

설악산국립공원 상록침엽수 고사목 공간분포 특성\*  
- 서북능선 일원을 대상으로 -

김진원<sup>1)</sup> · 박홍철<sup>2)</sup> · 박은하<sup>3)</sup> · 이나연<sup>4)</sup> · 오충현<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> 국립공원연구원 연구원, <sup>2)</sup> 국립공원연구원 계장, <sup>3)</sup> 국립공원연구원 책임연구원,  
<sup>4)</sup> 국립공원연구원 연구위원, <sup>5)</sup> 동국대학교 바이오환경과학과 교수

Spatial Distribution of Evergreen Coniferous Dead Trees in  
Seoraksan National Park\*  
- In the Case of Northwestern Ridge -

Kim, Jin-Won<sup>1)</sup> · Park, Hong-Chul<sup>2)</sup> · Park, Eun-Ha<sup>3)</sup>, Lee, Na-Yeon<sup>4)</sup> and Oh, Choong-Hyeon<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Korean National Parks Research Institute, Researcher,

<sup>2)</sup> Korean National Parks Research Institute, Junior Assistant,

<sup>3)</sup> Korean National Parks Research Institute, Senior Researcher,

<sup>4)</sup> Korean National Parks Research Institute, Research Fellow,

<sup>5)</sup> Dept. of Biological and Environmental Science, Dongguk University, Professor.

ABSTRACT

Using high-resolution stereoscopic aerial images (in 2008, 2012 and 2016), we conducted to analyze the spatial characteristics affecting evergreen coniferous die-off in the northwestern ridge (major distribution area such as *Abies nephrolepis*), Seoraksan National Park. The detected number of dead trees at evergreen coniferous forest (5.24km<sup>2</sup>) was 1,223 in 2008, was 2,585 in 2012 and was 3,239 in 2016. The number of cumulated dead trees was 7,047 in 2016. In recent years, the number of dead trees increased relatively in the northwest ridge, Seoraksan National Park. Among the analysed spatial factor (altitude, aspect, slope, solar radiation and topographic wetness index), the number of dead trees was increased in the conditions with high altitude, steep slope and dry soil moisture. A spatial distribution of dead tree was divided into 2 groups largely (high altitude with high solar radiation, low altitude with steep slope). In conclusion, the dead trees of evergreen coniferous were concentrated at spatial

\* 이 논문은 국립공원공단 국립공원연구원의 「국립공원 기후변화 생태계 모니터링」 사업비에 의하여 수행되었음

**First author** : Kim, Jin-Won, Korean National Parks Research Institute, Researcher,

Tel : +82-33-769-1639, Email : whales9208@knps.or.kr

**Corresponding author** : Oh, Choong-Hyeon, Dept. of Biological and Environmental Science, Dongguk University, Professor,

Tel.: +82-31-961-5123, E-mail: ecology@dongguk.edu

**Received** : 7 August, 2020. **Revised** : 8 October, 2020. **Accepted** : 5 October, 2020.

distribution characteristics causing dryness in the northwestern ridge, Seoraksan National Park.

Key words : *Climate change, topographical features, Stereo aerial image, Geographic Information System*

## I. 서 론

아고산대는 산림대와 고산대 사이의 식생대를 의미하는데, 일반적으로 구상나무, 분비나무, 가문비나무, 주목 등의 상록침엽수림이 상관식생을 이루고 있다. 기후적 조건에 따라서도 구분할 수 있으며, 연평균 약 4~5°C 이하(Walter, 1979; Yim, 1993)인 아한대의 기후와 유사한 조건을 나타내고 있다. 그러나 높은 해발고도에 위치하기 때문에 공기밀도가 낮고, 직사광선이 강하다는 점에서 전형적인 아한대 기후와는 차이를 보인다(Redding *et al.*, 2003; Woodward *et al.*, 1994; Collin, 1984). 이를 기준으로 하면 한라산 1,500m, 지리산 1,300m, 설악산 1,000m 이상으로 보기도 한다(Yim, 1993).

