

아고산 상록침엽수림의 현지 내 보전을 위한 기후변화 영향 평가 정보의 활용 제안

박고은*[†] · 천정화** · 최형태**

*국립산림과학원 산림생태연구과 임업연구사, **국립산림과학원 산림생태연구과 임업연구관

Suggestions for utilizing climate change impact assessment information for the in-situ conservation of subalpine coniferous forest in Republic of Korea

Park, Go Eun*[†] · Chun, Junghwa** and Choi, Hyungtae**

*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

ABSTRACT

The subalpine evergreen coniferous forest in Republic of Korea is a representative vulnerable forest facing risk such as area reduction and massive death due to warming temperature and extreme weather caused by climate change. Multiple policy and research efforts exist to conserve biodiversity in the vulnerable subalpine evergreen conifer forest. However, due to a lack of linkages between scientific information and practical management on the site, progressive implementation of adaptation management in the subalpine evergreen conifer forest has been limited. This study aims to suggest a tentative framework for utilizing scientific information on the impact of climate change on subalpine evergreen coniferous forests to discover and apply adaptation measures for local conservation. The status of information on the impact of climate change on subalpine evergreen coniferous species was reviewed by dividing it into field monitoring, physiological response experiments, and projection of changes in potential habitat according to climate change scenarios. Based on the understanding of this information, it was proposed a stepwised approach to the discovery of adaptation measures for in-situ conservation, including problem identification, target site selection, screening of potential measures, and feasibility review. This approach is expected to contribute to decision-making and establishment of adaptation strategies based on scientific information on the impact of climate change for the sustainable conservation of subalpine evergreen coniferous forests.

Key words : Climate Changes Adaptation, Impact Assessment, In-situ Conservation

1. 서론

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

2022년 유엔 생물다양성협약(CBD, Convention on Biodiversity)에서는 제15차 당사국총회에서 채택한 쿤밍-

몬트리올 전지구생물다양성정보전프레임워크(K-M GBF, Global Biodiversity Framework)를 통해 기후변화 및 기후변화 대응을 위한 모든 조치가 생물다양성에 미치는 부정적인 영향을 최소화할 것을 강조하고 있다(실천목표 8번). 또한 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Platform on Climate Change)의 제2실무자 그룹이 작성한 제6차 종합보고서(IPCC, 2022)에서는 산림생태계서비스 소실을 예방 및 완화하기 위해서는 기후변화 적응 조치를 통한 산림의 회복력 증진 및 산림생태계서비스 보전이 시급

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

ORCID 박고은 0000-0003-4686-2178
천정화 0000-0001-5455-5042

최형태 0000-0002-5472-9820

함을 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

우리나라 고도 1000 m 이상의 아고산대 산림에 고립되어 분포하고 있는 구상나무, 분비나무, 가문비나무 등을 포함하는 상록침엽수림의 면적은 12,094 ha로 우리나라 전체 산림면적의 약 0.19%를 차지한다. 아고산 상록침엽수림은 면적 비율이 크지 않으나, 장기적인 온난화로 분포역이 급감하고 이상기상에 의한 집단 고사 등의 피해를 입고 있는 대표적인 기후변화 취약 산림에 속한다. 또한 구상나무와 같은 멸종위기종을 포함하고 있어 생태적 보전 가치가 크다. 대부분의 아고산 상록침엽수림은 국유림으로 국가가 직접 관리하고 있으며 산림청은 2016년에 이어 2021년 「제2차 멸종위기 고산지역 침엽수종 보전·복원 대책」을 수립하는 등 아고산 상록침엽수림의 보전을 위한 정책적 노력을 기울이고 있다. 이뿐만 아니라 국내 학계에서도 기후변화에 취약한 아고산 상록침엽수림의 현황과 분포역의 변화 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Jung and Park, 2024; Koo and Kim, 2020; Lee et al., 2022, 2023, 2024; Lim, Shin et al., 2006; Park et al., 2023, 2024; Song et al., 2021). 그리고 산림청은 2015년에 발효된 「농업·농촌 및 식품산업기본법」 제47조의2와 2019년 신설된 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」 제51조의1의 일환으로 아고산 상록침엽수림의 기후변화 영향 평가를 위한 정보를 지속적으로 생산하고 있다.

