

NIE IR 16-01(통권 1호)

ISSN 2508-4690 (Print)
ISSN 2508-5123 (Online)

NIE Issue Report

아고산 침엽수림 쇠퇴 원인과 대책



한라산 구상나무 대군락

국립생태원
NATIONAL INSTITUTE OF ECOLOGY

NIE Issue Report

아고산 침엽수림 쇠퇴 원인과 대책

작성 김진희 / 생태보전연구실 선임연구원
(jkim@nie.re.kr, 041-950-5383)
박은진 / 생태보전연구실 실장
박정수 / 생태평가연구실 연구원
최철현 / 생태보전연구실 전문위원

목 차

요약

- 「NIE Issue Report」는 특정분야의 정책 제안이나 연구동향을 시의성있게 제시하여 정책의 방향설정과 실현에 도움을 주고자 작성된 자료입니다.
- 「NIE Issue Report」에 게재된 내용은 국립생태원의 공식견해와 다를 수 있음을 밝힙니다.

- I. 아고산 침엽수림 쇠퇴현황과 원인
- II. 아고산 침엽수림 보전관련 외국사례
- III. 시사점 및 대응방안

I. 아고산 침엽수림 쇠퇴현황과 원인

전 세계적으로 침엽수의 집단고사 현상이 증가되는 추세

- 아시아, 유럽, 북아메리카 등 세계 곳곳에서 90년대 후반부터 수목의 고사 현상 급증을 보고¹⁾
 - 아시아의 경우 중국, 러시아, 터키등에서 가뭄에 의한 침엽수의 광범위한 고사 영향 확인
 - 심각한 엘니뇨로 말레이시아(12~28%), 인도네시아 보르네오의 열대우림(37~82%), 극심한 가뭄에 의한 한국의 구상나무(20~50%), 사우디아라비아의 펜슬시더(*Juniperus procera*)(30%), 중국의 소나무과(500,000ha), 러시아 산림(400,000ha) 피해 보고

〈 아시아의 침엽수림 고사 지역 분포 〉



터키의 전나무와 곰솔림(좌), 중국 윈난의 소나무림 11만3천ha(중앙), 중국 산시성의 만주곰솔림 50만ha(우상), 한국 한라산의 구상나무림(우하)

자료: Craig et al. (2010)

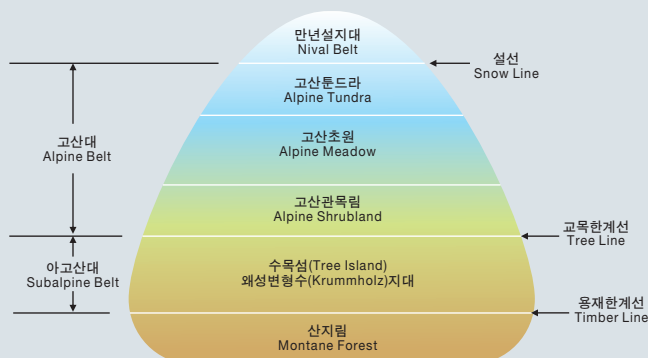
1) Craig et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest ecology and management 259(4): 660-684.

- 스위스, 프랑스, 폴란드, 그리스를 포함한 유럽의 많은 지역도 1970년 이후 반복되는 가뭄에 의한 침엽수림 고사현상(~20%) 급증
 - 노르웨이의 독일가문비나무림, 그리스의 브루티아소나무림, 세팔로니아전나무림, 스위스의 구주소나무림, 스페인의 유럽곰솔림 등 가뭄으로 인한 심각한 피해 보고
- 북미대륙의 경우도 미 서부를 중심으로 소나무, 전나무, 가문비나무 등이 가뭄으로 광범위하게 고사 증가

▶ 아고산대(subalpine)의 구분 및 특성

- 미국의 생태학자 Weaver and Clements(1938)가 냉대림(boreal forests)과 대조되는 고지의 침엽수림대를 구분한 것이 시초
- 주로 고도에 따라 산지림, 아고산대, 고산대 등을 구분하나, 지역별 식생유형이나 기후, 생태계 구조 및 특성 등을 고려한 구분이 필요

〈산악경관의 수직적 분포〉



▶ 지역별 아고산대 정의

- 유럽 : 성장이 왕성한 교목산지림과 고산초지의 전이지역으로 활엽수보다는 침엽수가 우점하며, 연간 생육기간이 약 100~200일 가량 지속되는 지역
*참고: Engler et al, 2011, 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe, Global Change Biology 17(7): 2330-2341.
- 미국 : 고산지대와 산림대의 추이대(ecotone forest)로 수목한계선 아래에 위치하며 고산지대 보다는 기후조건이 양호하나 낮은 기온과 짧은 생육기간의 특징을 보임
*참고: Steve et al, 1993, Flora of the Fraser Experimental Forest, Colorado, USDA Forest Service
- 일본 : 고산지대와 산지대 사이, 혼슈 중부의 산악지방에서는 해발 1,700~2,500m에 해당하며 솔송나무 등의 상록 침엽수가 주로 생육(환경성)

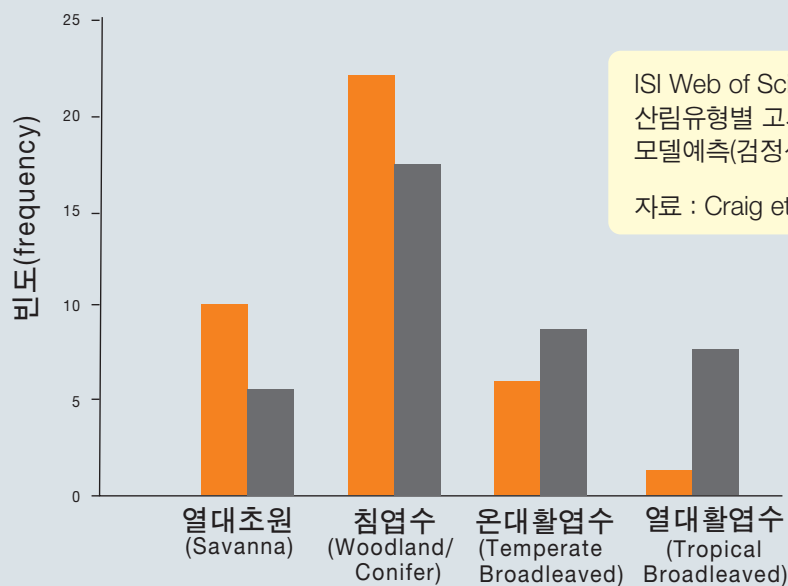
▶ 기후변화와 아고산대 생태계

- 아고산은 극지와 함께 기후변화에 가장 민감한 생태계로서 분포역이 좁은 생물들이 많아 멸종위기종나 희귀종으로 지정되어 있는 경우가 다수
- 아고산대에 서식하는 생물은 대부분 낮은 온도에 오랫동안 적응하여 왔기 때문에 급격한 기온상승은 생장에 심각한 장애요인으로 작용 가능
- 기후변화로 인한 폭염이나 태풍, 홍수 등의 극한기상 현상 증가로 도복이나 풍수해 등 피해 확률 증가. 또한, 기온 상승은 해충들의 활동범위를 증가시켜 과거보다 총해의 영향을 받는 지역이 광범위해지고 피해 가중될 것으로 예상