최근 기후변화로 인해 동식물의 생물학적, 생태학적 변화가 우려되고 있는 실정이며, 특히 아고산대는 취약 생태계로 분류된다. 고산, 아고산대 수목들은 기온이 상승하게 되면 다른 식물들에 비하여 그 서식지가 감소하거나 심할 경우 소멸될 가능성이 높다(Horikawa *et al.*, 2009). 유럽 알프스 지역뿐만 아니라 호주, 아프리카, 동아시아 등 전세계에서 상록침엽수 고사 현상이 나타나고 있으며(Rebetez *et al.*, 2004; Allen *et al.*, 2010), 국내에서도 1970년 후반부터 지리산국립공원 반야봉 등 고산지역에서 구상나무가 고사하고 있음을 밝힌 바 있다(Kyunghyang Shinmun, 1979; Hankyoreh, 1992; SBS, 2005; Yonhapnews, 2013). 상록침엽수 쇠퇴가 두드러지게 나타나면서 이에 대한 관심이 높아졌으며, 국내는 주로 고유종인 구상나무를 중심으로 수목 분포 특성, 개체군 및 군집 동태와 관련된 연

구가 진행되었다(Kim and Choo, 2000; Kim, 2000; Kim *et al.*, 2007; Hong *et al.*, 2008; Koh *et al.*, 1996; Park and Seo, 1999).

특히 구상나무 등 아고산대 상록침엽수 고사가 가시화되면서 거시적 차원에서 개체의 생육 및 고사 분포 변화에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이와 같은 공간정보 분석 연구는 고해상도 항공영상과 함께 가속화되고 있다. Kim *et al.*(2017)은 항공영상 기반 2006년과 2015년 한라산 구상나무림의 분포면적, 수관밀도, 해발고도, 방위 및 지역별 특성 등 공간분포변화를 분석한 바 있으며, Ahn *et al.*(2019)은 8cm급 항공영상 기반 입체도화프로그램을 활용하여 한라산 구상나무림의 생육목과 고사목에 대한 분포도를 작성하였고 해발고도, 경사, 경사향, 연간 일사량, 수계망 등 지형 요인과 구상나무 자생시간 관계를 분석하였다. Park *et al.*(2020)도 이와 유사하게 지리산 주요 3개 봉우리를 대상으로 10cm급 항공영상 기반 입체도화프로그램을 활용하여 구상나무 고사목에 대한 공간분포도 작성 및 지형요인에 대한 시계열 변화 분석을 수행하였다. 종합하면 대부분의 연구가 지형 요인과 구상나무 고사간 관계를 파악하였으며, 시간이 흐름에 따라 공간적으로 어떻게 확산되어 가는지에 초점을 두고 있음을 알 수 있다. 이는 상록침엽수 고사 원인을 추정할 수 있게 하며, 향후 고사 지역에 대한 예측도 가능하게 한다.

구상나무 관련하여서는 어떤 지형적 특성에서 고사하고 있는지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 반면, 구상나무와 거의 유사한 분비나무에 대한 연구는 진행된 바가 거의 없다. 분비나무(*Abies nephrolepis*)는 대표적인 아고산대

수종으로 산지 500m에서 2,000m 이상의 고지대까지 자라고 러시아 시호테-알린 지역을 포함한 극동 지역, 중국 동북 지역 및 한반도 지역에서 자생하고 있다(KNA, 2015; Gong, 2004). 국내에서 대표적 분비나무 서식지인 설악산국립공원은 전체 면적이 약 398.24km<sup>2</sup>이며, 분비나무, 눈잣나무, 주목 등 상록침엽수 분포 면적은 약 20.09km<sup>2</sup>로 공원 면적의 약 5.04%에 해당한다(Park *et al.*, 2019). 상록침엽수 분포 면적 중에서 분비나무 서식지는 약 19.78km<sup>2</sup>로 대부분을 차지하고 있고, 10% 이상 50% 미만(16.88km<sup>2</sup>, 84.02%)의 생육밀도로 나타난다(KNPRI, 2017). 나머지 일대는 주목(0.28km<sup>2</sup>, 1.40%)과 눈잣나무(0.02km<sup>2</sup>, 0.12%)가 분포하고 있다(KNPRI, 2017). 설악산국립공원 내 상록침엽수는 주로 황철봉~대청봉~귀뚜기청봉~안산에 이르는 능선부에 분포하고 있고, 그 중에서도 대승령~귀뚜기청봉~중청에 이르는 서북능선 북사면에 높은 밀도로 분포하고 있다(KNPRI, 2017). 서북능선 구간 중 귀뚜기청봉에서 대청봉 일원은 특히 분비나무가 밀도 높게 분포함과 동시에 고사현상도 많이 나타나는 지역(KNPRI, 2018; KNPRI, 2019, Chun *et al.*, 2019; Lee, 2013; Lim *et al.*, 1985)이다. 따라서 본 연구는 설악산국립공원 서북능선 일원을 대상으로 분비나무 등 상록침엽수 고사 관련 공간정보 특성을 분석하고 구상나무 자생지 고사 패턴과 비교하고자 수행되었다.