MacKenzie and Mahony (2021)는 앞선 연구에서 산림에 대한 과학적인 정보와 정책 및 현장간의 간극이 있음을 지적하였다. 우리나라 아고산 상록침엽수림의 경우에도 지속적으로 생산되는 기후변화 영향평가 정보의 활용성을 높이기 위한 체계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 아고산 상록침엽수림에 대한 기후변화 영향정보 현황을 토대로, CBD 나고야의정서에 정의된 ‘현지 내 보전 (in-situ conservation)’을 위한 기후변화 영향평가 정보의 활용을 제안하고자 한다.

2. 아고산 상록침엽수림의 기후변화 영향평가 체계

아고산 일대 상록침엽수림의 기후변화 영향평가는 해

당 산림의 현황 및 변화 특성을 이해하기 위한 현장 모니터링, 아고산 상록침엽수종의 생장과 생리적 반응 특성 영향 구명을 위한 실험, 기후변화 시나리오에 따른 변화 전망 등 크게 세 가지 축으로 구분할 수 있다(Fig. 1).

3. 기후변화 영향평가 정보 현황

3.1. 아고산 상록침엽수종의 분포 및 생육 현황

아고산 상록침엽수종이 현재 분포하는 전국 산지별, 수종별 면적은 산림청에서 실시한 「전국 고산지역 멸종위기 침엽수종 실태조사(’17~’18)」(이하 산림청 실태조사)를 통해 파악하였다(Table 1). 또한 아고산 상록침엽수림의 분포면적 변화(약 56% 감소)는 1990년대와 2010년대에 취득한 Landsat 위성정보를 활용하여 분석한 바 있다(Kim et al., 2019). Kim et al. (2024)은 그 중에서도 한라산 구상나무림 분포 변화를 고지도와 항공사진을 활용하여 분석하였다(1918년 대비 2021년 48.1% 감소).

우리나라 아고산 상록침엽수림에 대한 연구는 1980년대부터 계속되어 왔으나, 연구자별 조사지점과 조사방법론이 상이하고 조사가 단절되어 임분변화에 대한 기후변화 영향 분석에 어려움이 있었다. 이를 극복하기 위해 국

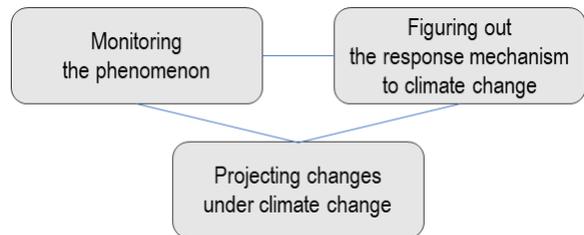


Fig. 1. Tripods on climate change impact assessment of vulnerable forests in the subalpine zone (revised from NIFoS, 2023)

Table 1. Four representative distribution of subalpine evergreen conifer forest in Republic of Korea

Region	Area (ha) (% of total distribution)
Mt. Jirisan	5,198 (43.0%)
Mt. Hallasan	1,956 (16.2%)
Mt. Seoraksan	1,632 (13.5%)
Mt. Odaesan	969 (8.0%)

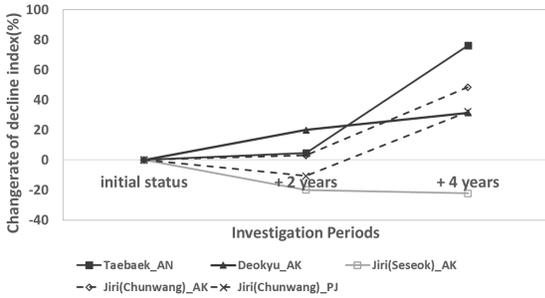


Fig. 2. Changes of decline index (D) of *Abies koreana* (AK), *A. nephrolepis* (AN), *Picea jezoensis* (PJ) (revised from Park et al., 2022)

립산림과학원에서 표준화한 방법론으로 2015년부터 아고산 일대 상록침엽수림의 변화 특성을 모니터링한 결과와 산림청 실태조사 결과를 심층분석하여 지역별, 수종별 입목쇠퇴도(수간의 건강상태와 수관활력도를 지표화 하여 산출한 지수)의 변화를 파악하고 있다(Fig. 2). 그리고 쇠퇴도가 높은 지역의 기상특성과 입지환경 특성도 파악하고 있다(NIFoS, 2019). 또한 아고산 상록침엽수림을 이어나갈 어린나무의 발생과 진계생장이 원활히 이루어지고 있는지의 여부를 조사한 결과, 현재 대체로 각 개체군 유지에 취약한 구조를 지니고 있는 것으로 파악되었다(Park et al., 2022).