■ 고온과 가뭄이 고사의 가장 큰 원인으로 알려져 있고 특히, 침엽수림 생물군계(Biome)가 가뭄에 취약하여 더 급격히 쇠퇴

- 가뭄으로 인한 고사피해 연구보고는 침엽수가 가장 많았는데, 이는 예측된 것보다 높은 수치
- 특히, 북미의 장기생태 모니터링 결과로 1970년대 이후 미 서부지역 침엽수 고사율은 지속적으로 증가, 그 중 최근 소나무류의 급격한 고사율 증가 확인

〈 가뭄에 의한 고사 관련 논문 DB 분석 결과 〉



국내에서도 침엽수, 특히 구상나무 집단고사와 쇠퇴 확인

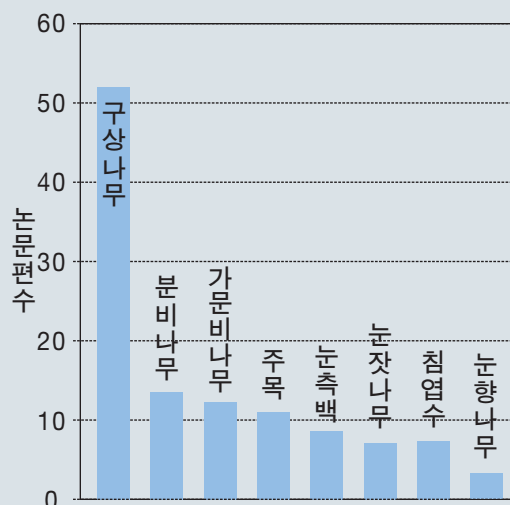
- 1990년대부터 지리산, 한라산, 설악산 등의 한반도 대표 아고산대에서 침엽수 집단고사 확인으로 관심 집중
 - 국내의 아고산대에는 구상나무, 분비나무, 가문비나무, 주목, 눈썻백, 눈잣나무, 눈향나무 등의 침엽수종이 분포
 - 지금까지 조사연구로 볼 때, 구상나무가 지리산과 한라산 등에서 두드러지게 고사하고 있는 것으로 나타났고 구상나무와 함께 분비나무도 오대산과 설악산에서 현저하게 고사
 - 반면, 가문비나무와 주목의 고사율은 상대적으로 낮고, 그 외 눈잣나무, 눈향나무, 눈썻백 등 기타 아고산 침엽수종에 대한 정보는 미흡

- 가문비나무는 지리산, 덕유산, 계방산에만 생육하고 분포면적과 고사율이 구상나무나 분비나무에 비해 낮은 상태
- 주목은 한반도 아고산지역에서 흔히 발견되는 수종으로 강한 생명력과 생태적 수명이 길어 고사율 낮은 경향

〈국립공원 내 아고산 침엽수종 평균 고사율 현황(왼쪽) 및 수종별 조사·연구 빈도(오른쪽)〉

※1984~2015년 발표된 국내 관련 연구논문 및 보고서 총 83편 분석 결과

국립공원	수종	고사율(%)	조사방형구
설악산	분비나무	19.9	70
오대산	분비나무	34.1	3
	주목	12.8	1
태백산	주목	8.2	18
덕유산	구상나무	18.2	27
지리산	구상나무	37.0	110
	가문비나무	15.7	33
가야산	구상나무	4.7	19
한라산	구상나무	43.5	35



■ 특히 구상나무의 고사와 쇠퇴가 지역적으로 심각하게 나타나 원인규명과 대책이 시급히 요구되는 상황

- 위성영상 및 항공영상 분석을 통해 구상나무 서식지 변화를 추정한 결과, 1998년 이후 15년간 한라산에서 34%, 1981년 이후 27년간 지리산에서 18%의 서식지 분포면적 감소 확인²⁾
- 지리산에서 구상나무 고사율이 높은 곳은 강한 바람, 봄철 가뭄의 피해를 쉽게 받는 돼지령, 반야봉 등의 능선 부위
 - 계곡부는 능선부에 비해 안정적인 수분 공급과 강풍에 의한 피해가 적어 비교적 양호한 생육상태 유지
 - 지리산 돼지령의 경우, 조릿대 이외에도 미역줄나무나 개다래와 같은 덩굴성식물에 의한 구상나무 피압이 빈번히 관찰되는 상태
 - 접근이 용이한 지리산 서부지역에 아고산 침엽수 실태 조사가 주로 이루어지고 있으며, 기타 지역은 연구가 부족

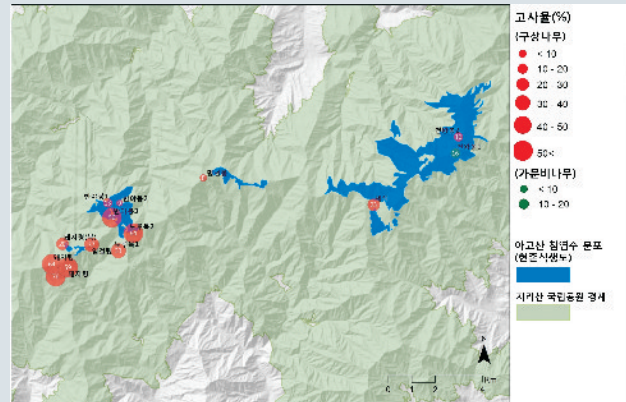
2) 김남신, 이희천, 2013. 아고산 지역의 구상나무 분포 변화에 관한 연구. 한국환경보존기술학회지 16(5): 49-57.

- 한라산에서 구상나무 고사율이 가장 높은 지역은 진달래 대피소에서 백록담 구간으로 해발 1,700m 이상 지역에서 60% 이상 고사
 - 백록담 남벽 계곡부는 구상나무 밀도가 가장 높고 생육이 비교적 양호하나, 하층 식생인 조릿대 밀생으로 치수 발생률은 저조
 - 국립공원 지정 이후 방목 금지와 기후변화 영향으로 제주조릿대가 하층 식생으로 우점하면서 구상나무 후계목 발생 방해

〈 지리산 구상나무 고사 현황 〉



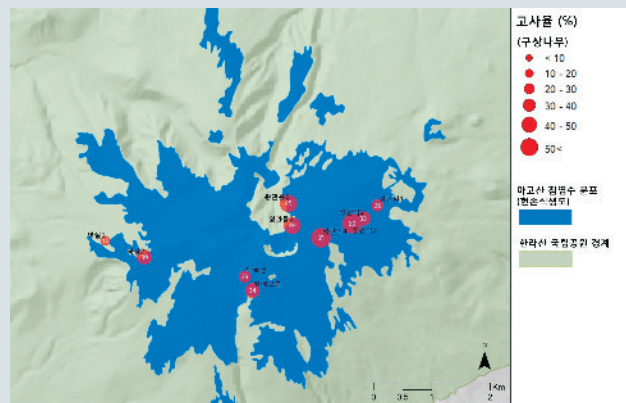
지리산 피아골 (해발 1,400m),
구상나무와 소나무 혼재



〈 한라산 구상나무 고사 현황 〉



한라산 진달래밭 부근
(해발 1,730m)

