

# 지리산국립공원 아고산대 침엽수 고사개체 공간정보 구축 및 입지환경 분석<sup>1a</sup>

- 반야봉, 영신봉, 천왕봉 일원 구상나무를 중심으로 -

박홍철<sup>2\*</sup> · 문건수<sup>3</sup> · 이호<sup>4</sup> · 이나연<sup>5</sup>

## A Study on the Spatial Information and Location Environment of Dead Coniferous Tree in Subalpine Zone in Jirisan National Park<sup>1a</sup>

-Focus on Korean Fir(*Abies koreana*) in Banyabong, Yeongsinbong, Cheonwangbong-  
Hong Chul Park<sup>2\*</sup>, Geon Soo Moon<sup>3</sup>, Ho Lee<sup>4</sup>, Na Yeon Lee<sup>5</sup>

### 요약

지리산국립공원 내 자생하는 아고산대 침엽수(구상나무 등)의 주요 분포지를 대상으로 약 10년 전·후의 고해상도 항공영상을 활용해 고사목 증가량, 확산패턴 등을 분석하고자 하였다. 나아가 침엽수 고사목이 위치한 지점의 해발고도, 지형정보, 일사량, 수분환경 등을 분석하여 고사에 영향을 미칠 것으로 판단되는 입지요인을 파악하였다. 지리산국립공원 반야봉, 영신봉, 천왕봉 지역 모두 최근 10여 년간 아고산대 침엽수 고사목 개체수가 2~5배 증가한 것으로 나타났다. 반야봉은 약 2배, 영신봉은 약 3.9배, 천왕봉은 약 5.2배 증가한 것으로 나타나 천왕봉 지역의 증가세가 비교적 빠른 것으로 확인되었다. 높은 경사도로 토양수분함량이 낮고, 남향에 위치하여 높은 일사량으로 증발산량이 많은 건조 환경, 이에 더해 태양광에 의한 강한 일사량 및 강우의 체류시간이 짧아 토양이 건조할 것으로 추정되는 입지환경에 고사목이 주로 분포하는 것으로 판단된다. 즉, 건조한 입지환경에서 아고산대 침엽수 고사가 집중되고 있는 것으로 판단되며, 10여 년 전과 비교해도 동일한 경향이 이어지고 있는 것으로 판단된다.

주요어: 기후변화, 항공영상, 지리정보시스템, 입지분석

### ABSTRACT

This study aimed to analyze the rate of increase and spread patterns of dead trees of the conifer (*Abies koreana* and others) in subalpine zones by using the high-resolution aerial images in Jirisan National Park around 10

1 접수 2019년 7월 10일, 수정 (1차: 2020년 1월 14일), 게재확정 2020년 2월 4일

Received 10 July 2019; Revised (1st: 14 January 2020); Accepted 4 February 2020

2 국립공원연구원 계장 Korea National Park Research Institute, Dangu-ro 171, Wonju-si, Gangwon-do, Korea (parkhc@knps.or.kr)

3 삼아항공주식회사 과장 Samah Aerial Survey CO., LTD, Unitrchvill 1024, Ilsan-ro 142, Ilsandong-Gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea(gsmoon@samah.com)

4 국립공원연구원 과장 Korea National Park Research Institute, Dangu-ro 171, Wonju-si, Gangwon-do, Korea(bio2how@knps.or.kr)

※ 현재소속: 오대산국립공원사무소 과장 Odaesan National Park Office, Odaesan-ro 2, Jinbu-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, Korea

5 국립공원연구원 연구위원 Korea National Park Research Institute, Dangu-ro 171, Wonju-si, Gangwon-do, Korea (nayeon3@knps.or.kr)

a 이 논문은 국립공원공단 국립공원연구원의 「국립공원 기후변화 생태계 모니터링」 사업비에 의하여 수행되었음.

\* 교신저자 Corresponding author: parkhc@knps.or.kr

years ago. Furthermore, factors affecting the death of conifer were identified by analyzing the altitude, topographical information, solar radiation, and moisture environment of the site where the dead trees are located. The number of dead trees per unit area increased by two to five times in the Banyabong peak, Yeongsinbong peak, and Cheonwangbong peak in Jirisan National Park over the past decade. The increase was about 2 times in the Banyabong peak, about 3.9 times in the Yeongsinbong peak, and about 5.2 times in the Cheonwangbong peak, indicating the most notable increase in the Cheonwangbong peak. It is estimated that dead trees commonly occurred in the environments where the soil moisture content was low due to the high slope, amount of evaporation was high due to strong solar radiation as the location faced south, and the soil was dry due to strong solar radiation and short rain retention time. In other words, dead conifer trees in subalpine zones were concentrated in dry location environments, and the tendency was the same more than ten years ago.

**KEY WORDS: CLIMATE CHANGE, AERIAL IMAGE, GIS, SPATIAL ANALYSIS**

## 서론

구상나무는 소나무과 전나무속에 속하는 상록고목으로 우리나라 고유종이다. 구상나무는 중생대 백악기 시대에 아시아 지역을 중심으로 출현하였으며(Kong, 2006), 지리산을 비롯한 한라산, 덕유산, 가야산, 속리산, 영축산 등 남부지역 해발고도 900m 이상 산림대에서 자생(Lee and Hong, 1995; National Institute Ecology, 2014)한다. 이중 지리산국립공원은 섬 지역인 한라산을 제외한 내륙지역에서 가장 넓은 면적의 구상나무가 분포하는 국가지정 보호지역이다.

그러나 최근 우리나라에서 자생하고 있는 구상나무 등 아고산대 침엽수군락 전반에서 생장둔화 및 수목고사에 따른 자생지 소멸 혹은 축소가 진행되고 있는 것으로 보고되고 있으며(Kim *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1998; 2007; Kim and Choo, 1999; Koo *et al.*, 2001; Hong, 2004; Lim *et al.*, 2006; Chun *et al.*, 2011; Lee, 2013; Ahn *et al.*, 2019), 기후변화에 따른 수분 공급량 부족, 증발산량 증가, 광합성-호흡량 불균형 등에 따른 생리적 스트레스 가중(Park and Seo, 1999; Kong, 2002; Koo *et al.*, 2001)으로 자생지 소멸 위험성이 점차 높아질 것으로 예상된다. 지리산국립공원 내 구상나무군락을 중심으로 아고산대 침엽수군락도 이와 같은 생장둔화 및 급격한 고사현상을 보이고 있으며(Kim, 2000; Oh *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2018; Noh *et al.*, 2018) 이에 대한 과학적 보전 및 생태적 복원대책이 필요한 실정이다.

지리산국립공원 아고산대 침엽수군락의 보전 및 복원을 위해 고사가 집중되고 있는 지역에 대한 고사목 각 개체별 공간정보가 필요하지만, 이를 충족하기 위한 조사·연구는 부족한 상태이다. 산림의 입지조건과 지형은 해당 지역의 생물다양성과 공간적 분포패턴에 영향을 주며(Moeslund *et al.*, 2013), 입지적 차이에서 발생하는 토양수분, 일사량, 토양온도 등 각종 요

인들의 차이에 의해 개별 식물종의 선호영역이 달라지기 때문이다(Chaneton *et al.*, 1996; D'Amore and Hennon, 2006; Liu *et al.*, 2013; Silvertown *et al.*, 2015; Xiang *et al.*, 2017; Ahn *et al.*, 2019).