## II. 연구대상지 및 방법

### 1. 연구대상지

연구는 국내 분비나무 대표 서식지인 설악산국립공원 귀뚜기청봉~대청봉 일원 중 분비나무 생육밀도가 25% 이상인 약 5.24km<sup>2</sup> 면적을 대상으로 수행하였다(Figure 1).

### 2. 항공영상 자료

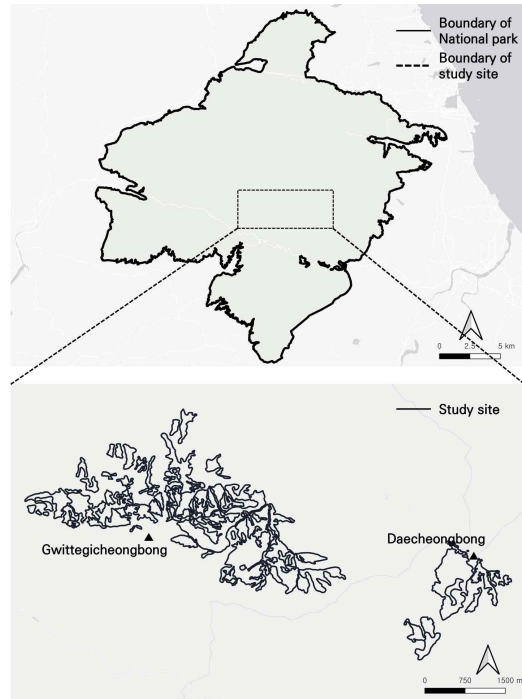


Figure 1. Northwestern Ridge of Seoraksan National Park

설악산국립공원 서북능선 일원의 상록침엽수 고사목 공간분포의 시계열적 변화 분석을 위하여 본 연구에서 사용된 항공영상 자료는 삼이항업(주)에서 2008년 6월, 2012년 5월, 2016년 5월에 촬영한 디지털 항공영상이다(Table 1). 촬영 카메라는 항공기용 카메라인 ‘Ultracam Eagle Mark 2’, ‘Ultracam XP’을 사용하였다. 2008년 영상은 25cm급 해상도이고 2012년과 2016년은 10cm급 해상도로, 침엽수와 활엽수, 고사유무 판별이 가능하도록 하였다. 특히 계절적인 차이를 최소화하기 위하여 거의 비슷한 시기에 촬영된 영상을 사용하였다. 2019년에 새롭게 항공영상을 촬영하여 고사목의 시계열적 변화를 파악하고자 하였으나 정부의 관문점 선언에 따라 대상지역에서 비행이 금지되어 보유하고 있는 최신 자료인 2016년 자료를 활용하였다.