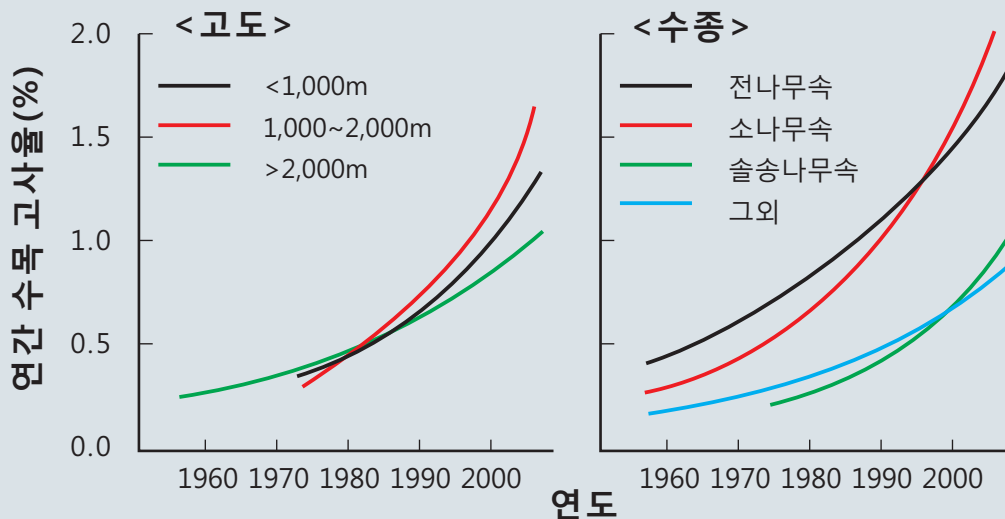


가뭄과 고온 영향이 뚜렷한 외국사례와 달리

국내 아고산 침엽수 고사원인은 복합적이고 미지형 요인으로 더 복잡

- 미서부의 경우, 기후변화에 따른 이상기후로 심한 가뭄과 고온이 장기적으로 발생하고 산불과 해충이 동시에 작용³⁾
 - 이 지역의 기온이 10년마다 평균 0.3~0.4℃ 상승하였는데 특히 고지대에서 0.5℃ 상승한 것이 침엽수 고사율의 급격한 증가와 관련되는 것으로 결론
 - 수목의 고사는 가뭄, 기온상승과 같은 기후변화 스트레스뿐 아니라, 해충, 질병, 수목의 역사, 수종의 생리적 저항력 등 복합적인 요인에 의해 결정⁴⁾
 - 가뭄과 고온현상의 지속이 뚜렷하여 수목의 생리적 내성을 저하시키고 질병이나 해충 영향을 더 받게 되는 연관성 명확

〈 고도와 수종에 따른 고사율의 차이 〉



자료: Mantgem et al.(2009)

3) Mantgem et al, 2009, Widespread increase of tree mortality rates in the western United States, Science 323(5913): 521-524.

4) Miao et al, 2009, Vegetation responses to extreme hydrological events: sequence matters, The American Naturalist 173(1): 113-118.

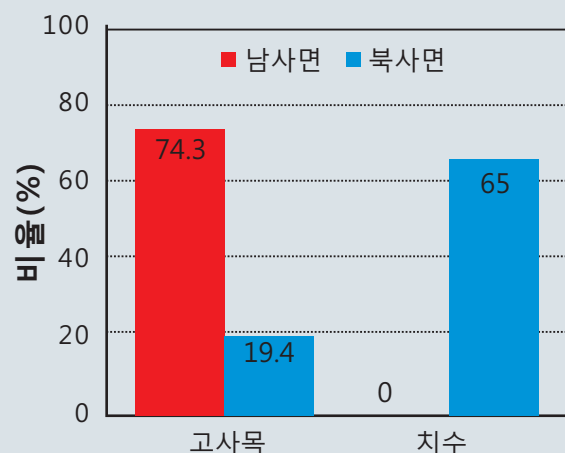
■ 국내에서도 점진적인 기온 상승과 강풍, 폭우 등 극한 기상 발생 증가로 기후변화 영향의 개연성 존재

- 국내의 최근 30년간(1981~2010) 관측 자료에서 우리나라도 전지구적 기후변동 추세와 마찬가지로 기온 상승 확인⁵⁾
- 모든 계절에서 기온 상승 경향을 보이고, 연평균 기온 1.2℃ 상승
- 20세기 중반 이후(1954~2010) 호우 빈도와 강도의 증가로 연강수량 중 호우가 차지하는 비율 상승⁶⁾
- 그러나, 이러한 기후변화 양상이 아고산 침엽수림 쇠퇴의 직접적 원인인지, 구체적으로 어떻게 영향을 미치는지에 대한 설명은 불명확
- 기존 연구 대부분 아고산 침엽수림의 쇠퇴 실태에 집중하고 원인에 대한 구체적 입증 없이 '온난화에 따른 생육환경의 변화'라는 다소 추상적이고 성급한 일반화 결론 도출 경향⁷⁾

■ 한반도는 높은 지형적 다양성으로 환경요인의 미지형적 차이 및 이에 따른 아고산 침엽수 밀도와 활력도 차이 크게 발생

- 계곡부와 능선부, 남사면과 북사면 등 미지형적 요소 차이에 따라 구상나무의 고사율과 치수 성장 상태의 차이 크게 발생
- 지리산 능선부(돼지령) 구상나무는 강풍과 건조 스트레스로 인해 계곡부(거림계곡)에 비해 고사율 높음
- 또한, 상대적으로 눈이 빨리 녹아 봄철 가뭄 피해를 입기 쉬운 남사면에서 고사율이 높고 치수(수고 1m 이하 어린 수목) 성장 불량

〈지리산 능선부(돼지령)의 향에 따른 구상나무 성장상태 비교⁸⁾〉



5) 기상청. 2012. 한반도 기후변화 전망 보고서.

6) 최영은 등. 2011. 남한 극한 강수 사상의 특성과 변화, 1954~2010년 -규모, 발생빈도, 강수량 기여비율을 중심으로-. 기후연구 6(1): 45-58.

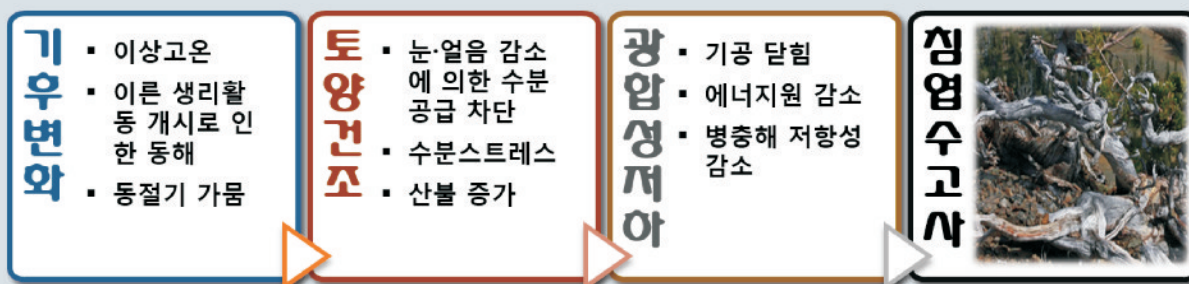
7) 기존의 관련 국내 연구 논문 및 보고서(83편) 분석 결과

8) 국립생태원. 2015. 기후변화에 의한 아고산 생태계 적응 연구. 국립생태원 최종보고서

■ 겨울철 기온상승과 토양수분 부족, 종간경쟁, 강풍이나 태풍 등 극한 기상 영향 등이 복합적으로 작용 가능

- 겨울철 이상 고온으로 눈이 일찍 녹고 봄철 가뭄이 발생함으로써 아고산 침엽수 고사 가능
 - 미래 기후변화 시나리오에 따르면 겨울철의 기온 상승폭이 여름보다 크고, 강수량은 여름철에 주로 집중될 것으로 예측⁹⁾
 - 이론적으로 겨울철 고온과 봄철 가뭄 등 이상기후 현상은 토양수분을 감소시키고 광합성을 저하시켜 점차적으로 침엽수 고사 가능