직접조사를 통한 고사실태 파악은 사람이 직접 현장에서 관찰·조사 측정하는 방식이므로 대규모 면적 조사에 한계가 있으며, 특히 아고산대처럼 고해발고도 지역은 사람의 접근이 물리적으로 어려운 경우가 많다. 따라서 접근 가능한 지역에 한해 대표성을 나타내는 특정 군락을 선정하여 방형구법에 의한 표준지 조사를 수행하는 것이 일반적인데, 표준지의 규모와 개수가 충분하지 않을 경우 조사결과를 공간적으로 확대하여 일반화하기 어렵다는 한계가 있다. 또한, 과거의 조사데이터를 수집할 수 없고, 시계열 변화에 따른 고사실태를 분석하기 위해서는 미래에 수년간 같은 곳에서 반복조사를 수행해야한다는 어려움이 있다.

최근 이러한 한계를 극복하기 위한 대안이 강구되고 있으며, 항공사진측량 기술의 발전과 항공영상 수급비용의 감소로 고해상도 항공영상을 활용한 원격조사방법이 주목받고 있다. 최근 한라산국립공원을 대상으로 고해상도 항공영상을 활용하여 살아있는 구상나무와 고사한 구상나무를 개체단위로 도면화한 사례(Ahn *et al.*, 2019)가 대표적이다. 또한, 이러한 조사법은 과거 영상만 확보할 수 있다면 비교적 짧은 시간에 규모에 관계없이 시계열 분석이 가능하다는 이점이 있으며, 사람이 접근하기 어려운 지역에 대한 조사 및 분석도 가능하다.

이에 본 연구에서는 지리산국립공원 내 자생하는 아고산대 침엽수(구상나무 등) 주요 분포지를 대상으로, 고해상도 항공영상을 활용해 침엽수 고사개체에 대한 공간정보를 디지털 도면화하고자 하였다. 또한 약 10년 전-후의 영상을 확보하여 고사목 증가량, 확산패턴 등을 분석하고자 하였다. 이를 통해 고사목이 위치한 지점의 해발고도, 지형정보, 일사량, 수분환경

등을 분석하여 구상나무 등 아고산대 침엽수 고사에 영향을 미칠 것으로 판단되는 입지적 요인을 추정하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 대상지 설정

지리산국립공원 아고산대 침엽수 분포면적은 총 41,868,934m<sup>2</sup>로 이중 41,810,000m<sup>2</sup>(99.86%)가 식피율 10% 이상의 임분을 구성하는 구상나무 분포지로 확인된다(Park *et al.*, 2019). 가문비나무와 주목, 잣나무 개체가 일부 포함되어 있을 수 있지만, 지리산국립공원 아고산대 전역에 걸쳐 구상나무가 넓게 분포하고 있다는 점을 뒷받침하고 있다. 구상나무는 동-서로 가로 지르는 능선을 중심으로 거의 모든 능선부에 다양한 밀도로 분포하고 있다(KNPRI, 2017). 특히 반야봉과 영신봉, 천왕봉 일대에서 높은 밀도로 서식하고 있으며(KNPRI, 2017; Park *et al.*, 2019), 고사현상도 두드러지게 나타나고 있다(KNPRI, 2017; 2018; 2019).

이에 해당 3개 지역을 지리산국립공원 구상나무를 중심으로 한 아고산대 침엽수 대표 고사지역으로 선정하였다(Figure 1). 반야봉(Banyabong)은 정상부를 중심으로 등고선을 따라 1km<sup>2</sup>의 면적을 설정하였으며, 영신봉(Yeongsinbong)과 천왕봉(Cheonwangbong)은 국립공원연구원에서 제작한 ‘국립공원 아고산대 상록침엽수림 분포지도’(KNPRI, 2017)를 활용하여 구상나무 생육밀도(식피율 기준)가 50% 이상 분포하는 지역을 대상으로 각각 2.47km<sup>2</sup>의 면적을 설정하였다. 단, 반야봉은 2017년에 분석을 수행하여 2017년 12월에 완료된 ‘국립공원 아고산대 상록침엽수림 분포지도’를 활용하지 못하였으며, 이로 인해 2018년에 분석을 수행한 영신봉과 천왕봉 지역 대상지 설정방법과 면적규모에 다소 차이가 있다. 그러나 대상지 설정 방식만 다를 뿐 영상판독 및 데이터 분석방법은 동일하므로 반야봉을 포함하여 3개 지역에 대해 종합분석 및 비교, 고찰에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

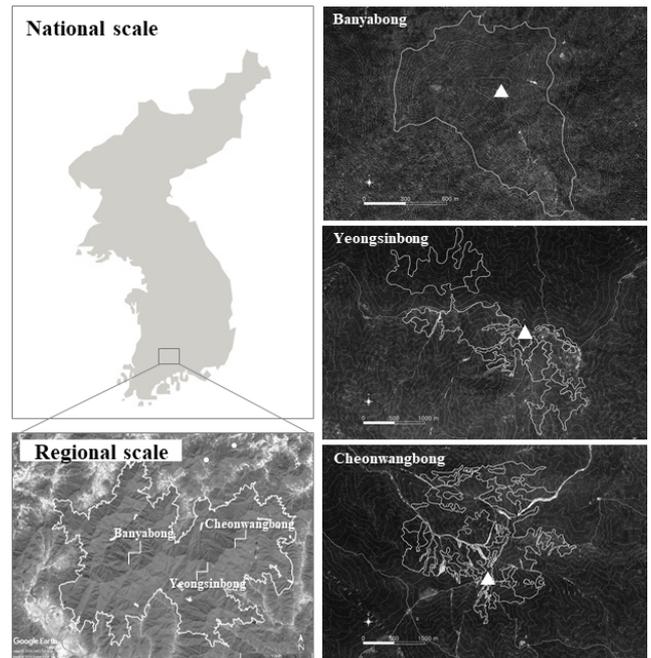


Figure 1. Map of study site

### 2. 시계열 항공영상 확보

본 연구에 사용한 항공영상은 삼아항업(주)에서 2008년 5월, 2012년 11월, 2017년 7월, 2018년 9월에 직접 촬영한 디지털 항공영상이며, 촬영에 사용된 카메라는 ‘Ultracam Eagle Mark2’, ‘Ultracam XP’ 이다(Table 1). 3개 지역 모두 2008년, 2012년 영상을 기준으로 과거 데이터를 수집하였으며, 반야봉은 2017년, 영신봉과 천왕봉은 2018년 항공영상을 최신자료로 사용하였다. 항공영상의 공간해상도는 2008년은 25cm급, 2012·2017·2018년은 10cm급으로, 수목의 색상과 형태를 통해 침·활엽수 구분과 고사유무의 판별이 가능한 수준이다.

Table 1. Status of taking a aerial image and usage each area

Taking photograph		Pixel Resolution	Camera System	Usage status		
Year	Month			Banyabong	Yeongsinbong	Cheonwangbong
2008	May	25cm	Ultracam XP	Using	Using	Using
2012	November	10cm	Ultracam Eagle Mark2	Using	Using	Using
2017	July	10cm		Using	-	-
2018	September	10cm		-	Using	Using

### 3. 항공영상판독 및 코딩

항공영상 판독의 정확도를 제고하기 위해 디지털 방식의 3차원 입체항공영상판독시스템을 사용하였다. 해당 시스템은 중첩 촬영된 항공영상을 이용하여 사진 상의 지상 좌표 값 정보를 읽어 점, 선, 면의 형태인 수치지도로 지형지물을 묘사(도화)하는 시스템으로, 삼아항업(주)에서 개발한 ‘DPSMaster’를 사용하였다. ‘DPSMaster’는 입체(3D)로 구현된 고해상도 항공영상을 바탕으로 수목의 침·활엽수 구분, 고사유무 육안 판별이 가능하며, 불규칙하고 복잡한 지형을 나타내는 산림지역에 대한 신속하고 정확한 판독이 가능하도록 지원해주는 영상판독 프로그램이다(Figure 2).

