Expand long-term monitoring and inter-agency collaboration.
	Medicinal Forest Resources	-64 ~ 71% reduction in <i>A. gigas</i> habitat area by the 2030s -Projected loss of physiological activity in <i>C. officinale</i>	-Develop adaptive management tools and technologies, including climate-resilient species, alternative products, sap flow prediction models, and cultivation-site suitability programs.
	Tree Sap	At least 12 days earlier sap tapping of <i>A. mono</i> in Hadong	

Classification	Detailed-Sectors	Key Findings	Implications
Forest Disturbances	Forest Fires	-Forest fire risk projected to increase by 47.1% (SSP1-2.6) to 158.1% (SSP5-8.5)	-Strengthen forest fire preparedness and prevention by adjusting fire-caution periods, reallocating budgets, expanding fuel and forest tending measures, and developing predictive models for risk and spread based on climate trends.
	Landslides	-Projected increase in landslide-damaged area by 2.3 (SSP1-2.6) and 2.8 (SSP5-8.5) times compared to current	-Enhance landslide risk management through improved early warning systems, spatial risk modeling, updated zoning regulations, and expanded erosion control projects that reflect climate-induced changes in forest and land conditions.
	Forest Pests	-Diversification in the occurrence patterns of domestic forest pests -Projected increase in invasive pest risk	-Advance forest pest response systems via early warning technologies, preemptive population control, collaborative inter-agency forecasting, and proactive management of invasive species under increasing climate variability.
Forest Biodiversity	Forest Plants	Projected decline in northern plant diversity and northward shift of southern biodiversity hotspots	-Enhance biodiversity conservation systems through expanded ex-situ programs, improved monitoring networks, and vulnerability assessments for plants and insects under climate change, supported by cross-sector cooperation.
	Forest Insects	High extinction risk for low-adaptability forest insects	-Strengthen habitat protection and species monitoring by recognizing key refugia like Baekdudaegan, designating genetic resource areas, applying new observation technologies, and promoting migratory species research and coordination.
	Forest Wildlife	Increased activity of forest mammals with rising temperatures	-Develop strategic invasive species management through risk-based prevention, targeted control in conservation facilities and hotspots, and the creation of distribution tracking indicators to protect native forest ecosystems.
	Invasive Alien Plants	Nationwide spread of formerly localized invasive alien plants	

수확시기·양·품질이 기후변화에 영향 받을 것에 대비하여 재해보험 지원과 협력 네트워크를 강화해야 한다. 극한기상 대응 시설, 신품종, 적합지 예측 프로그램 등을 보급하고, 장기 모니터링 및 예측 모델로 관리 체계를 고도화함으로써 단기소득임산물의 생산 안정성을 높이는 전략이 필요하다.

여섯째, 산불·산사태·병해충 피해에 대응하기 위해 예방적 관리와 조기경보 체계를 강화해야 한다. 산불은 연료 관리와 위험 예측, 산사태는 대피 시스템과 사망사업 확대, 병해충은 친환경 방제제 개발과 외래·돌발 해충 관리 협력을 통해 체계적으로 대응해야 한다.

마지막으로 기후위기에 대응한 산림생물다양성 보전 체계 확립이 필요하다. 식물원·수목원을 활용하여 현지 외

보전을 강화하고, 취약 종 목록 갱신, 침입외래종 확산 관리 등 중 수준의 기후적응 관리전략이 중요하다. 뿐만아니라 산림생물의 서식처로서의 산림생태계 다양성에 대한 이해를 바탕으로 기후위기 시대 산림생물의 최후 서식처라 할 수 있는 백두대간 등 핵심 축 중심의 보전 전략은 산림 생물다양성 안정성 확보에 기여할 것이다.

5. 적요

기후적응을 위해 산림부문에서 풀어가야 할 핵심과제는 산림정책에 기후적응을 주류화하고, 적응 조치의 효과성 모니터링 및 평가를 포함하는 적응의 선순환 체계를 정립하는 것이다. 우리나라 산림의 장기적인 관리 계획의

기본 방향을 제시해주는 것은 산림청이 산림기본법 제11조 및 같은 법 시행령 제4조~제6조에 의거하여 수립하는 산림기본계획이다. 제6차 산림기본계획(2018~2037년)은 향후 20년간의 산림정책의 비전과 장기전략을 제시하는 법정계획으로 지역산림계획 및 산림경영계획 수립의 기준이 되며 국가의 산림정책의 방향은 사유림에도 영향을 미친다. 제6차 산림기본계획에도 일부 기후변화 영향에 대한 전망이 반영되어있다. 이에 근거한 시행계획을 수립하고 이행하는 과정에서도 기후적응 조치가 충분히 반영되기 위해서는 신뢰 가능한 데이터 및 과학적 분석기술에 근거한 전국/지역 산림의 기후변화 영향과 취약성 평가 정보가 제공되어야 하며, 현장 맞춤형 적응 방안도 함께 제시될 필요가 있다.