### 3. 항공영상 육안판독 및 코딩

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

Region	Camera System	Taking Photograph		Pixel Resolution
		Year	Month	
Seoraksan	Ultracam XP	2008	6	25cm
	Ultracam Eagle Mark 2	2012	5	10cm
		2016	5	

상록침엽수 고사목에 대한 육안판독 정확도 제고를 위해 Park *et al.*(2020)에서 수행한 입체 항공영상판독시스템을 활용하여 동일한 방식으로 분석을 진행하였다. 입체항공영상판독은 복잡한 산지 지형을 대상으로 사람이 접근하기 어려운 지역까지를 포함하여 정확한 판독이 가능하다는 장점이 있다. 해당 시스템은 삼아항공(주)에서 개발한 ‘DPSMaster’ 프로그램으로 운영되며, 중첩 촬영된 항공영상의 지상 좌표 값 정보를 통해 점, 선, 면 형태의 수치지도로 지형·지물을 묘사한다. ‘DPSMaster’는 입체(3D)로 구현된 고해상도 항공영상을 바탕으로 수종 및 수목 형태(침·활엽수, 고사 등)를 육안으로 판독할 수 있도록 지원해준다.

상록침엽수 고사목은 Park *et al.*(2020)과 마찬가지로 잎이 모두 떨어진 채 가지만 남아있는 상태로 정의하였다. 고사형태는 서서 고사 및 쓰러져 고사한 개체로 구분하여 고사목 데이터를 구축하였다(Table 2). 대상지 내 모든 고사개체에 대하여 점 데이터(point data)로 코딩작업을 수행하였으며, 2008, 2012, 2016년 각 연도별로 고사목 데이터 구축하였다. 데이터는 공간정보처리프로그램 등에서 수정·편집이 가능한 파일 형태(shp, dwg)로 제작하였다.

#### 4. 고사목 공간정보 분석

고사가 주로 발생하는 공간적 특성을 파악하기 위하여 고사 개체마다의 표고, 경사향, 경사도, 일사량, 지형습윤지수를 분석하였다.

표고, 경사향, 경사도 등 공간분포 특성을 분

석하기 위하여 수치고도자료를 활용하였다. 수치고도자료는 1:5,000 수치지도에서 등고선 레이어를 추출하고, 불규칙삼각망(TIN: Triangulated Irregular Network)으로 면 데이터를 생성한 후 5m 격자단위의 격자자료를 제작하여 사용하였다.

경사향은 수치고도자료를 이용하여 중심 셀을 기준으로 주변 8개의 수치 값으로부터 계산하였고, 경사도는 중심 셀을 기준으로 좌·우 3

**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

\* Park *et al.*(2020)

개 데이터에서 X 방향 변화율과 Y 방향 변화율을 구하고 중심 셀에 대한 기울기를 계산하여 분석하였다.

일사량은 태양으로부터 오는 복사에너지가 지표에 닿는 양을 의미하며, 단위면적당 1시간 동안 받는 에너지의 양으로 표현된다. ArcGIS의 Solar Radiation Tool을 이용하여 수치지형도로 제작한 수치고도모델(DEM: Digital Elevation Model)을 기준으로 대상지역이 여름철 기간 동안 태양고도 각에서 받는 태양에너지를 수치적으로 계산하였다. 본 연구에서 사용한 DEM은 2017년 기준 수치지형도를 참고하여 제작하였다.

지형습윤지수(TWI: Topographic Wetness Index)는 강우로 인해 빗물이 지표에 떨어졌을 때 사면경사와 경사방향을 고려하여 강우가 어떤 방향으로 흘러가는지, 그리고 흘러갔을 경우의 양을 수치적으로 표현한 자료이다. 지형습윤지수가 '0'에 가까울수록 강우 시 집수되는 물의 양이 적음을 의미하며, 값이 커질수록 강우 시 집수되는 물의 양이 많음을 의미한다. ArcGIS Hydrology Tool의 Fill → Flow Direction → Flow Accumulation을 이용하여 지형습윤지수를 분석하였다. 해당 분석 또한 1:5,000 수치지형도 기반 수치고도자료(DEM)를 활용하였다.

### 5. 공간특성 유형화 및 유의성 검정

구축된 고사목 공간자료를 바탕으로 상록침엽수 고사목 공간특성을 유형화하기 위하여 K평균군집분석을 수행하였으며, 어떤 지형요인이 유형 구분에 영향을 미쳤는지 유의성 검정을 실시하였다.