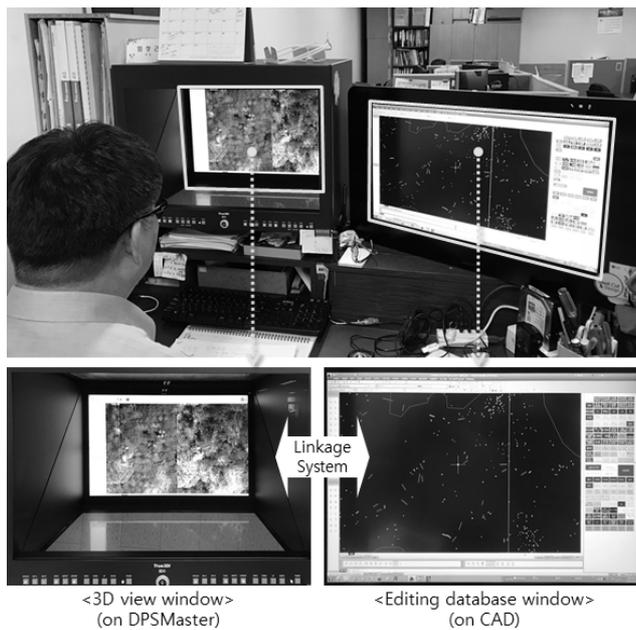


Figure 2. Deciphering aerial image and window screen

단, 최대 10cm급 고해상도 영상의 활용에도 불구하고 침엽수간 수종구분의 불확실성이 높기 때문에, 본 연구에서 판독한 고사목 중 가문비나무 고사개체가 일부 포함되어 있을 수 있는 한계가 있다. 더욱이 고사한 개체에 대한 수종구분은 잎의 탈락으로 거의 불가능에 가깝다. 따라서 본 연구는 구상나무 주요 분포지(식피율 50% 이상)를 대상으로 구상나무 중심의 아고산대 침엽수 고사개체에 대한 영상판독을 수행하였다.

잎이 모두 떨어지고 가지만 남아있는 상태의 침엽수를 고사목으로 정의하였으며, 수종 및 식물생육 정보를 인지하고 있는 숙련자가 육안관찰을 통해 고사목을 판독하였다(Table 2, Figure 3)). 공간범위 내 모든 고사개체를 점(point) 데이터로 코딩작업을 실시하였으며, 지리정보시스템(GIS)과 캐드(CAD)

프로그램에서 수정·편집이 가능한 파일 형태(shp, dwg)로 제작하였다. 또한 선채로 고사한 개체와 쓰러져 고사한 개체를 구분하여 데이터를 구축하였으며, 연도별 데이터 구축을 통해 시계열 분석이 가능하도록 하였다.

Table 2. Examples of aerial image of dead or living type

Examples of aerial image			Type
			Standing dead tree (old)
			Standing dead tree (lately)
			Living tree
			Fallen dead tree



Figure 3. Aerial image example of mass death in Banyabong

### 4. 입지환경 분석

고사목이 위치한 지점의 표고와 사면향, 경사도 분석을 위해 수치표고자료를 활용하였다. 수치표고자료는 1:5,000 수치지

도에서 등고선과 표고 레이어를 추출하고, 불규칙삼각망(TIN; Triangulated Irregular Network)으로 면 데이터를 생성한 후 5m 단위의 격자자료를 제작·활용하였다. 사면향과 경사도 데이터는 수치표고자료를 이용하여 중심 셀을 기준으로 주변 8개의 수치 값으로부터 사면향을 계산하였으며, 경사도는 중심 셀을 기준으로 좌·우 3개 데이터에서 X 방향 변화율과 Y 방향의 변화율을 구하고, 중심 셀에 대한 기울기를 계산하여 분석하였다.

고사목이 위치한 지점의 일사량 분석을 위해 ArcGIS의 Solar Radiation Tool을 이용하였으며, 수치지형도로 제작한 수치표고모델(DEM; Digital Elevation Model)을 기준으로 대상 지역별 여름철 기간의 태양고도각에서 받는 태양에너지를 수치적으로 계산하였다. 일사량은 태양으로부터 오는 복사에너지가 지표에 닿는 양을 의미하며, 단위면적당 1시간 동안 받는 에너지의 양으로 표현하였다.

지형습윤지수(TWI; Topographic Wetness Index)는 강우로 인해 빗물이 지표에 떨어졌을 때 사면경사와 경사방향을 고려하여 강우가 어떤 방향으로 흘러가는지, 그리고 흘러갔을 때의 양을 수치적으로 표현한 데이터이다. 고사목이 위치한 지점의 지형습윤지수를 분석하기 위해 ArcGIS Hydrology Tool을 이용하였으며, 1:5,000 수치지형도 기반 수치표고자료를 활용하였다. 지형습윤지수가 '0'에 가까울수록 강우 시 집수되는 물의 양은 적음을 의미하며, 반대로 값이 커질수록 강우 시 집수되는 물의 양이 많음을 의미한다. 이를 바탕으로 지형습윤지수의 값이 작을수록 건조한 토양환경임을 추정할 수 있으며, 값이 클수록 습윤한 토양환경임을 추정할 수 있다.

## 5. 통계분석

각 지역별 고사목 입지환경의 과거(약 10년 전)와 최근 사이 유의적 차이(변화)가 발생하였는지 확인하고자 하였다. 이를 위해 SPSS statistics 22 프로그램을 사용하였으며, 일원배치 분산분석(One way ANOVA)을 이용하여 Scheffe와 Games

Howell 방법으로 사후 분석을 실시하였다. 등분산이 가정될 경우( $p < 0.05$ ) Scheffe 값을 분석하였으며, 그렇지 않을 경우 Games Howell 방법을 따랐다. 모든 고사목 데이터에 대해 고사지역과 기준연도를 부여하였으며, 각 고사목이 위치한 지점의 입지정보(해발고도, 사면향, 경사도, 일사량, 지형습윤지수)를 종속변수로 하여 분석을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 시기별 고사목 개체수 현황

#### 1) 지리산국립공원 반야봉 일원

지리산국립공원 반야봉 일원의 과거부터 2008년까지 누적된 고사목은 3,351본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 2,350본, 쓰러져 고사한 나무는 1,001본으로 나타났다. 2009년부터 2012년까지 고사한 나무는 1,042본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 621본, 쓰러져 고사한 나무는 421본으로 나타났다. 2013년부터 2017년까지 고사한 나무는 2,330본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 1,287본, 쓰러져 고사한 나무는 1,043본으로 나타났다. 과거부터 2017년까지 고사목 누적 개체수는 6,723본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 4,258본, 쓰러져 고사한 나무는 2,465본으로 나타났다.

#### 2) 지리산국립공원 영신봉 일원

지리산국립공원 영신봉 일원의 과거부터 2008년까지 누적된 고사목은 1,770본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 1,007본, 쓰러져 고사한 나무는 763본으로 나타났다. 2009년부터 2012년까지 고사한 나무는 809본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 239본, 쓰러져 고사한 나무는 570본으로 나타났다. 2013년부터 2018년까지 고사한 나무는 4,333본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는

Table 3. Status of dead tree of Banyabong peak in Jirisan National Park

unit: number of dead tree in 1km <sup>2</sup>			
Division	Prior to 2008	2009 to 2012	2013 to 2017
Standing dead tree	2,350	621	1,287
Fallen dead tree	1,001	421	1,043
Total	3,351	1,042	2,330
Division	2008(Accumulated)	2012(Accumulated)	2017(Accumulated)
Standing dead tree	2,350	2,971	4,258
Fallen dead tree	1,001	1,422	2,465
Total	3,351	4,393	6,723

3,967본, 쓰러져 고사한 나무는 366본으로 나타났다. 과거부터 2018년까지의 고사목 누적 개체수는 6,912본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 5,213본, 쓰러져 고사한 나무는 1,699본으로 나타났다.