3.2. 기후변화에 따른 수종의 성장·생리적 반응 특성

실험을 통하여 기온과 대기 중 이산화탄소 농도가 증가

하는 기후변화 조건에서는 어린 구상나무의 순광합성률 능력과 탄소고정효율이 감소되는 것을 확인하였고(Song et al., 2021), 가뭄으로 인해 현저하게 저하되는 순광합성률은 광 환경 조절을 통해 감소폭을 완화할 수 있음을 밝혔다(Je et al., 2018). 또한 Jung and Park (2024)은 지리산의 구상나무 지상부 생장에 영향을 미치는 기상요소를 구명하고, 수관층의 활력 정도에 따라 잎, 가지, 연륜 생장에 에너지를 배분하는 패턴이 달라짐을 밝혔다. 특히 잎은 기공을 통해 광합성과 호흡을 하는 기관으로 고온, 가뭄과 같은 기후 스트레스에 노출이 된 구상나무는 기공의 여닫음을 조절하고, 가지에 달려있는 잎의 양을 조절하는 등의 생리적 반응 특성을 보인다(Lim, Woo et al., 2006). 이는 수목의 광합성능력 저하와도 관련이 있으며, 장기적인 온난화와 극한기상의 발생 빈도 및 강도가 증가하는 미래 기후 특성은 구상나무의 생존과 생장에 유리할 것이라 판단하기 어렵다.

3.3. 기후변화에 따른 수종별 잠재 생육 가능지 변화 전망

NIFoS (2023)는 우리나라의 대표적인 아고산 상록침엽수 7종(구상나무, 분비나무, 가문비나무, 눈잣나무, 눈쭈백, 눈향나무, 주목)의 현존 분포 위치를 기반으로 기후변화 시나리오(Shared Socioeconomic Pathway; SSP)에 따른 현재와 미래의 잠재 생육 가능 면적을 Table 2와 같이 전망하였다(2050년대 구상나무의 생육가능 면적은 16.2% 감소^{SSP5-8.5}, 눈잣나무와 가문비나무는 남한에서 절멸).

Table 2. Changes in potential future habitat area relative to the current status, based on climate change scenarios (SSPs) for subalpine coniferous species (km²) (cited from NIFoS, 2024)

	<i>Abies koreana</i>		<i>A. nephrolepis</i>		<i>Picea jezoensis</i>		<i>Pinus pumila</i>	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Reference period (1981 ~ 2010)	1,829		2,235		254		3	
2030s	1,582 (-13.5%)	1,562 (-14.6%)	821 (-63.3%)	730 (-67.4%)	8 (-96.8%)	4 (-98.4%)	0 (-100%)	0 (-100%)
2050s	1,547 (-15.4%)	1,534 (-16.2%)	542 (-75.7%)	420 (-81.2%)	0 (-100%)	0 (-100%)	0 (-100%)	0 (-100%)
2070s	1,546 (-15.5%)	1,557 (-14.9%)	436 (-80.5%)	412 (-81.6%)	0 (-100%)	2 (-99.1%)	0 (-100%)	0 (-100%)
2090s	1,553 (-15.1%)	1,580 (-13.6%)	445 (-80.1%)	554 (-75.2%)	0 (-100%)	3 (-98.7%)	0 (-100%)	0 (-100%)

4. 아고산 상록침엽수림의 기후변화 적응 조치 발굴 및 이행을 위한 정보 활용 방안

아고산 상록침엽수림의 현지 내 보전을 위해 기후변화 영향평가 정보를 활용하여 기후변화 적응 조치를 발굴하고 적용하는 접근방식(Fig. 3)과 단계별 고려할 사항은 다음과 같다.