또한 시계열 및 고사 형태에 따른 고사목 공간분포 특성을 파악하였다. 시계열에 따른 공간분포 특성 변화의 경우 고사목 발생 시기를 과거부터 2008년, 2009년부터 2012년, 2013년부터 2016년으로 구분하여 유의성 검정을 실시함으로써 과거와 최근에 발생한 고사목 발생지역의 경향 차이를 비교하였다. 고사 형태는 2016

년까지 누적된 전체 고사목에서 서서 고사한 개체와 쓰러져 고사한 개체를 구분하여 이들간 유의성을 분석하였다. 또한, 여기서 더 나아가 각 고사형태별 시계열적인 변화를 분석하여 경향을 파악하였다. 유형분류 및 유의성 검정을 위하여 SPSS statistics 14 프로그램을 사용하였고, 정규성 분석 결과 모두 비정규분포를 보이고 있어 유의성 검정에는 독립2표본(Mann-Whitney), 독립K표본분석(Kruskal-Wallis test)을 진행하였다. 독립K표본분석 시 집단 간 유의적 차이가 있는 경우 다시 독립2표본분석을 진행하여 각 집단 간 유의성을 확인하였으며, 이때 유의수준은 집단수로 결정하여 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 고사목 공간정보 분석

#### 1) 해발고도

설악산국립공원 서북능선 일원에서 고사목은 주로 1,100m 이상~1,150m 미만(9.14%), 1,150m 이상~1,200m 미만(11.33%), 1,200m 이상~1,250m 미만(9.94%), 1,500m 이상~1,550m 미만(9.79%)에 분포하는 것으로 나타났다. 8년 전인 2008년과 비교하였을 때 큰 변화는 없었다. KNPRI(2017)에서 작성한 설악산국립공원 상록침엽수 분포도에 따르면 대부분 1,000m에서 1,400m에 분비나무 등이 분포(77.72%)하고 있기 때문에 고사목 또한 주로 1,100m에서 1,250m 구간에서 높게 나타난 것으로 파악되었다.

시계열에 따른 변화의 경우 과거부터 2008년 1,301.56m(표준편차 174.42), 2009년부터 2012년 1,317.59m(표준편차 175.67), 2013년부터 2016년 1,323.59m(표준편차 176.55)로 시간이 지날수록 점차 해발고도가 높은 곳으로의 고사목 증가세를 확인할 수 있었다. 고사형태를 선채로 고사한 개체, 쓰러져 고사한 개체로 구분하였을 때 선채로 고사한 개체의 경우 평균 해발고도는 1,326.84m(표준편차 175.17), 쓰러져

Table 3. Results of K-Mean Cluster analysis

Devison	Cluster		Error		F	Sig.
	Mean Square	df	Mean Square	df		
Elevation	44,814,406.803	1	24,621.367	7045	1,820.143	.000
Slope	252,013.012	1	42.241	7045	5,966.127	.000
Solar radiation	2,170,996,002.28	1	163,990.157	7045	13,238.575	.000
TWI	2,041.531	1	1.592	7045	1,282.015	.000

고사한 개체는 1,247.62m(표준편차 166.36)로 나타났다. 따라서 서서 고사한 개체가 쓰러져 고사한 개체에 비하여 보다 높은 해발고도에 분포하고 있음을 알 수 있다.

## 2) 사면향

상록침엽수 고사목은 주로 서(21.22%), 북서(17.98%), 북(16.83%) 방향에 주로 분포하는 것으로 나타났고 시계열적인 변화는 거의 없었다. 서서 고사한 개체의 경우 서(30.35%), 북서(29.40%) 방향에, 쓰러져 고사한 개체 또한 북서(38.50%), 서(26.92%) 방향에 주로 분포하여 큰 차이는 보이지 않았다.