### 3) 지리산국립공원 천왕봉 일원

지리산국립공원 천왕봉 일원의 과거부터 2008년까지 누적된 고사목은 2,652본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 1,485본, 쓰러져 고사한 나무는 1,167본으로 나타났다. 2009년부터 2012년까지 고사한 나무는 1,074본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 92본, 쓰러져 고사한 나무는 982본으로 나타났다. 2013년부터 2018년까지 고사한 나무는 10,060본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 9,504본, 쓰러져 고사한 나무는 556본으로 나타났다. 과거부터 2018년까지의 고사목 누적 개체수는 13,786본으로 확인되었으며, 이중 선 채로 고사한 나무는 11,081본, 쓰러져 고사한 나무는 2,705본으로 나타났다.

### 4) 종합

지리산국립공원 반야봉, 영신봉, 천왕봉 지역 모두 최근 10여 년간 고사목 개체수가 2~5배 이상 증가한 것으로 나타났다.

반야봉은 약 2배, 영신봉은 약 3.9배, 천왕봉은 약 5.2배 증가한 것으로 나타나 천왕봉 지역의 증가세가 비교적 빠른 것으로 확인되었다. 또한 과거부터 최근연도까지 누적된 고사목 개체수로 봐도 천왕봉이 반야봉과 영신봉에 비해 약 2개 많은 것으로 나타나, 천왕봉 지역에 대한 모니터링 강화와 적합한 대응방안이 필요할 것으로 판단된다.

또한 선 채로 고사한 나무와 쓰러져 고사한 나무의 개체수 차이가 지역별로 다소 상이하게 나타났다. 반야봉은 1.7:1, 영신봉은 3.1:1, 천왕봉은 약 4.1:1로 확인되어, 반야봉 지역이 다른 지역에 비해 전체 고사목 중 쓰러져 고사한 나무의 비율이 높은 것으로 나타났다. 반야봉 지역이 강풍, 태풍 등 강한 물리적 힘에 의해 쓰러져 고사한 사례가 많았던 것으로 판단된다.

다만, 동일한 영향(온난화, 가뭄, 강풍 등) 하에서 분포밀도가 낮은 지역보다 높은 지역의 고사현상이 심할 수 있으며, 고사개체 증가량 역시 저밀도 분포지에 비해 많을 수 있으므로 상기 결과 해석이 주의가 필요하다. 국립공원연구원의 조사결과(KNPRI, 2019)에 따르면, 반야봉 지역의 평균적인 침엽수 분포밀도는 510본/ha(고사목 포함, 흉고직경 5cm 이상 중·상층 수목)으로 확인되며, ‘국립공원 아고산대 상록침엽수림 분포지도’(KNPRI, 2017)에서도 반야봉 일원의 구상나무 분포 밀도가 대부분 식피율 50% 이상으로 나타나 높은 밀도의 분포

Table 4. Status of dead tree of Yeongsinbong peak in Jirisan National Park

unit: number of dead tree in 2.47km <sup>2</sup>				
Division	Prior to 2008	2009 to 2012	2013 to 2018	
Standing dead tree		1,007	239	3,967
Fallen dead tree		763	570	366
Total		1,770	809	4,333
Division	2008(Accumulated)	2012(Accumulated)	2018(Accumulated)	
Standing dead tree		1,007	1,246	5,213
Fallen dead tree		763	1,333	1,699
Total		1,770	2,579	6,912

Table 5. Status of dead tree of Cheonwangbong peak in Jirisan National Park

unit: number of dead tree in 2.47km <sup>2</sup>				
Division	Prior to 2008	2009 to 2012	2013 to 2018	
Standing dead tree		1,485	92	9,504
Fallen dead tree		1,167	982	556
Total		2,652	1,074	10,060
Division	2008(Accumulated)	2012(Accumulated)	2018(Accumulated)	
Standing dead tree		1,485	1,577	11,081
Fallen dead tree		1,167	2,149	2,705
Total		2,652	3,726	13,786

지역으로 판단된다. 영신봉과 천왕봉 역시 같은 자료에 따르면, 각각 2,488본/ha, 519본/ha의 분포밀도를 보이며, 분포지도에서도 대부분 식피율 50% 이상의 높은 밀도를 나타내고 있다. 따라서 본 연구의 대상지인 반야봉, 영신봉, 천왕봉은 아고산대 상록침엽수의 식피율과 분포밀도가 상대적으로 높은(50% 이상) 지역에 해당하며, 이러한 입지적 여건으로 인해 동일한 영향을 받더라도 타 지역(저밀도 분포지역)에 비해 고사개체 증가폭이 상대적으로 높게 나타날 수 있음을 유념해야 한다.

## 2. 고사목 입지환경 분석

### 1) 해발고도

반야봉 일원 고사목이 위치한 지점의 해발고도는 평균 1611.07m(표준편차 53.019)로 나타났다. 해발고도 1550m 이상 1650m 미만에서 주로 분포하였으며(60.69%), 특히 해발고도 1550m 이상 1600m 미만에서 가장 높은 비율(32.01%)을 나타냈다. 10여 년 전인 2008년과 비교하면 1550m 이상 1600m 미만에서 소폭(1.76%p) 증가하였을 뿐 큰 폭의 변화는 없는 것으로 나타났다. 영신봉 일원 고사목이 위치한 지점의 해발고도는 평균 1476.90m(표준편차 88.362)로 나타났다. 해발고도 1400m 이상 1600m 미만에서 주로 분포하였으며(77.88%), 특히 1500m 이상 1550m 미만에서 가장 높은 비율(33.53%)을 나타냈다. 10년 전인 2008년과 비교하면 1600m 이상 1650m 미만에 위치한 고사목의 비율이 3.05%p 증가한 것이 확인되었다. 그러나 전체적인 해발고도별 분포비율은 큰 변화가 없었다. 천왕봉 일원 고사목이 위치한 지점의 해발고도는 평균 1656.48m(표준편차 101.257)로 나타났다. 해발고도 1550m 이상 1800m 미만에서 주로 분포하였으며(79.46%), 특히 1650m 이상 1,700m 미만에서 가장 높은 비율(21.22%)을 나타냈다. 10년 전인 2008년과 비교하면 1550m 이상 1600m 미만에 위치한 고사목의 비율이 1.59%p, 1600m 이상 1650m 미만에서 2.54%p 증가한 것이 확인되었다. 그러나 전체적인 해발고도별 분포비율은 큰 폭의 변화가 없었다. 3지역 모두 유사한 해발고도 범위에서 고사목이 집중분포하고 있었지

만, 천왕봉의 경우 타 지역에 비해 비교적 높은 해발고도 구간에서 고사목 분포비율이 높게 나타나고 있었다.

지리산국립공원사무소에서 2014년 발간한 「지리산국립공원 아고산대 식생(구상나무, 가문비나무) 분포조사 및 모니터링 보고서」에 따르면, 반야봉 일원의 구상나무는 1,249m에서 분포하한선을 이루고, 1,377m부터 군락단위로 분포한다. 영신봉 일원은 804m에서 분포하한선, 1176m부터 군락단위, 천왕봉 일원은 803m에서 분포하한선, 1329m부터 군락단위로 분포한다. 이를 감안하면 3지역 모두 구상나무가 군락단위로 분포하는 해발고도 이상에서 고사목이 다수 분포하고 있으며, 지난 10여 년 동안에도 동일한 경향으로 이어져온 것으로 분석된다.