4.1. 문제의 식별

산림생태계에서 나타나고 있는 현상에 대한 이해를 돕는 정보를 기반으로 해결해야 할 ‘문제’를 식별하는 것은 해당 산림을 바라보는 시각 및 관리 목표와 밀접한 관련이 있다. 우리나라 아고산 상록침엽수림에 관여하는 이해관계자 및 국민들 간 시각의 차이를 좁혀가고 공동의 인식을 제고하는 노력을 기울이는 것은 적응 의사결정 및 현장 조치에 이르는 모든 과정의 효율성을 높여주게 된다. 제한된 인적·물적·자원으로 현지 내 보전 조치를 하기 위해서는 문제의 식별 단계에서 문제의 심각성과 시급성에 따른 관리 대상의 우선순위를 선정할 필요가 있다. 가령, 생육가능 면적의 감소에 대한 문제 인식을 기반으로 생물다양성 소실 피해를 저감하기 위한 현지 내 보전이라는 관리 목표를 설정한 경우, 가까운 미래에 남한 내 생육 가능한 면적이 사라질 것으로 전망(심각성)되는 눈잣나무와 가문비나무를 보전의 우선순위로 고려할 수 있다.

4.2. 대상지 선정

현지 내 보전 조치를 적용할 대상지를 선정하는 과정에는 Fig. 4와 같이 단계별 기후변화 영향 평가 정보를 기반

으로 산출한 공간정보를 활용할 수 있다. 현존 분포 지역의 지리·지형학적 특성과 기후 특성 및 산림 수종의 생리적 특성 등에 대한 이해를 바탕으로 현재 잠재적으로 생육 가능한 지역을 추론해 볼 수 있다. 또한 각 종 분포에 영향을 미치는 주요 설명변수를 반영하여 기후변화 시나리오를 적용한 미래에 잠재적으로 생육 가능한 지역을 전망할 수 있다. 현존분포도는 현재 나타나는 현상을 진단하는 데 활용하고, 현재와 미래의 잠재적 생육 가능지역은 현지 내 보전 대상지로 고려할 수 있다. 여기서 보전행위의 가치를 어떻게 설정하느냐에 따라 현재와 미래에 모두 생육 가능할 것으로 전망되는 곳을 우선하여 고려할 수도 있고, 현재에는 생육가능하나 미래에 사라질 것으로 예상되는 지역도 보전 대상지에 포함할 수도 있다. 다만 현재의 종분포 모형에서는 토양의 특성의 반영이 미흡하다. 수목은 토양에 뿌리내려 몸을 지탱하고, 뿌리를 통해 체내에 필요한 토양 내 수분과 양분을 흡수하므로 토양의 물리·화학적 특성은 수목의 지상부 성장과 생존에 영향을 미친다. 그리고 토양의 이러한 특성은 기후변화에 영향을 받는다. 따라서 향후 정보의 실효성을 높이고 오적응을 회피하기 위해서는 토양의 특성을 반영한 접근이 필요하다. 우리나라 아고산 상록침엽수림이 현재 분포하는 지역은 대체로 지형이 험준하고 유효토심이 얇아 교목성 수종이 살아가기에 척박한 입지조건을 지니고 있다. 그러나 Ryu et al.(2024)의 연구는 대상 수종의 출현빈도가 높은 지역이 해당 수종의 성장에 반드시 유리한 곳은 아닐 수 있다는 것을 시사하고 있다. 따라서 아고산 상록침엽수종의 보전·복원 지역 검토를 위해 현존분포 지역의 입지조건을 고려하되, 출현 빈도가 높은 곳과 생장이 좋은 곳을 구분하여 해석하고 적용할 필요가 있다.

4.3. 잠재적 조치 선별

아고산 상록침엽수의 현지 내 보전을 위한 잠재적인 적응 조치는 현장에서 보이는 현상과 대상 수종이 지닌 성장과 생리적인 반응 특성을 종합적으로 고려하여 선별할 필요가 있다. 성목의 쇠퇴도 증가와 천연갱신 제한으로 존속의 위협을 받고 있는 구상나무의 경우 어린나무가 수고성장하기 위해서는 적절한 수준의 광 환경이 요구된다(Park et al., 2023). 이를 고려하여 현지 내에서 천연갱신을 증진시키기 위한 광 환경 개선 사업을 실시하는 것도 잠재적인 조치로 고려할 수 있다. 또한 눈잣나무도 현장에서 어린나무 갱신이 잘 이루어지지 않고 있는데, 종자