## 3) 경사도

상록침엽수 고사목이 분포하고 있는 평균 경사는 32.47°(표준편차 8.83)로 나타났다. 대부분 25° 이상 35° 미만 구간(44.77%)에 주로 분포하고 있으며, 25° 이상 30° 미만(24.30%)에서 가장 높은 비율을 보였다. 시계열에 따른 평균 경사 변화는 과거부터 2008년 31.55°(표준편차 8.33), 2009년부터 2012년 32.63°(표준편차 8.85), 2013년부터 2016년 32.69°(표준편차 8.98)로 나타나 큰 변화가 없었지만, 대체적으로 경사가 급한 곳에서 고사가 이루어짐을 알 수 있었다. 선 채로 고사한 개체의 평균 경사는 32.38°(표준편차 8.66)인 반면, 쓰러져 고사한 개체의 평균 경사는 33.18°(표준편차 9.99)로 나타났으나 큰 차이는 없었다.

## 4) 일사량

서북능선 일원 고사목은 일사량 5,400 kcal/m<sup>2</sup> 이상 6,200 kcal/m<sup>2</sup> 미만 구간(46.13%)에 주로 분포하였고, 특히 5,800 kcal/m<sup>2</sup> 이상 6,000 kcal/m<sup>2</sup> 미만 구간(12.53%)에서 높게 나타났다. 2008년에 비하여 2016년에 6,200 kcal/m<sup>2</sup> 이상 6,600 kcal/m<sup>2</sup> 미만 구간에서 3.77% 정도가 증가하여 비교적 일사량이 많은 곳에서 고사목 증가세가 나타났다. 서서 고사한 개체가 평균 5,521.76kcal/m<sup>2</sup>(표준편차 680.63)으로 쓰러져 고사한 개체의 평균 5,367.06kcal/m<sup>2</sup>(표준편차 719.83)보다 일사량이 다소 높은 곳에서 고사하는 것을 확인할 수 있었다.

## 5) 지형습윤지수

고사목은 지형습윤지수 0 이상 10 미만 구간(63.68%)에 주로 분포하였고, 특히 0 이상 5 미만 구간(47.82%)에서 높게 나타났다. 2008년에 비하여 0 이상 5 미만 구간 비율이 약 4.57%로 가장 크게 증가하여 비교적 건조한 토양환경에서 고사목 증가세를 확인할 수 있었다. 또한 서서 고사한 개체의 평균 지형습윤지수가 2.49(표준편차 1.37), 쓰러져 고사한 개체의 평균 지형습윤지수가 2.54(표준편차 1.38)로 나타났으나 큰 차이는 없었다.

## 2. 고사목 공간특성 유형화

조사된 고사목 공간특성은 2가지 유형으로 구분되었으며, 전체 조사된 고사목 7,047개체에서 2,495개체는 군집 1, 4,552개체는 군집 2로