### 2) 사면향

반야봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 평균 사면향은 남향(184.18도, 표준편차 83.636도)으로 나타났다. 특히, 남서향 사면에 주로 분포하였으며(23.49%), 전반적으로 모든 사면향에 고른 분포를 나타냈다. 10여 년 전인 2008년과 비교하면 동남동 방향의 사면에서 소폭(1.34%p) 증가하였다. 영신봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 평균 사면향은 남향(198.18도, 표준편차 70.898도)으로 나타났다. 특히, 남남동향-남향-서향으로 이어지는 구간에 집중 분포하였으며(72.50%), 해당 구간의 각 사면향별 분포비율은 모두 10% 이상으로 대동소이하게 나타났다. 10년 전인 2008년과 비교하면 남남동향-남향-남서향 구간의 분포비율이 소폭 감소하였으며, 다른 사면향의 분포비율은 소폭 증가하는 경향을 나타냈다. 천왕봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 평균 사면향은 남향(180.23도, 표준편차 90.730)으로 나타났다. 특히, 남남동향(13.93%)에 주로 분포하였으며, 전반적으로 모든 사면향으로 고른 분포를 나타냈다. 10년 전인 2008년과 비교하면 동남동(2.08%p), 남남동향(2.69%p)의 분포비율이 증가한 것으로 나타났다. 3지역 모두 남향을 중심으로 고사목이 집중분포하고 있었으며, 반야봉의 경우 남향에서도 서쪽에 다소 치우쳐 고사목이 분포하고 있는 것으로 나타났다.

Table 6. Descriptive statistics of elevation each area

Unit: meter

Area	Year	Mean	Standard deviation	Standard error
Banyabong	2008	1610.49	53.945	0.841
	2017	1611.07	53.019	0.648
Yeongsinbong	2008	1467.23	80.977	1.925
	2018	1476.90	88.362	1.063
Cheonwangbong	2008	1656.96	113.143	2.199
	2018	1656.48	101.257	0.862

Table 7. Descriptive statistics of aspect each area

Unit: degree				
Area	Year	Mean	Standard deviation	Standard error
Banyabong	2008	NE180.38	NE83.827	NE1.307
	2017	NE184.18	NE83.636	NE1.022
Yeongsinbong	2008	NE196.79	NE61.699	NE1.467
	2018	NE198.18	NE70.898	NE0.853
Cheonwangbong	2008	NE194.50	NE93.719	NE1.821
	2018	NE180.23	NE90.730	NE0.773

### 3) 경사도

반야봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 경사도는 평균 28.05도(표준편차 7.051)로 나타났다. 25도 이상 35도 미만 구간에 주로 분포하였으며(58.21%), 특히 25도 이상 30도 미만에서 가장 높은 비율(33.49%)을 나타냈다. 10년 전인 2008년과 비교하여 큰 폭의 변화는 없었다. 영신봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 경사도는 평균 27.93도(표준편차 10.489)로 나타났다. 25도 이상 35도 미만 구간에 주로 분포하였으며(42.28%), 특히 30도 이상 35도 미만에서 가장 높은 비율(21.49%)을 나타냈다. 10년 전인 2008년과 비교하면 10도 이상 20도 미만 구간의 분포비율이 비교적 큰 폭으로 증가한 것으로 확인되어, 경사도가 상대적으로 낮은 지역에서의 고사목 증가세가 나타났다. 천왕봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 경사도는 평균 34.63도(표준편차 7.309)로 나타났다. 25도 이상 45도 미만 구간에 주로 분포하였으며(85.0%), 특히 30도 이상 35도 미만 구간(28.16%)과 35도 이상 40도 미만 구간(27.76%)의 비율이 높게 나타났다. 10년 전인 2008년과 비교하면 20도 이상 25도 미만 구간의 분포비율이 비교적 큰 폭 증가한 것으로 확인(1.58%p)되었다. 3지역 모두 25도 이상 35도 미만을 중심으로 고사목이 집중분포하고 있었으며, 천왕봉의 경우 비교적 높은 경사도에서도 고사목이 다수 분포하고 있는 것으로 나타났다.

### 4) 일사량

반야봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 일사량은 평균  $6215.66wh/m^2$ (표준편차 348.087)로 나타났다.  $6,200wh/m^2$  이상  $6,600wh/m^2$  미만 구간에 주로 분포하였으며(49.0%), 특히  $6,200wh/m^2$  이상  $6,400wh/m^2$  미만 구간(28.63%)에서 가장 높게 나타났다. 10년 전인 2008년과 비교하면  $6,000wh/m^2$  이상  $6,200wh/m^2$  미만 구간의 비율이 소폭으로 증가(1.11%p)한 것으로 확인되었다. 영신봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 일사량은 평균  $6090.74wh/m^2$ (표준편차 508.898)로 나타났다.  $5,800wh/m^2$  이상  $6,800wh/m^2$  미만 구간에 주로 분포하였으며(73.27%), 특히  $6,000wh/m^2$  이상  $6,200wh/m^2$  미만 구간(18.14%)과  $6,600wh/m^2$  이상  $6,800wh/m^2$  미만 구간(18.01%)에서 특히 높게 나타났다. 10년 전인 2008년과 비교하면  $6,600wh/m^2$  이상  $6,800wh/m^2$  미만 구간의 비율이 가장 큰 폭으로 증가(5.52%p)한 것으로 확인되어, 비교적 일사량이 많은 곳에서의 고사목 증가세가 나타났다. 천왕봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 일사량은 평균  $5829.66wh/m^2$ (표준편차 451.184)로 나타났다.  $5,800wh/m^2$  이상  $6,200wh/m^2$  미만 구간에 주로 분포하였으며(39.21%), 특히  $5,800wh/m^2$  이상  $6,000wh/m^2$  미만 구간(20.64%)에서 특히 높게 나타났다. 10년 전인 2008년과 비교하면  $6,200$

Table 8. Descriptive statistics of slope each area

Unit: degree				
Area	Year	Mean	Standard deviation	Standard error
Banyabong	2008	28.35	6.83	0.106
	2017	28.05	7.051	0.086
Yeongsinbong	2008	30.22	9.95	0.237
	2018	27.93	10.489	0.126
Cheonwangbong	2008	35.11	7.183	0.14
	2018	34.63	7.309	0.062

$wh/m^2$  이상  $6,400wh/m^2$  미만 구간(1.51%p)과  $6,400wh/m^2$  이상  $6,600wh/m^2$  미만 구간(1.41%p)의 비율이 소폭으로 증가한 것으로 확인되어, 비교적 일사량이 많은 곳에서의 고사목 증가세가 나타났다. 3지역 모두 일사량  $6,000wh/m^2$  내외의 구간에서 고사목이 집중분포하고 있었으며, 반야봉의 경우 비교적 높은 일사량 구간에서 고사목이 다수 분포하고 있는 것으로 나타났다. 지난 10여 년간 일사량별 고사목의 분포패턴에는 큰 변화는 없었지만, 전반적으로  $6,000wh/m^2$  이상의 높은 일사량 조건에서 소폭 증가하는 경향을 보였다.