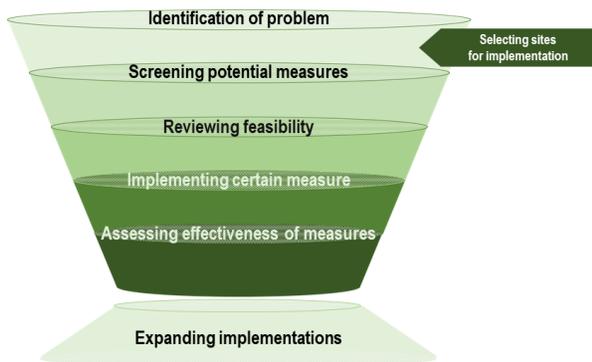


Fig. 3. Approach for implementing adaptation measures in forest

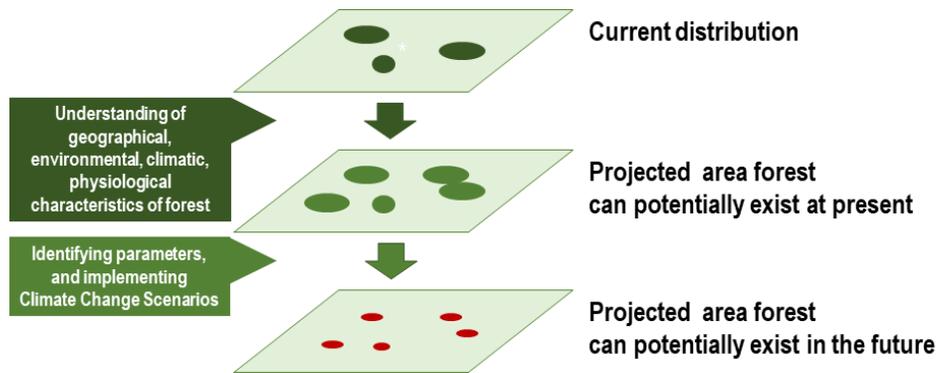


Fig. 4. Framework for extracting species distribution areas using Species Distribution Models (SDM) and climate change scenarios

의 섭식피해를 방지하기 위한 구과 보호망을 설치하거나 종자의 발아를 촉진하는 전처리 후 현지 내 직파하는 것도 잠재적 적응 조치로 고려할 수 있을 것이다(Lim et al., 2015).

4.4. 실현 가능성 검토

전단계에서 선별된 잠재적 조치의 현장 실현 가능성은 수종별 특성에 대한 이해에 기반한 기술, 실행하기 위해 필요한 제도, 예산, 거버넌스, 인적자원 등의 인프라의 유무와 그 수준을 검토할 필요가 있다. 특히 아고산 상록 침엽수림의 경우, 현장의 접근성이 매우 열악하여, 잠재적 대상지로 선별된 곳 중에서도 안전 등의 문제로 조치의 적용이 어려운 경우 이를 대상지에서 제외할 필요가 있다. 위에 언급한 실현 가능성을 제고하기 위해 해당 조건을 개선하는 조치도 기후변화 적응 조치에 포함될 수 있다.

4.5. 효과성 검증

산림생태계는 생애주기가 긴 만큼 현장 관리 조치에 대한 효과가 장기간에 걸쳐 나타난다. 따라서 사전 검증을 거치지 않은 관리 방안을 현장에 적용하는 것은 시업 효과의 불확실성을 더 높이게 된다. 한편 효과성 검증 사례가 많아질수록 오적응(maladaptation) 회피 가능성을 높이는데 기여할 수 있게 된다. 따라서 잠재적인 조치의 효과를 검증할 수 있는 실연 사업지를 점진적으로 늘리고 그 결과를 환류함으로써 적응의 선순환 체계를 만들어갈 필요가 있다.

4.6. 적용의 확대

우리나라 산림 중에서도 아고산 상록침엽수림은 지형이 매우 험준하고 복잡하다는 특성을 지니고 있다. 특정 시범 적용지에서 효과가 검증된 조치에 대한 적용의 확장성 높이기 위해서는 적용하는 공간규모를 구체화할 필요가 있다. 가령 Park et al. (2022)에 따르면 지리산 구상나무의 경우 반야봉은 쇠퇴도가 지속적으로 높아지는 반면 반야봉에 비해 지형습윤지수가 높은 세석평전에서는 같은 기간 안에 입목쇠퇴도가 약 21% 감소한 것으로 나타난 바 있다. 즉, 공간적으로 같은 지역으로 구획될 수 있는 산림에 분포하는 동일한 수종이라 할 지라도 구체적인 입지환경 특성 등의 차이가 있으므로 동일한 현장 관리 조치를 적용하더라도 동일한 효과를 기대하기 어려울 수 있다. 따라서 오적응을 회피하기 위해서는 생태학적 맥락에 대한 이해를 기반으로 앞선 적용 사례별, 장차 현지 내 보전 조치가 필요한 구체적인 지역별 현장의 문제와 특성의 유형을 고려하여 적용을 확대해 갈 필요가 있다.