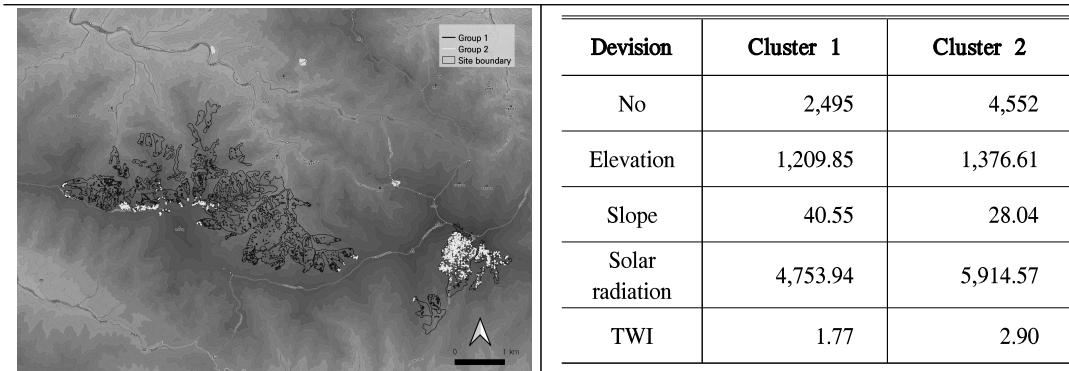


Figure 2. K-Mean Cluster analysis results of dead evergreen conifers

분류되었다(Table 3). 군집 1은 해발고도가 군집 2보다 상대적으로 낮으나 경사가 급해 지형습윤 지수가 낮은 집단으로 나타났다. 군집 2는 군집 1보다 해발고도가 높으나 상대적으로 경사가 낮고 일사량이 높은 집단으로 나타났다. 군집 1의 경우 급경사지임에 따라 유출되는 강우량이 커 지형습윤지수가 낮은 특성을 보이며(Western *et al.*, 1999; Wilson *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2012), 군집 2는 해발고도가 높아 일사량이 높은 특성 (Jo *et al.*, 1996)을 보였다. 두 군집 환경특성은 공통적으로 수분특성을 반영함에 따라 상록침엽수 고사에 건조가 미치는 영향을 추정할 수 있었다.

### 3. 시계열 및 고사형태에 따른 비교 분석

#### 1) 고사목 발생 시계열 변화

설악산국립공원 서북능선 일원 약 5.24km에서 과거부터 2008년까지 고사목은 총 1,223개로 선 채로 고사한 개체는 1,151개, 쓰러져 고사한 개체는 72개였다. 2008년부터 2012년까지 고사목은 총 2,585개로 선 채로 고사한 개체는 2,350개, 쓰러져 고사한 개체는 235개였다. 2012년부터 2016년까지 고사목은 총 3,239개로 선 채로 고사한 개체는 2,721개, 쓰러져 고사한 개체는 518개였다. 그에 따라 과거부터 2016년까지 누적된 고사목은 총 7,047개로 선 채로 고사한 개체는 6,222개, 쓰러져 고사한 개체는 825개로

확인되었다(Table 4). 선 채로 고사한 개체가 쓰러져 고사한 개체에 비하여 2008년 16.0배, 2012년 10.0배, 2016년 5.3배 많이 나타났다. 대부분의 고사목이 강풍, 봄철 강우량 부족에 의한 생육 스트레스 누적으로 고사한 가운데 (KNPRI, 2018; KNPRI, 2019) 쓰러져 고사한 개체는 외부의 물리적 힘을 견디지 못한 결과이며, 쓰러져 고사한 개체가 많은 지역은 특히 바람을 많이 맞는 지역일 가능성이 높다.

2008년 이전, 2009-2012년, 2013-2016년으로 구분하여 시계열에 따른 고사목 공간분포 특성 변화를 분석한 결과, 해발고도, 경사, 지형습윤 지수에서 유의적 차이가 나타났다(Table 5). 2009-2012년과 2013-2016년간 유의적 차이는 없었으나, 2008년 이전과 2009-2012년은 경사, 지형습윤지수에 유의적 차이를 보였다. 또한 2008년 이전과 2013-2016년은 해발고도, 경사, 지형습윤지수에 유의적 차이를 보였다. 따라서 과거에 비하여 해발고도가 높고, 경사가 급하며 토양수분이 적은 지역에서 고사목이 증가하는 추세를 보인 것으로 나타났다.

#### 2) 고사형태에 따른 차이

고사 형태를 서서 고사와 쓰러져 고사로 구분하고 그에 따른 공간분포 특성을 분석한 결과, 두 형태간 해발고도(P=0.000), 일사량(P=0.000) 항목에서 유의적 차이(95% 신뢰수준, p<0.05)를

**Table 4.** Number of dead tree of northwestern ridge in Seoraksan National Park

Devison	Prior to 2008	2009-2012	2013-2016
Standing dead tree	1,151	2,350	2,721
Fallen dead tree	72	235	518
Total	1,223	2,585	3,239
Devison	2008 (Accumulated)	2012 (Accumulated)	2016 (Accumulated)
Standing dead tree	1,151	3,501	6,222
Fallen dead tree	72	307	825
Total	1,223	3,808	7,047

**Table 5.** Results of Independent K analysis of environment factor according to time series(\* p<0.05)

Division	Elevation	Aspect	Slope	Solar radiation	TWI
Median	1,295.6362	6.0000	31.4530	5,595.1380	2.3811
Chi-Square	21.142	2.461	11.713	4.061	11.266
df	2	2	2	2	2
Asymp. Sig.	.000*	.292	.003*	.131	.004*