### 5) 지형습윤지수

반야봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 지형습윤지수는 평균 21.45(표준편차 50.965)로 나타났다. 0 이상 10 미만 구간에 주로 분포하였으며(69.95%), 특히 0 이상 5 미만의 비율이 47.61%로 높게 나타났다. 10년 전인 2008년 대비 구간별 비율은 큰 폭의 변화가 없었다. 영신봉 일원 고사목이 위치하는 지점의 지형습윤지수는 평균 77.51(표준편차 723.893)로 나타났다. 그러나 구간별 분포비율을 보면 0 이상 10 미만에 주로 분포하는 것을 볼 수 있으며(78.55%), 특히 0 이상 5 미만 구간의 비율이 62.35%로 높게 나타났다. 10년 전인 2008년 대비 구간별 비율은 큰 폭의 변화가 없었다. 천왕봉

일원 고사목이 위치하는 지점의 지형습윤지수는 평균 42.52(표준편차 393.23)로 나타났다. 0 이상 10 미만 구간에 주로 분포하였으며(67.40%), 특히 0 이상 5 미만 구간의 비율이 48.99%로 높게 나타났다. 10년 전인 2008년 대비 구간별 비율은 큰 폭의 변화가 없었다. 3지역 모두 지형습윤지수 10 미만의 구간에서 고사목이 집중분포하고 있었으며, 특히 5 미만의 구간에서 두드러지게 나타났다. 지형습윤지수가 낮은 곳 즉, 건조 토양에서의 고사목이 집중되고 있는 것으로 판단된다. 반면 표준편차가 상대적으로 높게 나타나 평균 값 해석 시 주의가 필요하다.

### 3. 통계분석 결과

모든 항목의 분산 동질성 검정 결과 분산은 동일하지 않은 것으로 나타나( $P=0.000$ ), Games-Howell 방법에 의한 유의성 검정결과를 확인하였다. 영신봉 지역은 해발고도( $p=0.000$ ), 경사도( $p=0.000$ ), 일사량( $p=0.000$ ) 항목에서 2008년과 2018년의 고사목이 위치한 입지환경의 유의적 차이(95% 신뢰수준,  $p<0.05$ )를 확인 할 수 있었다. 10년 전에 비해 더욱 높은 해발고도와 가파른 경사, 그리고 일사량이 많은 지역에서 고사목이 증가하였음을 재차 확인할 수 있는 결과이다. 천왕봉 지역은 사면향( $p=0.000$ ), 경사도( $p=0.019$ ) 항목에서 2008년과 2018년의 입지환경의 유의적 차이(95% 신뢰수준,  $p<0.05$ )가 있는

Table 9. Descriptive statistics of solar radiation each area

Unit: $wh/m^2$				
Area	Year	Mean	Standard deviation	Standard error
Banyabong	2008	6203.38	349.462	5.448
	2017	6215.66	348.087	4.255
Yeongsinbong	2008	6007.16	486.863	11.572
	2018	6090.74	508.898	6.121
Cheonwangbong	2008	5812.46	432.844	8.472
	2018	5829.66	451.184	3.843

Table 10. Descriptive statistics of TWI each area

Unit: Unitless				
Area	Year	Mean	Standard deviation	Standard error
Banyabong	2008	22.11	53.154	0.829
	2017	21.45	50.965	0.623
Yeongsinbong	2008	111.36	1057.068	25.992
	2018	77.51	723.893	9.086
Cheonwangbong	2008	50.63	323.31	6.609
	2018	42.52	393.23	3.542

것으로 나타났다. 10년 전에 비해 더욱 가파른 경사와 남향에서 고사목이 증가하였음을 재차 확인할 수 있는 결과이다. 반면 반야봉 지역의 고사목은 모든 항목의 입지환경에서 유의적 차이가 없어, 지난 10년 간 유사한 환경에서 고사현상이 반복된 것으로 나타났다.

#### 4. 종합

구상나무 등 아고산대 침엽수가 주로 고사하고 있는 것으로 알려진 지리산국립공원 반야봉, 영신봉, 천왕봉은 해발고도 1,500~1,600m 내외에서 고사목이 주로 분포하고 있으며, 천왕봉은 상대적으로 높은 해발고도에서 고사목 분포비율이 높게 나타났다. 영신봉은 약 10여 년 전에 비해 고사목이 위치한 지점의 해발고도 분포가 변화한 것으로 나타났으며, 통계적으로도 유의한 것으로 확인되었다. 사면향은 남향에 주로 고사목이 분포하는 것으로 나타났지만, 점유비율이 비교적 고르게 나타나 다양한 사면향에 고사목이 분포하고 있는 것으로 판단된다. 천왕봉은 약 10여 년 전에 비해 고사목이 위치한 지점의 사면향 분포가 변화한 것으로 나타났으며, 통계적으로도 유의한 것으로 확인되었다. 경사도는 25~35도 구간에 주로 분포하였으며, 비교적 경사가 심한 지역에서 고사목이 집중적으로 증

가한 것으로 판단된다. 영신봉과 천왕봉의 경우 약 10여 년 전에 비해 고사목이 위치한 지점의 경사 분포가 변화한 것으로 나타났으며, 두 지역 모두 통계적으로 유의한 변화가 있는 것으로 확인되었다. 일사량은 5,800~6,200wh/m<sup>2</sup> 구간에 주로 분포하였으며 과거 대비 6,000wh/m<sup>2</sup> 이상의 높은 일사량 환경에서 고사목이 소폭 증가한 것으로 확인되었다. 신재생에너지 데이터센터 누리집(<https://kredc.kier.re.kr>)에 공개된 자료(2011년 기준)에 따르면, 인접도시인 진주의 연 평균 일사량은 4,140wh/m<sup>2</sup>(청명일 기준 최대 7,880wh/m<sup>2</sup>)으로 나타나, 앞서 언급한 고사목 분포지역의 일사량은 높은 편으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 분석한 일사량은 GIS 분석을 통한 추정치로 실측치인 진주의 일사량 대비 불확실성이 있으며, 고지대 특성상 연무, 구름 등에 의한 영향으로 분석된 일사량보다 실제 도달하는 태양광은 적을 수 있으므로 기초자료로서 활용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 영신봉은 약 10여 년 전에 비해 고사목이 위치한 지점의 일사량 분포가 변화한 것으로 나타났으며, 통계적으로도 유의한 것으로 확인되었다. 지형습윤지수는 건조한 환경을 의미하는 0~10 구간에서 고사목 분포가 집중되는 것을 확인 할 수 있었으며, 세 지역 모두 과거 대비 고사목이 위치한 지점의 지형습윤지수의 변화는 확인 할 수 없었다.