5. 고찰

이 연구는 아고산 상록침엽수림에 대한 기후변화 영향평가 정보를 현지 내 보전을 위한 의사결정 과정 중 활용하기 위해 단계별로 고려할 사항을 제안하였다. 이는 기후변화 영향에 대한 과학적 정보가 산림의 적응 관리 지식(knowledge)으로 활용되는 체계 정립의 밑그림을 제시한 것으로서의 의미가 있다고 할 수 있다. 또한 이 연구를 진행하는 과정에서 지식의 간극(knowledge gap)을 줄이기 위해 보완되어야 할 지점(토양을 고려한 평가 등)도 드러났다.

아고산 상록침엽수림의 현지 내 보전은 미래 산림에 대한 불확실성을 가중시키는 기후변화의 압력하에서 산림 생물다양성의 소실을 최소화하기 위한 적응 조치의 일환이라 할 수 있다. 기후변화 적응 조치의 실현 가능성과 그 효과성을 높이기 위해서는 기후변화 영향 정보의 양과 질을 높여가는 것과 동시에 과학적 근거에 기반한 정책적 노력이 지속될 수 있는 환류체계의 확립이 필요하다.

사사

본 논문은 국립산림과학원(FE0100-2023-02-2024)의 지원을 받았습니다.

References

- 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. Ottawa, Canada: Canadian Council of Forest Ministers.
- Holzwarth 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(21): 3570. doi: 10.3390/rs12213570
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Summary for policymakers. In: Pörtner HO, Roberts DC, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Tignor M, Alegría A, Craig M, Langsdorf S, Lösschke S, Möller V, et al. (eds). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 3-33. doi: 10.1017/9781009325844.001
- Je SM, Kim SH, Woo SY. 2018. Responses of the photosynthetic apparatus of *Abies koreana* to drought under different light conditions. *Ecol Res* 33(2): 413-423. doi: 10.1007/s11284-018-1561-9
- Jung JB, Park GE. 2024. Influence of health status and environmental factors on the trade-off between aboveground growths of endangered *Abies koreana* in Mt. Jirisan, South Korea. *Glob Ecol Conserv* 55: e03215. doi: 10.1016/j.gecco.2024.e03215
- 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(10): 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 ES, Lee JS, Park GE, Lim JH. 2019. Change of subalpine coniferous forest area over the last 20 years. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(1): 10-20. doi: 10.14578/jkfs.2019.108.1.10
- Kim JG, Song KM, Koh JG. 2024. Changes of spatio-temporal distribution of Korean fir Forest in Mt. Hallasan over the past 100 years. *Journal of Jeju Studies* 62: 301-323. doi: 10.47520/jjs.2024.62.301
- Koo KA, Kim DB. 2020. Review forty-year studies of Korean fir (*Abies koreana* Wilson) (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Ecol* 34(5): 358-371. doi: 10.13047/KJEE.2020.34.5.358
- Korea Forest Service. 2020. *Statistical yearbook of forestry*. Daejeon, Korea: Author.
- Lee K, Kim D, Cha J, Hong S. 2023. Fine-scale species distribution modeling of *Abies koreana* across a subalpine zone in South Korea for in situ species conservation. *Sustainability* 15(11): 8964. doi: 10.3390/su15118964
- Lee SC, Kang HM, Kim DH, Kim YS, Kim JH, Kim JS, Park BJ, Park SG, Eum JH, Oh HK, Lee SD, Lee HY, Choi YH, Choi SH. 2022. Subalpine vegetation structure characteristics and flora of Mt. Seoraksan National Park (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Ecol* 36(2): 118-138. doi: 10.13047/KJEE.2022.36.2.118
- Lee YJ, Park GE, Lee HI, Lee CB. 2024. Stand age-driven tree size variation and stand type regulate aboveground biomass in alpine-subalpine forests, South Korea. *Sci Total Environ* 915: 170063. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170063