〈 기후변화에 따른 침엽수 고사의 이론적 메카니즘¹⁰⁾ 〉



- 구상나무 군락 유지에 영향을 미치는 생물학적 위협 요인은 조릿대 등 하층식생 증가에 따른 치수 발생 감소
 - 조릿대의 지하경과 낙엽이 지면을 두껍게 덮어 구상나무 종자의 정착과 발아를 저해하고, 빛을 차단해 광합성 방해
 - 암석노출이 많아 조릿대, 신갈나무 등과의 경쟁을 피할 수 있는 미소지형에서 구상나무 군락이 안정적으로 유지되는 경향
 - 특히 기온이 낮고 습도가 높은 북사면이 건조스트레스가 적은 환경으로 파악
- 구상나무는 주로 바위틈에 뿌리를 내리는 천근성 수목으로 능선부와 같이 강풍이 잦은 지역에서 고사 발생 빈번
 - 한라산과 지리산의 능선부는 계곡부에 비해 강풍의 영향을 많이 받아 넘어지거나 부러진 수목 발생 비율이 높은 것으로 조사

9) 홍성유 등, 2011. 전국 및 지역기후 모델 결과에 근거한 동아시아 및 한반도 지역기후 변화 전망 연구 소개 및 고찰. 한국기후변화학회지 2(4): 269-281.

10) 국립산림과학원, 2009. 지구온난화에 의한 산림피해 가시화-소나무 고사원인과 미래전망. 국립산림과학원

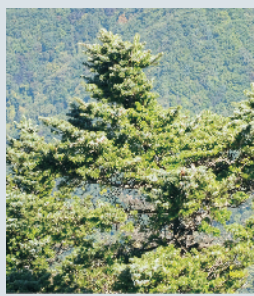
▶ 한반도의 아고산 식물¹¹⁾

- 한반도의 아고산 침엽수림대는 가문비나무속, 전나무속, 소나무속, 잎갈나무속 등의 침엽수종과 자작나무속과 사시나무속 등의 활엽수종이 대표적인 식생으로 구성
- 목본류 고산식물은 약 180여종(활엽성 158종, 침엽성 22종)으로 이 중 특산종은 58종
- 초본류 고산식물은 187종(다년생 177종, 일년생 6종, 이년생 4종)이며, 47종이 특산종

〈 한반도의 대표 아고산 침엽수 7종¹²⁾ 〉



구상나무(한라산)



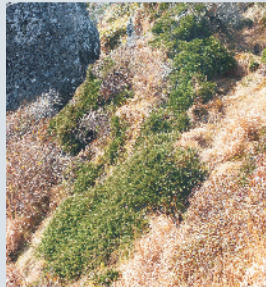
분비나무(계방산)



가문비나무(지리산)



주목(설악산)



눈향나무(한라산)



눈측백(계방산)



눈잣나무(설악산)

11) 공우석. 2002. 한반도 고산식물의 구성과 분포. 대한지리학회지 37(4): 357-370.

12) 이중효 등. 2014. 아고산 침엽수 군락. 국립생태원.

II. 아고산 침엽수림 보전 관련 외국 사례

1. 미국 옐로우스톤 국립공원 : 생리적 생태적응 기작 기반 대응

- 기후 온난화는 직접적으로 또는 산불, 경쟁종, 질병 및 해충 발생에 간접적으로 영향을 주며 흰수피소나무의 50% 이상 고사 피해 유발
 - 1990~2007년간 미국 옐로우스톤 국립공원의 흰수피소나무(white bark pine) 50% 이상이 고사되었으며, 2100년까지 남아있는 흰수피소나무의 66% 이상의 서식지 위협 예측¹³⁾
 - 기후의 적합성, 종간경쟁, 산불, 소나무딱정벌레, 흰수피소나무 녹병, 종자의 확산 등이 흰수피소나무의 서식지 제한요인
 - 생리적 내성범위(tolerance)를 초과하는 기후 온난화는 직접적으로 흰수피소나무의 정착, 성장과 생존 저하 초래
 - 간접적으로는 경쟁종, 산불, 소나무 딱정벌레, 녹병이 흰수피소나무의 성장과 번식에 부정적인 영향 유발
- 직·간접적 위협요인에 직면한 흰수피소나무의 생존과 적응 생태기작 연구를 기반으로 종합 보호대책 마련
 - 옐로우스톤 국립공원 조정위원회에서 아고산대에 서식하는 침엽수종 보호를 위한 연구 확대와 종합대책 수립 시행¹⁴⁾
 - 기후변화에 대하여 취약한 아고산 수종의 생존능력을 향상시키기 위한 연구 분야 확대
 - 기후정보의 관리, 생태적 예측, 정책의 재평가, 정부부처간의 협력 방안에 대한 방향 제시

13) Hansen et al. 2016. Complex challenges of maintaining Whitebark pine in Greater Yellowstone under climate change: a call for innovative research, management, and policy approaches. *Forests* 7(3): 54.

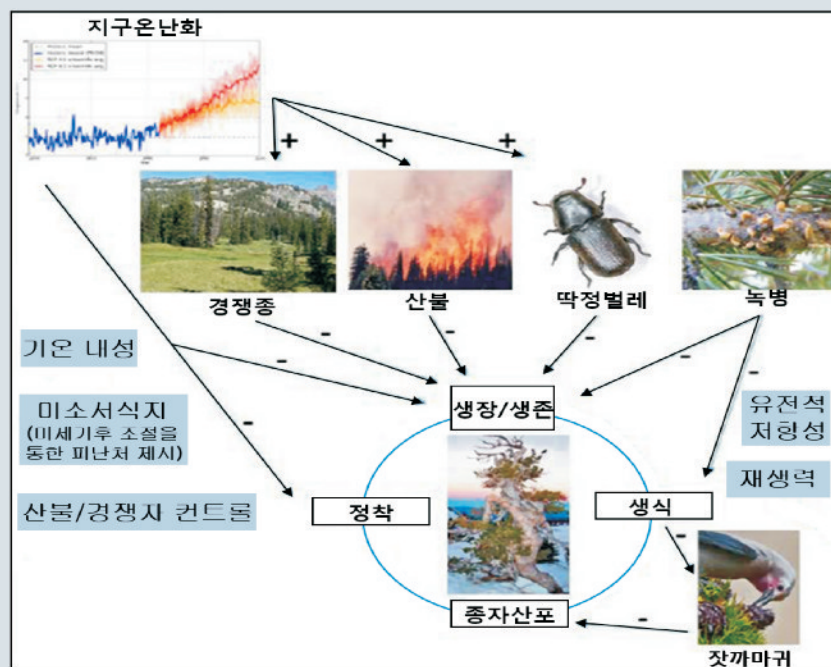
14) <http://www.fedgycc.org>

▶ **엘로스톤 국립공원 조정위원회**(Greater Yellowstone Coordinating Committee, GYCC)