본 연구에서 국립산림과학원이 국립수목원과 함께 실시한 기후변화 영향평가는 기존에 문헌을 종합하여 평가하는 것에서 나아가 현장에서 직접 조사·관측하여 수집한 데이터에 기반한 평가이다. 산림은 생애주기가 길기 때문에 기후변화가 산림에 미치는 영향에 대해 이해하기 위해서는 장기간에 걸친 데이터가 안정적으로 축적되어야 한다. 또한 산림생태계의 복잡성(complexity)만큼이나 산림·임업분야의 세부분야별 적응 수요자, 요구되는 정보의 종류, 공간적, 시간적 해상도도 다양하다. 따라서 산림·임업분야의 세부분야별 특성을 고려하여 표준화한 방법론을 조사 및 평가에 적용한 것은 현상과 반응기작에 대한 이해를 반영한 실효적인 기후변화 영향평가 정보 산출의 기반을 제공했다는 점에서 의의가 있다.

현재 부상하고 있는 위성영상을 비롯한 원격탐사, AI 등 첨단 분석 기술이 현실에 맞는 실효성있는 정보 산출에 활용된다면 ‘참값’인 현장에서의 관측데이터가 뒷받침되어야만 한다. 전국과 지역 단위를 아울러 ‘장기적인 산림생태계 변화’를 ‘현장’에서 관측할 수 있는 인프라를 확충함으로써 산림생태에 대한 신뢰 가능한 데이터를 확보하는 것이, 현장에서 실제로 일어나는 현상에 기반한 기후적응 조치 도출의 필수 기반이라 할 수 있다. 또한 임산물 생산성 등 임업통계에 반영되어있는 항목들이 기후 영향 및 취약성 평가에 최대한 활용될 수 있도록 기존의 조사 사업을 개선하거나 별도의 기후변화 영향 실태조사 사업을 규모있게 추진함으로써 전국과 지역 단위를 아우르는 영향·취약성 평가 정보 산출 기반을 공고히 할 필요가 있다. 그리고 수요자(즉, 중앙정부, 지방자치단체, 현장 관리자, 산림경영인, 국민 등) 맞춤형 정보를 가공하여 제공할 수 있는 물리적인 시스템과, 이러한 정보를 기반으

로 각 관리 주체가 산림의 기후적응 전략을 수립하고 이행할 수 있도록 하는 정책적인 기반 강화와 자원 확보가 필요하다. 또한 산림에 대한 이해를 바탕으로 적응 정보의 품질과 실효성을 높이고, 실질적인 적응 조치를 발굴, 이행할 수 있는 정책, 연구, 관리 현장의 전문 인력을 지속적으로 양성해 나갈 수 있는 토대를 만드는 것도 산림의 기후위기 적응에 필수적이다.

사사

본 논문은 국립산림과학원(FE0100-2023-02-2025, FE0100-2019-04-2023, FE0100-2024-04-2025, FE0500-2023-01-2025, F0500-2018-01-2022, FE0400-2023-01-2025, FG0702-2023-01-2025), 국립수목원(KNA1-2-47-24-1, KNA1-2-43-23-1, KNA1-2-46-23-4, KNA1-2-39-21-2)의 지원을 받았습니다.

Reference

- Adhikari P, Shin MS, Jeon JY, Kim HW, Hong S, Seo C. 2018. Potential impact of climate change on the species richness of subalpine plant species in the mountain national parks of South Korea. *J Ecol Environ* 42(1): 1-10. doi: 10.1186/s41610-018-0095-y
- Bloom T, O'Leary D, Riginos C, 2022. Flowering time advances since the 1970s in a sagebrush steppe community: Implications for management and restoration. *Ecol Appl* 32(6). doi: 10.1002/eap.2583
- Cho S, Kang M, Ichii K, Kim J, Lim JH, Chun JH, Park CW, Kim HS, Choi SW, Lee SH, Indrawati YM, Kim JH. 2021. Evaluation of forest carbon uptake in South Korea using the national flux tower network, remote sensing, and data-driven technology. *Agric For Meteorol* 311: 108653. doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108653
- Cortázar-Atauri I, Duchêne E, Destrac-Irvine A, Barbeau G, Rességuier L, Lacombe T, Parker AK, Saurin N, Leeuwen C. 2017. Grapevine phenology in France: From past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One* 51(2): 115-126. doi: 10.20870/oeno-one.2017.51.2.1622