- 10.1016/j.scitotenv.2024.170063
- Lim HI, Kim GN, Jang KH, Park WG. 2015. Effect of wet cold and Gibberellin treatments on germination of dwarf stone pine seeds (in Korean with English abstract). *Korean J Plant Res* 28(2): 253-258. doi: 10.7732/kjpr.2015.28.2.253
- Lim JH, Shin JH, Lee DK, Seo SJ. 2006. Climate change impacts on forest ecosystems: Research status and challenges in Korea. *Korean J Agric For Meteorol* 8(3): 199-207.
- Lim JH, Woo SY, Kwon MJ, Chun JH, Shin JH. 2006. Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean fir in Mt. Halla (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 95(6): 705-710.
- 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
- MacKenzie WH, Mahony CR. 2021. An ecological approach to climate change-informed tree species selection for reforestation. *Forest Ecology and Management* 481: 118705. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118705
- Magnan AK, Schipper ELF, Burkett M, Bharwani S, Burton I, Eriksen S, Gemenne F, Schaar J, Ziervogel G. 2016. Addressing the risk of maladaptation to climate change. *WIREs Clim Change* 7(5): 646-665.
- 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, et al. (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: Cambridge University Press. p. 869-898. doi: 10.1017/CBO9781107415379.020
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2019. *Conservation and Status of Endangered Conifers in Subalpine Forest in Republic of Korea*. Seoul, Korea: Lim JH, Kim ES, Park GE, Kim YS, Jang KC, Han JG, Jung SC, Lim HI, Lee B, Song WK, Joh NH, Yoon SH.
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2023. *The first synthesis report on climate change impact assessment for forest sector*. Seoul, Korea: Yang HM, Choi WI, Park GE, Kim ES, Jang KC, Lim JS, Lee MW, Kim YR, Koo JJ, Jung JB, Park CO, Park SY, Lee B, Jung JY, Park JH, Choi HT, Jang YS, Kim CW, Um YR, Kim SJ, Kwon CG, Ahn HY, Yoo S, Nam YW, Joh YC, Seol JW, Jung SH, Park YH, Park CY, Lee JK, Lim SJ, Koh DW, Sohn DC, Um CD, Kim GH.
- Park BJ, Byeon JG, Heo TI, Cheon K, Yang JC, Oh SH. 2023. Comparison of species composition among *Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière forests in Northeast Asia (from China to South Korea). *J Asia-Pac Biodivers* 16(2): 272-281. doi: 10.1016/j.japb.2022.10.006
- Park DE, Lee JE, Park GE, Yang HM, Kim HJ, Yun CW. 2024. Vegetation change of *Abies koreana* habitats in the subalpine zone of Mt. Jirisan over eight years (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 113(2): 222-238. doi: 10.14578/jkfs.2024.113.2.222
- Park GE, Kim ES, Jung SC, Yun CW, Kim J, Kim J, Kim JB, Lim JH. 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
- Park JH, Lim HI, Seo HN, Yoon YH. 2023. Effects of shading treatments on growth of *Abies koreana* seedlings in high-temperature and high light

- environments (in Korean with English abstract). *J Environ Sci Int* 32(11): 811-820. doi: 10.5322/JESI.2023.32.11.811
- Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, editors. 2007. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schuldt B, Buras A, Arend M, Vitasse Y, Beierkuhnlein C, Damm A, Gharun M, Grams TEE, Hauck M, Hajek P, Hartmann H, Hiltbrunner E, Hoch G, Holloway-Phillips M, Körner C, Larysch E, Lübke T, Nelson DB, Rammig A, Rigling A, Rose L, Ruehr NK, Schumann K, Weiser F, Werner C, Wohlgenuth T, Zang CS, Kahmen A. 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 45: 86-103.
- Shi L, Moser S. 2021. Transformative climate adaptation in the United States: Trends and prospects. *Science* 372(6549): eabc8054. doi: 10.1126/science.abc8054
- Siders AR, Pierce AL. 2021. Deciding how to make climate change adaptation decisions. *Curr Opin Environ Sustain* 52: 1-8. doi: 10.1016/j.cosust.2021.03.017
- Song JH, Han SH, Lee SH, Yun CW. 2021. Ecological characteristic of *Abies koreana* stand structure of Mt. Jirisan and Mt. Hallasan (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 110(4): 590-600. doi: 10.14578/jkfs.2021.110.4.590
- 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*. Ottawa, Canada: Canadian Council of Forest Ministers.