- 엘로스톤 국립공원의 지역 보호와 공공서비스 제공을 위한 조정 및 협력체계 구축을 위하여 1964년 미국 국립공원관리공단(National Park Service, NPS)과 산림청(U.S. Forest Service, USFS) 간의 업무협약 체결로 구성
- 2002-어류 및 야생동물관리국(U.S. Fish and Wildlife Service, USFWS), 2012-토지관리국(U.S. Bureau of Land Management, BLM) 동참
- 2001년 흰수피소나무 보호를 위한 분과위원회 구성
 - 2006-2011: 흰수피소나무 보호 전략 개발
 - 엘로스톤 지역 흰수피소나무 보호 전략(2011년 5월) 및 적응 행동 계획 수립(2015년 6월)

〈엘로우스톤 국립공원에서 흰수피소나무의 위협요인에 대한 보전·적응 기작〉

위협요인	적응 기작
기후변화	미소서식지 이동(신뢰도 높음)
기후변화에 대한 내성(저항성)	기후변화에 대한 내성 증대 (신뢰도 중간)
종간경쟁	내성 증대로 생존을 증가와 경쟁관계 완화(신뢰도 높음)
산불	흰수피소나무는 적당한 화재를 선호(신뢰도 낮음)
소나무좀	중간크기 수목(흉고직경 18~25m)은 소나무좀에 대해 높은 저항성 보유(신뢰도 높음)
흰수피소나무 녹병	자연적/인공적 방법을 통한 병저항성 획득(신뢰도 높음)



자료: Hansen et al.(2016)

2. 미국 콜로라도와 캘리포니아 : 협의체 구성과 대책 가이드라인 마련

■ 콜로라도와 캘리포니아의 상징적 침엽수종들이 기후변화로 가속화된 병충해와 산불피해로 급격히 고사하면서 절멸 위기로까지 우려

- 콜로라도 주는 2010년 이후 로키산맥에 분포하는 상징적인 침엽수들의 큰 피해 상황 보고
 - 2000~2012년간 1천9백만ha에 달하는 소나무림이 소나무좀에 의해 피해를 입은 것으로 확인
 - 산불은 1970~1986년과 비교하여 1987~2003년에 4배 정도 증가하였고, 이 증가 추세는 기온의 상승 및 심각한 가뭄 빈도의 증가와 일치
- 캘리포니아에서도 2010년 이후 주 국유림에서 약 6천6백만 그루(66 million trees)가 고사¹⁵⁾
 - 2015년 한 해 동안에만 2천9백만 그루의 나무가 고사된 것으로 확인
- 과거보다 최근 기온의 상승이 더 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였고, 그에 따른 병충해 피해와 산불 발생도 증가한 것으로 해석
 - 병충해에 의한 피해는 최근 더 빠르게 증가하고, 피해기간도 길어지고 있는 추세로, 소나무류의 경우 해충의 침입을 어렵게 하는 송진(resin)의 생산량이 고온이나 가뭄에 의한 스트레스로 감소하기 때문

■ 복합적 원인에 종합적으로 대응하기 위해 정부, 민간단체, 연구자 그룹의 협력과 종합대책 추진

- 로키산맥의 침엽수 보호를 위해 콜로라도 주는 전문가그룹 간 협력과 공동 대응 중요성을 인식하고 필요 연구분야 선정 및 연구지원, 심포지엄을 통한 결과공유 등을 추진하여¹⁶⁾ 대응전략과 6단계 가이드라인 도출¹⁷⁾
 - 흰수피소나무 보호를 위해 질병(녹병) 저항성 증대, 유전적 다양성 보전, 채종림 유지, 복원사업 추진을 주요전략으로 선정
 - 전략의 실행방안으로 과학적 연구 수행, 모니터링과 진단 및 평가, 종자확보와 양묘 및 유묘 식재, 수목의 보호와 치료 및 해충방제 등 제시
 - 또한, 위험성평가, 이해관계자 참여, 회복력 관리, 지역사회 취약성 해소, 탄소배출저감 등의 실용 가이드라인을 제시

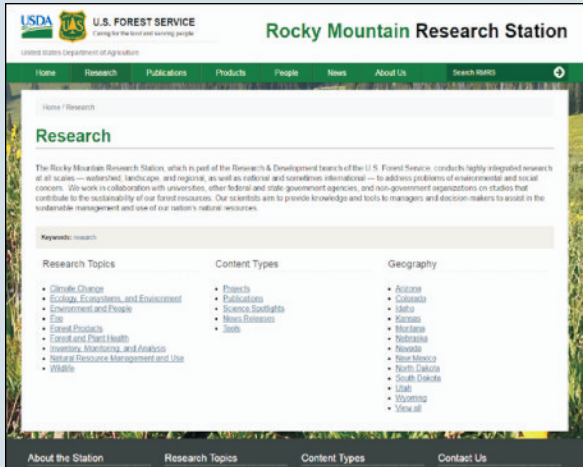
15) <http://www.fs.usda.gov/detail/catreemortality/response/?cid=fseprd498117>

16) Keane et al. 2011. The future of high-elevation, five-needle white pines in Western North America: Proceedings of the High Five Symposium.

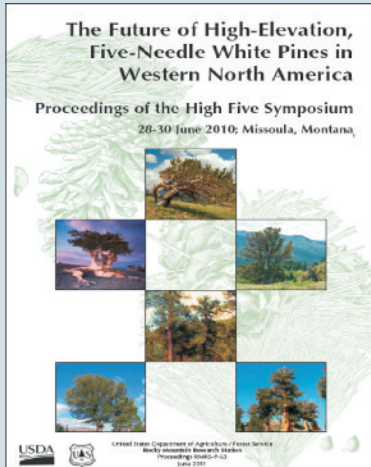
17) Funk et al. 2014. Rocky Mountain forests at risk: Confronting climate-driven impacts from insects, wildfires, heat, and drought.

Report from the Union of Concerned Scientists and the Rocky Mountain Climate Organization, Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists.

〈미산림청-로키산연구센터 홈페이지〉



〈협의체 심포지엄〉



〈협의체 연구분야〉

- 생태학
- 소나무좀(mountain pinebeetle) 개체군 동태
- 유전학
- 교란생태학과 기후변화
- 녹병 생태학과 평가
- 녹병 유전 저항성
- 복원 관리

〈콜로라도 로키산맥의 산림자원 보호를 위해 채택된 가이드라인〉

단 계		주요내용
1	위험성 평가	■ 정책입안자들이 산림보호를 위하여 올바른 정책을 선택할 수 있도록 과학적 정보 제공
2	이해관계자 참여	■ 기후변화가 산림에 영향을 미치는 영향은 복잡하고 복합적이기 때문에 협력을 통한 대응 필요
3	회복력 관리	■ 기후변화와 관련하여 보호가 필요한 중요자원을 평가하고, 기후변화에 따른 복합적 요인이 산림에 미치는 영향 저감
4	공공기관 역량강화	■ 국가의 중요한 천연자원의 기후변화 위협요인에 대한 관리 및 대처방안 마련을 위한 자금지원 필요
5	지역사회 취약성 해결	■ 지역의 특성에 맞게 취약성 해결을 위한 노력 ■ 산불이 잦은 지역의 경우, 산불방지를 위해 사람출입 제한 등
6	탄소배출저감	■ 온난화 속도를 줄이기 위한 노력

자료: Funk et al. (2014)

- 캘리포니아 경우, 2015년 비상사태를 선포하고 주정부 및 연방기관, 지방자치단체, 비영리단체 등으로 구성된 ‘수목고사 전담팀’ 구성 및 이해당사자 그룹별 대응전략 목표를 설정