Table 11. Results of one way ANOVA analysis each location environment factor

Division	Past	Recent	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Elevation	Banyabong in 2008	Banyabong in 2017	0.586	1.062	0.994	-2.44	3.61
	Yeongsinbong in 2008	Yeongsinbong in 2018	<b>9.665*</b>	<b>2.199</b>	<b>0.000</b>	<b>3.39</b>	<b>15.93</b>
	Cheonwangbong in 2008	Cheonwangbong in 2018	-0.487	2.362	1.000	-7.22	6.25
Aspect	Banyabong in 2008	Banyabong in 2017	3.807	1.659	0.196	-0.92	8.54
	Yeongsinbong in 2008	Yeongsinbong in 2018	1.390	1.696	0.964	-3.45	6.23
	Cheonwangbong in 2008	Cheonwangbong in 2018	<b>-14.269*</b>	<b>1.978</b>	<b>0.000</b>	<b>-19.91</b>	<b>-8.63</b>
Slope	Banyabong in 2008	Banyabong in 2017	-0.304	0.137	0.230	-0.69	0.09
	Yeongsinbong in 2008	Yeongsinbong in 2018	<b>-2.286*</b>	<b>0.268</b>	<b>0.000</b>	<b>-3.05</b>	<b>-1.52</b>
	Cheonwangbong in 2008	Cheonwangbong in 2018	<b>-0.484*</b>	<b>0.153</b>	<b>0.019</b>	<b>-0.92</b>	<b>-0.05</b>
Solar Radiation	Banyabong in 2008	Banyabong in 2017	12.283	6.913	0.481	-7.42	31.99
	Yeongsinbong in 2008	Yeongsinbong in 2018	<b>83.582*</b>	<b>13.091</b>	<b>0.000</b>	<b>46.25</b>	<b>120.91</b>
	Cheonwangbong in 2008	Cheonwangbong in 2018	17.205	9.303	0.434	-9.32	43.73
Topographic Wetness Index	Banyabong in 2008	Banyabong in 2017	-0.661	1.037	0.988	-3.62	2.29
	Yeongsinbong in 2008	Yeongsinbong in 2018	-33.855	27.534	0.822	-112.39	44.68
	Cheonwangbong in 2008	Cheonwangbong in 2018	-8.109	7.499	0.889	-29.49	13.27

\* $p < 0.05$

이와 같은 결과는 높은 경사도로 토양수분함량이 낮고 (Western *et al.*, 1999; Wilson and Gallant, 2000; Lee *et al.*, 2006), 남향에 위치하여 높은 일사량으로 증발산량이 많은 건조 환경(Isard, 1986; (Bennie *et al.*, 2008; Burnett *et al.*, 2008), 이에 더해 태양광에 의한 강한 일사량 및 강우의 체류시간이 짧아 토양이 건조할 것으로 추정되는 입지환경에 고사목이 주로 분포하는 것으로 판단된다. 즉, 건조한 입지환경에서 구상나무 등 아고산대 침엽수 고사가 집중되고 있는 것으로 판단되며, 10여 년 전과 비교해도 동일한 경향이 이어지고 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 토양건조화가 아고산대 구상나무에 미치는 생리적 불균형 현상(Park and Seo, 1999; Koo *et al.*, 2001; Kong, 2002; Lim *et al.*, 2006)을 뒷받침할 수 있는 보조적 자료가 될 수 있으며, 전 세계 각국에서 보고되고 있는 기후변화에 따른 수분스트레스로 다양한 식물군락이 쇠퇴 및 고사하고 있다는 연구결과(Allen and Breshears, 2007; Fensham *et al.*, 2009; Allen *et al.*, 2010; Frelich and Reich, 2010; Anderegg *et al.*, 2016)와 조화된다.

다만, 최근 토양수분함량 과다현상이 한라산 구상나무 고사에 영향을 미친다는 국내 연구결과(Ahn *et al.*, 2019)가 발표된 바 있다. 이는 앞서 기술한 본 연구의 결과와 대치될 뿐만 아니라, 한라산 구상나무 고사원인을 가뭄, 이상기후에 의한 수분부족을 추정한 기존연구(Kang, 1984; Kim, 1994; Koo *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017)와도 상반된다. 따라서 향후 두 진영 간 방법론과 분석과정에 대해 어떠한 차이가 있는지 검토할 필요가 있으며, 어떤 요인으로 상반된 결과가 도출되었는지에 대한 이론적 검토가 이뤄져야 할 것이다.

구상나무에서 시작된 아고산대 상록침엽수 고사에 대한 국민적 관심이 최근 들어 분비나무, 가문비나무, 주목 등으로 이어지고 있다. 이에 발맞춰 학계 및 연구기관에서는 이들 식물에 대한 서식 및 생육실태, 고사원인 파악, 생태모델링 등 다각적 학술조사 및 연구를 수행하고 있다. 미래에도 우리나라 아고산대 상록침엽수에 대한 생태계 차원의 접근과 보전·복원을 위한 국민적 관심 및 학술수요는 지속될 것으로 보이며, 본 연구와 같은 접근과 시도가 다양한 분야에 적용되어, 해당 분야 발전을 위한 디딤돌이 될 수 있을 것으로 기대한다. 특히, 본 연구의 방법론은 현장에서 직접 조사하는 방법에 비해 시간단축 및 비용절감, 안전사고방지 등 조사업무에 효율성을 높여주는 효과를 가져왔으며, 사람이 접근하기 어려운 바위지대, 급경사지에 대한 지역의 고사목 공간정보까지 수집하는 등 괄목할 만한 성과를 얻어낼 수 있었다. 최근 제 4차 산업혁명에 발맞춰 항공촬영 및 영상도화 기술의 발전에 따라 고해상도 항공영상이 대중화되고 있으며, GIS 기반의 공간정보의 활용도가 높아지고 있어 위에서 언급한 방식의 공간정보구축 사업은 지속적으로 추진 및 발전될 것으로 판단된다.

다만, 고해상도 항공영상의 구매비용 및 사용료가 상대적으로

로 높아 대중화의 문턱을 넘지 못하고 있으며, 항공영상을 육안 판독하는 과정에서 연구자의 육체피로도 가중 등 몇 가지 어려움이 발생하고 있는 실정이다. 특수 안경을 착용하고 항공영상을 입체화하여 판독하는 방식을 사용하고 있기 때문에, 장시간 판독수행 시 안구피로 등 육체적 피로도가 높아지게 되고, 영상 판독자의 피로도 증가로 판독정확도의 감소 및 판독시간의 증가로 인해 데이터 품질에 영향을 미칠 수 있을 가능성이 있다. 이를 개선하기 위한 효과적 방안으로 딥러닝(Deep Learning) 등 인공지능 컴퓨터 기술을 활용한 영상판독 방법론의 개발·적용을 통해 데이터 수집 효율성 및 객관성을 제고할 필요가 있다. 사람이 직접 수행하던 일을 인공지능을 통해 고사목을 자동으로 식별·판독할 수 있는 기술개발이 필요하다. ICT 분야에서 인공지능기술을 접목한 다양한 영상판독 기술이 개발되고 있으며, 현재까지의 기술력과 노하우를 활용한다면 개발 가능한 기술로 판단된다. 나아가 침엽수 고사목뿐만 아니라 생육목에 대한 공간정보까지 대상을 확대할 수 있어야 하며, 아고산대가 주로 분포하고 있는 백두대간 전체를 대상으로 대면적에 대한 공간정보 수집 체계로 발전시켜야 할 것이다.

## REFERENCES

- Ahn, U.S., D.S. Kim, Y.S. Yun, S.H. Ko, K.S. Kim and I.S. Cho(2019) The inference about the cause of death of Korean Fir in Mt. Halla through the analysis of spatial dying pattern - Proposing the possibility of excess soil moisture by climate changes -. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 21(1): 1-28. (in Korean with English abstract)
- Allen, C.D. and D.D. Breshears(2007) Climate-induced forest dieback as an emergent global phenomenon. Eos, Transactions American Geophysical Union 88(47): 504-504.
- Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D.D. Breshears, E.H. Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J.H. Lim, G. Allard, S.W. Running, A. Semerci and N. Cobb(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.
- Anderegg, W.R., T. Klein, M. Bartlett, L. Sack, A.F. Pellegrini, B. Choat and S. Jansen(2016) Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. Proceedings of the National Academy of Sciences 113(18): 5024-5029.
- Bennie, J., B. Huntley, A. Wiltshire, M.O. Hill and R. Baxter(2008) Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland.