- Edwards JE, Pearce C, Ogden AE, Williamson TB. 2015. Climate change and sustainable forest management in Canada: A guidebook for assessing vulnerability and mainstreaming adaptation into decision making. Canadian Council of Forest Ministers. p. 172.
- HM Government. 2022. UK Climate Change Risk Assessment 2022. HM Government. p. 49.
- Holzarth S, Thonfeld F, Abdullahi S, Asam S, Da Ponte Canova E, Gessner U, Huth J, Kraus T, Leutner B, Kuenzer C. 2020. Earth observation based monitoring of forests in Germany: A review. *Remote Sens* 12(3570). doi: 10.3390/rs12213570
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Summary for policymakers [Pörtner H-O, Roberts DC, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Tignor M, Alegría A, Craig M, Langsdorf S, Lösckhe S, Möller V, Okem A (eds)]. In: *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Pörtner H-O, Roberts DC, Tignor M, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Alegría A, Craig M, Langsdorf S, Lösckhe S, Möller V, Okem A, Rama B (eds)]. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press. p. 3-33. doi: 10.1017/9781009325844.001
- Kappelle M, Van Vuuren MM, Baas P. 1999. Effects of climate change on biodiversity: A review and identification of key research issues. *Biodivers Conserv* 8: 1383-1397. doi: 10.1023/A:1008934324223
- Keenan RJ. 2015. Climate change impacts and adaptation in forest management: A review. *Ann For Sci* 72: 145-167. doi: 10.1007/s13595-014-0446-5
- Kim YH, Han H, Jang YS. 2022. Measures to strengthen the carbon absorption capacity of forests in 2022. 2022 Outlook for Forest and Forestry. Seoul, Korea: National Institute of Forest Science. p. 476.
- Kwon CK, Lee SJ, Kim SY, Ahn HY, Lee YE, Seo KW. 2023. Integrated forest fire danger rating system using meteorological big data. Seoul, Korea: National Institute of Forest Science. p. 124.
- Lee SH, Jung HC, Choi JY. 2020. Projecting the impact of climate change on the spatial distribution of six subalpine tree species in South Korea using a multi-model ensemble approach. *Forests* 12(1): 37. doi: 10.3390/f12010037
- Lim JH, Park GE, Won MS, Kim ES, Jang KC, Yang HM, Kim SH, Chun JH, Park CY, Choi HT, Yoo R, Jang YS, Lee W, Kim CW, Park YK, Yoon JH, Lee KT, Park YM, Um Y, Lee BD, Lee CW, Kwon TS, Choi WI, Nam YW, Kim IS, Jung JM, Koo JJ. 2017. Guideline on the investigation and assessment of climate change impact in forest sector. Seoul, Korea: National Institute of Forest Science. p. 61.
- Lindner M, Maroschek M, Netherer S, Kremer A, Barbati A, Garcia-Gonzalo J, Seidl R, Delzon S, Corona P, Kolström M, Lexer MJ, Marchetti M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For Ecol Manag* 259(4): 698-709. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.023
- Ma Q, Huang J, Hänninen H, Li X, Berninger F. 2020. Climate warming prolongs the time interval between leaf-out and flowering in temperate trees: Effects of chilling, forcing and photoperiod. *J Ecol* 109(3): 1095-1574. doi: 10.1111/1365-2745.13558
- Mimura N, Pulwarty RS, Duc DM, Elshinnawy I, Redsteer MH, Huang HQ, Nkem JN, Sanchez Rodriguez RA. 2014. Adaptation planning and implementation. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press. p. 869-898.
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2019. A Standard table for the CO₂ absorption by major forest tree types. National Institute of Forest Science.

- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2020. Standardized manual for establishment and management of the mountain meteorological observation networks. Research Resource No. 890.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2023. The first synthesis report on climate change impact assessment for forest sector. Seoul, Korea: National Institute of Forest Science. p. 421.
- Park GE, Chun J, Choi H. 2024. Suggestions for utilizing climate change impact assessment information for the in-situ conservation of subalpine coniferous forest in Republic of Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 15(5-2): 901-908. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.5.901
- Park GE, Jung JB, Choi WI, Kim E, Yang HM. 2023. Considerations for enhancing the effectiveness of climate change adaptation information in the forest sector (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(6-2): 957-964. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.957
- Park GE, Kim ES, Jung SC, Yun CW, Kim JS, Kim, JD, Kim JB. 2022. Distribution and stand dynamics of subalpine conifer species (*Abies nephrolepis*, *A. koreana*, and *Picea jezoensis*) in Baekdudaegan protected area (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 111(1): 61-71. doi: 10.14578/jkfs.2022.111.1.61
- Schldt B, Buras A, Arend M, Vitasse Y, Beierkuhnlein C, Damm A, Gharun M, Grams TE, Hauck M, Hajek P. 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on central European forests. *Basic Appl Ecol* 45: 86-103. doi: 10.1016/j.baae.2020.04.003
- Siders AR, Pierce AL. 2021. Deciding how to make climate change adaptation decisions. *Curr Opin Environ Sustainability* 52: 1-8. doi: 10.1016/j.cosust.2021.03.017
- Škrk N, Balzano A, Črepinšek Z, Čufar K. 2020. Inter-tree variability of autumn leaf phenology of European beech (*Fagus sylvatica*) on a site in Ljubljana, Slovenia. *Les/Wood* 69(2): 5-20. doi: 10.26614/les-wood.2020.v69n02a09
- Wigmosta MS, Vali LW, Lettenmaier DP. 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resour Res* 30: 1665-1679. doi: 10.1029/94WR00436
- Williamson TB, Campagnaand MA, Ogden AE. 2012. Adapting sustainable forest management to climate change: A framework for assessing vulnerability and mainstreaming adaptation into decision making. Canadian Council of Forest Ministers. p. 29.