〈캘리포니아의 산림고사 취약성 대응 전략(목표)¹⁸⁾〉

관련 이해당사자	전략목표
생태학자	■ 산림취약성 관련 모든 요인 파악 및 산림생태계 과학적 정보 제공 ■ 장기관측시스템 유지 및 확장
식물생리학자	■ 기온 및 스트레스 조건 등 고사 메커니즘 규명(원인 파악)
원격탐사전문가	■ 전지구적 차원의 산림 스트레스 및 고사 탐지와 기술개발 ■ 실시간 산림현황 모니터링 및 모델 개발
식생·지구환경 모델링 전문가	■ 다양한 전지구 식생모델을 통한 수목고사 과정의 실증 ■ 모델의 민감도 분석 및 기후 관련 수목고사의 경험 모델개발
대기 모델링 전문가	■ 대기변화에 기인한 식생변화 평가, 광역적인 수목고사와 기후의 상관 평가 ■ 강수, 극한 가뭄 및 열파 시뮬레이션 개선
임업인	■ 유전적 다양성 확보 ■ 가뭄 및 고온으로 인한 수목 고사와 산불, 병충해와의 상호작용 인식
보전 및 토지관리자	■ 가뭄 스트레스에 대해 복원력이 높은 국지적 기후 피난처 보호 ■ 완화방안 마련. 특히 노거수와 숲의 서비스제공, 잠재적 물 보유/확장
산림자원 및 서비스 이용자	■ 예측할 수 없는 수목 고사에 대응한 협력체계 구축
기후관련 교육기관	■ 가뭄과 고온에 의한 수목 고사의 예를 활용한 기후변화 현상 교육
기후변화 관련 연구자 및 기술자	■ 기후변화 리스크 및 산림자원 손실 관련 연구기관과의 긴밀한 협업 ■ 자료 축적, 기술개발, 아이디어 논의 등
연구비 출연 기관	■ 역학적/경험적 근거를 포함하는 산림고사 관련 연구 지원
정책입안자	■ 기온상승으로 인한 가뭄의 부정적 영향을 완화할 수 있도록 온실가스 배출 감소 정책 수립
공공기관	■ 대체가 불가능한 산림과 생태계 서비스에 대한 가치 인식 ■ 지구적 변화로 인한 산림 리스크 저감을 위한 정책 지원

3. 유럽 : 기후변화 적응능력 평가 및 적응을 위한 산림관리 실시

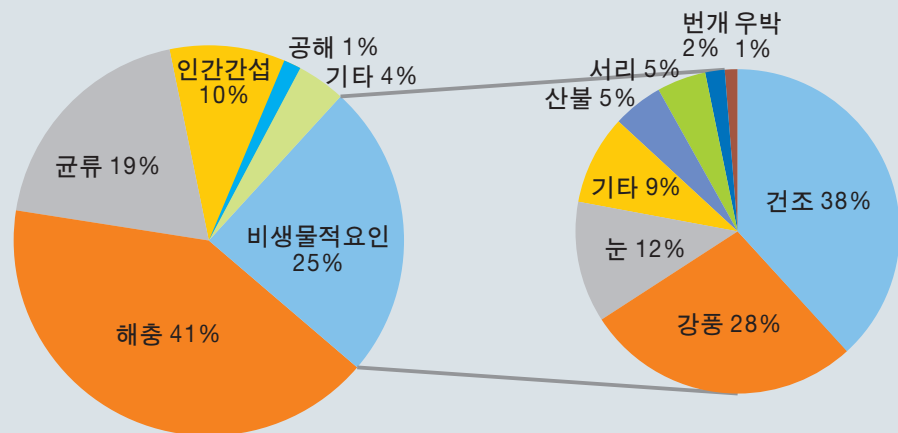
- 강풍과 건조 등 비생물적 요인에 의해 아고산대 침엽수 고사가 증가하고 있는 것으로 파악
 - 기후변화의 영향으로 유럽 중·남부 지역은 여름철 기온은 상승하고 강수량은 감소하여 열파와 가뭄의 피해가 증가하고 있으며, 알프스 산악지역은 전지구 평균보다 두 배에 가까운 기온 상승(약 +1.5℃)¹⁹⁾

18) Allen et al, 2015, On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene, Ecosphere 6(8): 1-55.

19) Beniston et al, 2007, Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections, Climatic change 81(1): 71-95.

- 아고산대 조사 지점 (N=297)에서 평균 25%의 침엽수가 피해를 입었으며, 다른 산림 유형에 비해 비생물적요인에 의한 피해가 큰 비중(33%) 차지²⁰⁾
 - 유럽 산림 주요 고사 원인은 평균적으로 해충, 균류 등의 생물학적 원인이 60%, 건조와 강풍 등 비생물적 요인이 25%이며, 비생물적 요인 중에서도 건조가 38%로 큰 비중 차지

〈유럽 산림 고사의 원인〉



자료: European Forest Institute(2011)

- 알프스 지역 아고산 침엽수 보호를 위해 유럽산림기구(European Forest Institute(EFI)) 중심으로 기후변화 적응능력 평가 및 적응행동 적용²¹⁾
 - 산림의 적응능력 평가를 위해 산림생태계 스스로 지니고 있는 내재적 적응력과 사회·경제적 적응력을 통합하여 평가
 - 유럽산림기구(EFI)는 기존 산림관리 방안을 기후변화 적응력 향상을 위한 방향으로 전환²²⁾
 - 산림 다양성(유전자, 종, 구조적) 확보를 위한 임분 관리 및 경영
 - 기후변화 기반 예측 모델을 통한 산림계획 및 의사결정
 - 기후변화 영향으로 증가할 것으로 예상되는 해충, 질병, 산불, 강풍피해 등에 대비한 산림경영계획 수립

20) European Forest Institute, 2011, Prevalence of biotic and abiotic hazards in European forests.

21) European Forest Institute, 2008, Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation.

22) Kolström et al, 2011, Reviewing the science and implementation of climate change adaptation measures in European forestry. Forests 2(4): 961-982.

〈산림의 적응능력 평가〉

단 계		항 목
내재적 적응력	개 체	후생학적 요인(epigenetic factors)에 의한 유전자 발현 변화 표현형 변화에 의한 순화(eg, 건조에 의한 기공 감소) 이형접합자(heterozygosity)의 적응 내성 증가
	개체군	자연선택(Natural selection)
	종	유전자 확산에 의한 지역적 적응력 향상 적합한 서식지로 이동
	군 집	다양한 수종 간에 경쟁과 촉진 이종간 교배
사회 · 경제적 적응력		기술력, 경제력, 기반시설 등의 사회 경제적 적응 능력 지수화

〈산림관리 단계별 적응행동 적용〉

단 계	적응행동의 유형 (Type of adaptation actions)
임분 관리 (Stand level)	■ 산림재생 - 기후변화 적응력이 뛰어난 종 선택 - 자연적, 인공적 재생을 통한 유전적 다양성 확보 ■ 임분 관리 및 간벌 - 기후변화로 인해 증가하는 수분, 양분, 빛 경쟁을 감소시키기 위한 간벌 - 산림의 구조적 다양성 확보
산림 경영 (Forest management)	■ 산림경영 계획 - 산림 종다양성 확보를 위한 산림 계획 - 아고산 지역 수목 생장 속도 증가를 고려한 관리 - 기후변화에 대응하기 위한 피난처(refuge) 보호 및 연결성 확보 - 예측 모델을 통한 산림 계획 및 의사결정 ■ 산림보호 - 기온상승으로 증가하는 해충(bark beetle), 질병 관리 - 산림 구조 및 임상 유기물 관리를 통한 산불 예방 - 천근성 수목 보호를 위한 바람의 강도/방향을 고려한 간벌 및 수확
정책 (Policy level)	■ 기반시설 및 운송 - 가뭄을 대응하기 위한 저수지 및 수로 확보 ■ 수목 육종 - 종다양성 확보를 위한 육종 - 기후변화에 대응할 수 있는 후보 유전자 선발 ■ 기타 위험요인 관리를 위한 적응 정책 수립