- Ecological Modelling 216(1): 4759.
- Burnett, B.N., G.A. Meyer and L.D. McFadden(2008) Aspect related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F3).
- Chaneton, E.J. and R.S. Lavado(1996) Soil nutrients and salinity after long-term grazing exclusion in a flooding Pampa grassland. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives* 49(2): 182-187.
- Chun, Y.M., J.K. Ahn, M.P. Hong, J.T. Shin, H.J. Won and S.H. Lee(2011) Structure and dynamics of *Abies nephrolepis* community in Odaesan National Park. *Geogr. J. Kor.* 45(4): 559-570. (in Korean with English abstract)
- D'Amore, D. and P.E. Hennon(2006) Evaluation of soil saturation, soil chemistry, and early spring soil and air temperatures as risk factors in yellow-cedar decline. *Global Change Biology* 12(3): 524-545.
- Fensham, R.J., R.J. Fairfax and D.P. Ward(2009) Drought induced tree death in savanna. *Global Change Biology* 15(2): 380-387.
- Frelich, L.E. and P.B. Reich(2010) Will environmental changes reinforce the impact of global warming on the prairie forest border of central North America? *Frontiers in Ecology and the Environment* 8(7): 371-378.
- Hong, M.P.(2004) Ecological studies on the forest Vegetation of Mt. Seorak. Ph. D. Thesis, Konkuk University, Seoul, 263pp. (in Korean with English abstract)
- Isard, S.A.(1986) Factors influencing soil moisture and plant community distribution on Niwot Ridge, Front Range, Colorado, USA. *Arctic and Alpine Research* 18(1): 83-96.
- Kang, S.J.(1984) Regeneration Process of Subalpine Coniferous Forest in Mt. Jiri. *Journal of Ecology and Environment* 7(4): 185-193. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.S.(1994) Decline of tree growth and the changes of environmental factors on high altitude mountains. The Korea Science and Engineering Foundation Research Report KOSEF921-1500-081-2, 89pp. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.T. and G.C. Choo(1999) Studies on the structure of forest community in subalpine zone of Togyusan: *Abies koreana* forest. *Kor. J. Env. Eco.* 13(1): 70-77. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.T.(2000) Studies on the structure of *Abies koreana* forest community at subalpine zone area. *Korean J. Environ. Ecol.* 14(1): 28-37.
- Kim, G.T., G.C. Choo and G.J. Baek(1998) Studies on the structure of forest community in subalpine zone of Mt. Halla: *Abies koreana* forest. *Kor. For. Soc.* 87(3): 366-371. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.T., G.C. Choo and T.W. Um(1996) Studies on the structure of forest community at Turobong-Sangwangbong area: *Abies nephrolepis* and *Taxus cuspidata* forest. *Kor. J. Env. Eco.* 10(1): 160-168. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.D., G.E. Park, J.H. Lim and C.W. Yun(2018) The change of seedling emergence of *Abies koreana* and altitudinal species composition in the subalpine area of Mt. Jiri over Short-Term(2015-2017). *Korean J. Environ. Ecol.* 32(3): 313-322.
- Kim, J.K., J.G. Koh, H.T. Yim and D.S. Kim(2017) Changes of spatial distribution of Korean fir forest in Mt. Hallasan for the past 10 Years(2006, 2015). *Korean J. Environ. Ecol.* 31(6): 549-556. (in Korean with English abstract)
- Kong, W.S.(2002) Species composition and distribution of Korean alpine plants. *Journal of the Korean Geographical Society* 37: 357-370. (in Korean with English abstract)
- Kong, W.S.(2006) Biogeography of native Korean pinaceae. *Journal of the Korean Geographical Society*, 41. (in Korean with English abstract)
- Koo, K.A., W.K. Park and W.S. Kong(2001) Dendrochronological analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea: Effects of climate change on the growths. *Kor. J. Ecol.* 24(5): 281-288. (in Korean with English abstract)
- Korea National Park Research Institute(KNPRI)(2017) Monitoring of ecosystems related to climate change in National Park, Korea, 211pp. (in Korean)
- Korea National Park Research Institute(KNPRI)(2018) Monitoring of ecosystems related to climate change in National Park, Korea, 351pp. (in Korean)
- Korea National Park Research Institute(KNPRI)(2019) Monitoring of ecosystems related to climate change in National Park, Korea, 355pp. (in Korean)
- Lee, H.H., S.K. Ha, S.O. Hur, K.H. Jung, W.T. Kim and K.H. Kim(2006) Characteristics of soil water runoff and percolation in sloped land with different soil textures. *Korean J. Soil Sci. Fer.* 39(5): 268-273. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.Y.(2013) The Phytosociological Characteristics of *Abies nephrolepis* Community and Population Dynamics as Climate Condition Changes in Mt. Seorak, Korea. Ph.D. Thesis, Dongguk University, Seoul, 181pp. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.W. and S.C. Hong(1995) Ecological studies on the vegetational characteristics of the *Abies koreana* forest. *Journal of Korean Forestry Society* 84(2): 247-257. (in Korean with English abstract)
- Lim, J.H., S.Y. Woo, M.J. Kwon, J.H. Chun and J.H. Shin(2006) Phytosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean Fir in Mt. Halla. *Jour. Kor. For. Soc.* 95(6): 705-710. (in Korean with English abstract)
- Liu, H., S. He, O.A. Anenkhonov, G. Hu, D.V. Sandanov and N. K.

- Badmaeva(2012) Topography-controlled soil water content and the coexistence of forest and steppe in Northern China. *Physical Geography* 33(6): 561-573.
- NIE(National Institute Ecology) (2014) Subalpine Conifer Forest Communities. 136pp.
- Noh, I., J.M. Chung, T.W. Kim, S. Tamirat and H.S. Moon(2018) The ecological characteristics by slope of an abies koreana forest in Seseok of Jirisan National Park. *Journal of Climate Change Research* 9(3): 293-302. (in Korean with English abstract)
- Oh, K.K., Y.K. Jee and S.G. Park(2000) Dynamic patterns of abies koreana population in Chirisan National Park -Central of east area in Chirisan National Park-. *Korean J. Environ. Ecol.* 13(4): 330-339. (in Korean with English abstract)
- Park, H.C., H.Y. Lee, N.Y. Lee, H. Lee and J.Y. Song(2019) Survey on the distribution of evergreen conifers in the major national park: A case study on Seoraksan, Odaesan, Taebaeksan, Sobaeksan, Deogyusan, Jirisan National Park. *Journal of National Park Research* 10(2): 1-8.
- Park, W.K. and H.W. Seo(1999) A dendroclimatic analysis on abies koreana in Cheonwang-bong area of Mt. Chiri, Korea. *The Korean Journal of Quaternary Research* 13(1): 25-33. (in Korean with English abstract)
- Silvertown, J., Y. Araya and D. Gowing(2015) Hydrological niches in terrestrial plant communities: A review. *Journal of Ecology* 103(1): 93-108.
- Song, K.M., J. Kim, Y.J. Kang, H.S. Choi, S.C. Jung, S.Y. Lee, J.H. Lee, J.G. Koh, J.G. Kim, K.H. Lee, Y.P. Hong, J.H. Lm and C.S. Kim(2016) Korea Fir Hallasan Mountain, Why Are They Dying?. National Institute of Forest Service. (in Korean with English)
- Western, A.W., R.B. Grayson, G. Bloschl, G.R. Willgoose and T.A. McMahon(1999) Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resources Research* 35(3): 797-810.
- Wilson, J.P. and J.C. Gallant(2000) *Terrain analysis: Principles and applications*. Wiley, New York, USA.
- Xiang, X., X. Wu, X. Chen, Q. Song and X. Xue(2017) Integrating topography and soil properties for spatial soil moisture storage modeling. *Water* 9(9): 647.