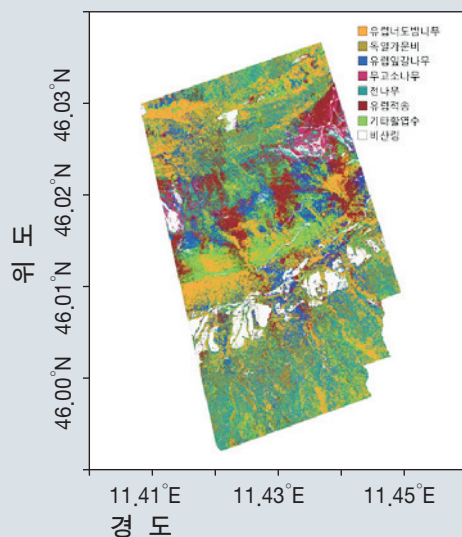
III. 시사점 및 대응방안

전체 분포도 작성 및 변화 모니터링 자료 축적으로 기후변화 현상과 영향의 정확한 진단

■ 아고산 침엽수의 전체 분포도 작성 및 변화 모니터링 추진

- 고해상 위성영상, 항공사진, 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 등 다양한 플랫폼 기반 리모트센싱 기술을 활용한 아고산 침엽수 분포 지도 작성 추진^{23, 24)}
 - 다중분광센서와 초분광센서 영상을 활용하여 임상분류, 수목 활력도 측정 및 고사목 탐지 등 정밀한 아고산 침엽수 모니터링 자료 구축
- 한반도 아고산 침엽수림의 층위구조, 군집구조 등 특성 유형화, 개체군 동태 및 생육상태 모니터링 추진

〈초분광 영상을 이용한 임상 분류〉



〈UAV를 이용한 고사목 탐지〉



23) Dalponte et al, 2012, Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data, Remote sensing of environment 123: 258-270.

24) Näsi et al, 2015, Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level, Remote Sensing 7(11): 15467-15493.

■ 장기적인 미기상 변화 및 생육환경 특성 조사 및 자료공유

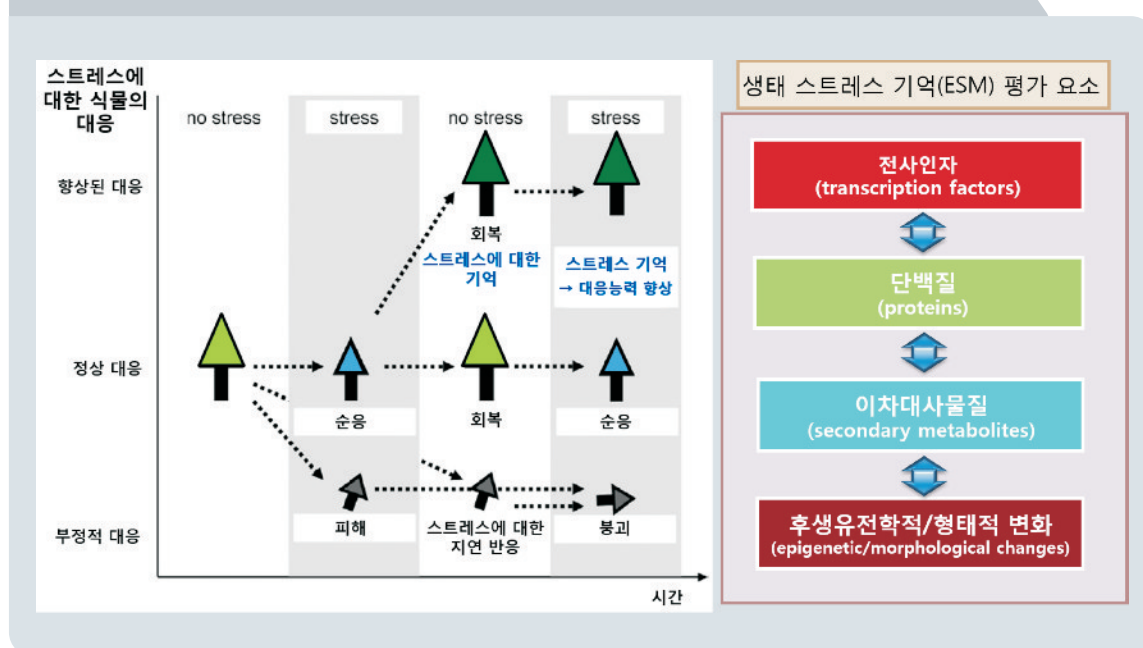
- 미기상 장비 설치 및 데이터 공유, 미지형적 요소 및 토양환경 등 생육환경 특성 조사 및 자료 공유

취약종의 생리적 적응능력 평가 및 미소서식지 변동 예측

■ 환경변화에 대한 침엽수종의 생리적 반응특성 및 내성범위 규명

- 가시적 결과 중심의 고사현상 파악에서 벗어나 이차대사산물 등 생리적 과정 특성에 기반하여 기후변화 민감 생물종과 그 취약성을 평가함으로써 근본적 고사원인 규명
- 환경변화에 취약한 침엽수종의 생리적 민감성과 반응 확인 등 연구를 통해 환경스트레스 내성범위와 적응능력 규명
 - 생태스트레스 기억(Ecological Stress Memory, ESM)능력을 전사인자, 단백질, 이차대사물질, 후생유전학적·형태적 변화 등 생리적·형태학적 변화로 평가하여 적응기작 및 능력 규명

〈생태스트레스 기억에 의한 식물의 반응과정(왼쪽)²⁵⁾ 및 평가 요소(오른쪽)〉

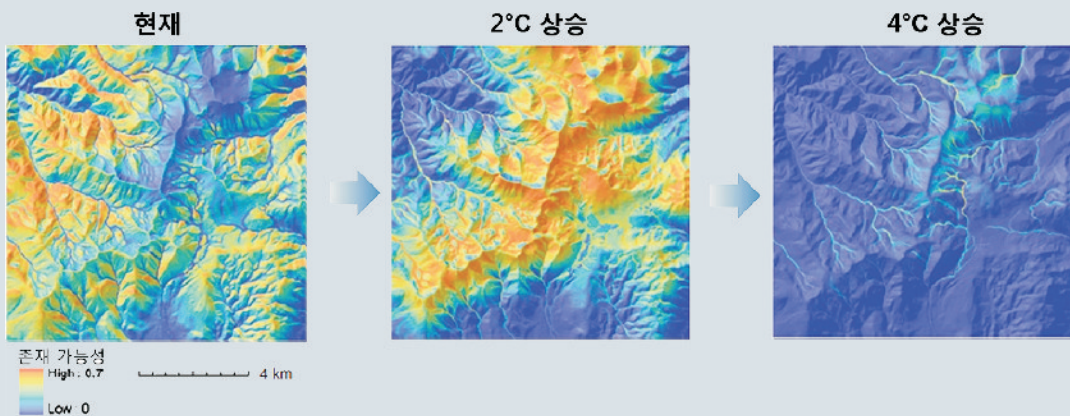


25) Walter et al. 2013. Ecological stress memory and cross stress tolerance in plants in the face of climate extremes, Environmental and Experimental Botany 94: 3-8.

■ 기후변화에 따른 미소서식지 변동 및 생물종 분포 변화예측 기술개발

- 한반도의 지형 복잡성과 아고산 침엽수 분포특성을 고려한 종분포 변화 예측 모델링 기법 개발
 - 유럽이나 미국의 침엽수림대와 달리 국내 아고산대는 미지형적 변화와 복잡성이 크기 때문에 그에 따른 침엽수종의 분포도 복잡하게 반응할 것으로 예측
 - 한반도 산악의 미지형과 미기상 특성을 반영할 수 있는 적정 공간규모의 종분포 변화 모델링 필요
- 침엽수종의 생리적 특성과 환경요인 간 관계를 분석함으로써 침엽수종이 이동 피난할 수 있는 미소서식지(microrefugia) 발굴
 - 생물의 내성범위를 벗어날 정도로 서식처의 환경이 변화되면 해당 생물종은, ① 다른 적절한 서식지로 이동하거나 ② 변화된 환경에 유전적으로 적응하거나 ③ 멸절되거나 하는 세 가지 중 하나를 선택
 - 미소서식지(피난처) 이동은 취약종이 기후변화에 대해 우선적으로 선택할 수 있는 중요 적응기작으로 이의 예측 · 발굴을 통한 보전대책 필요

〈더글라스잣나무의 미소서식지 변화 예측²⁶⁾〉



▶ 미국 캘리포니아 주에 분포하는 더글라스잣나무(*Abies magnifica*)의 미소서식지 변화 예측을 위하여 기온상승 시나리오에 따른 지형기후모델(topoclimate model) 적용 결과, 2°C 기온상승 → 아고산 지역으로 이동
4°C 기온상승 → 일부 계곡 부로 서식지 축소 및 절멸위기

26) Dobrowski, S. Z., 2011. A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate, Global Change Biology 17(2): 1022-1035.

취약종의 생태적응 기술 개발 및 증식·복원 사업 추진

■ 취약종의 생리적·유전적 반응기작에 기반한 생태적응 기술 확보

- 취약생태계에서 활용 가능한 진단 마커의 개발 및 기후변화 적응에 유용한 유전자원 발굴
- 침엽수종에 적응된 토양 미생물 확보·유지기법 개발 및 복원 활용
 - 균근, 공생균 등 토양 미생물의 생물다양성을 확인하고, 침엽수종에 적응된 균주를 확보·유지·연구하여 이들 간의 생태학적 상호관계 파악
 - 수목의 뿌리에서 균근의 확대는 양분의 흡수와 수분공급에 유리

■ 종자보존 및 증식, 미소서식지의 보전 및 복원사업 추진

- 구상나무 등 취약종의 묘포장 확대, 종자 유전적 다양성 확보 및 보존, 개체 증식 기술 개발
- 예측·발굴된 미소서식지의 보전 관리기술, 조릿대 등 경쟁종 제거 관리기술 개발 등 보전·복원사업 추진

〈침엽수 개체 증식 및 복원을 위한 기술 적용 사례²⁷⁾〉



- ▶ 외생균근의 형성유도를 통한 침엽수 실생묘 증식을 증가(좌) 및 병저항성 침엽수 개체 확보를 위한 고습도생장상(중)과 병저항성 개체 증식 야외시험장(우)

27) Keane et al, 2011, The future of high-elevation, five-needle white pines in Western North America: Proceedings of the High Five Symposium.

통합적 대응을 위한 ‘한반도 아고산대 기후적응 협의체’ 구축 및 공동연구 · 협력 활성화

- 기후변화 관련 예측 가능한 피해뿐 아니라 예측불가 고사피해에 대응한
긴밀한 협력체계 구축 필요
 - 기후 전문가, 생태학자, 식물생리학자, 원격탐사전문가, 모델러 등을 포함한 아고산
침엽수 고사 관련 네트워크 구축과 공동연구 및 역량강화 필수
 - 적응전략은 여러 분야에 걸쳐 조정과 협력이 필수적이며, 적응전략 수립을 위한 정부,
전문가, 민간단체 등의 강력한 파트너십 중요
 - 공간규모와 지역별로 다양한 이해와 요구, 중앙과 지방 차원의 역할 차이, 다양한
전문분야의 관련성 등으로 지리적 차이에 대한 이해, 다양한 이해관계자들의 참여,
폭넓은 지식 등 필요
 - 적응대책의 실행과 환류, 지속적인 리스크평가 · 관리 및 의사결정 시스템 수립 필요

기관별 아고산 침엽수 관련 주요 연구사업 현황

기관명	사업명	사업개요	연구내용
국립 생태원	취약생태계의 미래 기후영향 및 대응방안 연구	· 대상지 : 한라산, 지리산, 가야산 · 기간 : 2015~2018년 · 예산 : 약 500백만원/연	· 종분포 모형을 통한 미소서식지 변화 예측 및 아고산 침엽수 위협 요인 파악 · 유전자마커 개발을 통한 구상나무 취약성 진단 · 이차대사산물 변화량 분석을 통한 생태기억 스트레스 평가
	기후변화 리스크 평가 를 위한 기초 생태 연구(※)	· 대상지 : 지리산, 한라산, (남산, 소양호, 낙동강, 함평만) · 기간 : 2016~2024년 · 예산 : 약 300백만원/연	· 장기적 식생 동태 변화 모니터링 · 곤충 개체군 동태 및 군집 변화 양상 분석 · 기후변화에 의한 물질순환 변화 연구
국립공원 관리공단 (연구원)	기후변화가 생태계에 미치는 영향 모니터링 체계 구축	· 대상지 : 설악산, 오대산, 소백산, 덕유산, 지리산 · 기간 : 2010~ · 예산 : 약 200백만원/연	· 아고산 침엽수 서식지 미기상 측정 및 토양환경 변화 모니터링 · 아고산 식물 동태 분석 · 아고산 지표곤충 동태 분석 · 연륜분석을 통한 기후변화 영향 파악
국립산림 과학원	기후변화에 따른 산림 생태계 영향 평가 및 적응 연구	· 대상지 : 설악산, 계방산, 덕유산, 지리산 (연차별로 조사지역 확대) · 기간 : 2015~2019년 · 예산 : 약 160백만원/연	· 산림 수종변화 모니터링 및 예측 · 산림 곤충변화 예측 · 주요 수종의 생리·생태적 반응 및 적응력 변화 · 산림생태계 구조와 기능변화 예측 및 적응 전략 개발

※ 국가장기생태연구 1차(2004~2014) 이후의 후속 사업

NIE IR 16-01(통권 1호)

NIE Issue Report

발간일 2016년 9월 30일

발행인 최재천

편 집 융합연구실

발행처 국립생태원 충남 서천군 마서면 금강로 1210

인쇄처 엠씨기획 (전화 02-587-0041)

1. 이 책의 무단 복제 및 전재는 삼가주시기 바랍니다.
2. 이 책은 국립생태원 홈페이지(www.nie.re.kr)를 통하여 보실 수 있습니다.
3. 문의: 국립생태원 융합연구실 연구기획관리팀 (전화 041-950-5980)