**Table 6.** Results of Mann-Whitney test of environment factor according to death type(\* p<0.05)

Division	Elevation	Aspect	Slope	Solar radiation	TWI
Mann-Whitney U	1,896,352.5	2,469,171.5	2,470,339.5	2,239,983.0	2,516,971.0
Wilcoxon W	2,237,077.5	21,828,925.0	21,830,093.0	2,580,708.0	21,876,724.0
Z	-12.206	-1.796	-1.753	-5.948	-.903
Asymp. Sig.	.000*	.072	.080	.000*	.366

확인하였다(Table 6). 서서 고사한 개체가 쓰러져 고사한 개체에 비하여 높은 해발고도와 일사량이 많은 곳에 분포하고 있음을 알 수 있다. 쓰러져 고사한 개체가 많이 발생한 지역이 바람을 주로 맞는 지역인지에 대한 향후 추가 분석이 필요하다.

### 3) 고사형태별 시계열 변화

고사 형태별 시계열에 따른 변화를 분석한 결과, 서서 고사한 개체는 시간이 지남에 따라 해발고도(P=0.000), 경사(P=0.000), 지형습윤지수(P=0.000) 항목에서 유의한 것(95% 신뢰수준, p<0.0167)으로 나타났고, 쓰러져 고사한 개체는 해발고도(P=0.000) 항목에서 유의한 것(95% 신

뢰수준, p<0.0167)으로 나타났다(Table 7). 두 형태 모두 시간이 지남에 따라 해발고도가 높아지는 경향을 보였고, 특히 서서 고사한 개체는 급경사지와 토양수분이 적은 곳에서의 발생이 증가하였다.

## 4. 고찰

설악산국립공원 서북능선 일원에서 상록침엽수 고사목은 총 7,047개로 1,100m 이상 1,300m 미만, 1,500m에 주로 분포하고 있으며, 대부분 분비나무가 넓게 분포하고 있는 지역에서 고사가 발생하였다. 과거에 비하여 상대적으로 높은 해발고도에서 고사목 비율이 늘고 있었으며, 특히 경사가 급하고 토양수분이 적은 곳에서 고사



**Table 7.** Results of Mann-Whitney test of environment factor according to time series in each death type

Type	Division	Elevation	Aspect	Slope	Solar radiation	TWI
Standing	Mann-Whitney U	1,440,536.5	1,538,456.5	1,441,296.5	1,542,314.0	1,422,727.0
	Wilcoxon W	2,103,512.5	5,241,737.5	2,104,272.5	5,245,595.0	5,126,008.0
	Z	-3.944	-.875	-3.920	-.743	-4.504
	Asymp. Sig.	.000*	.382	.000*	.457	.000*
Fallen	Mann-Whitney U	10,862.000	15,654.000	18,065.000	16,142.500	16,973.500
	Wilcoxon W	13,490.000	150,175.000	20,693.000	18,770.500	151,394.500
	Z	-5.745	-2.242	-.430	-1.849	-1.236
	Asymp. Sig.	.000	.025	.667	.065	.216

목 증가세가 나타났다. 고사 형태에 따라서는 서서 고사한 개체가 쓰러져 고사한 개체보다 해발고도가 높고 일사량이 많은 지역에 주로 분포하고 있어 차이를 보였다.

본 연구 결과를 종합하면, Park *et al.*(2020)이 지리산국립공원 주요 봉우리들을 대상으로 상록침엽수 고사목 공간정보를 조사한 결과와 거의 유사하게 일사량이 높고 토양수분함량이 낮은 지역에서 주로 고사가 이루어지는 것으로 나타났다. 이는 전 세계적으로 많은 지역에서 기후변화로 인한 가뭄, 수분 스트레스로 다양한 식물이 고사함을 보고한 바와도 일치되어 의의가 있다(Allen *et al.*, 2010; Adams *et al.*, 2009; Anderegg *et al.*, 2013; Breshears *et al.*, 2009; Grant, 1984; Bigler *et al.*, 2007).

Park *et al.*(2020)에서 지리산국립공원 반야봉, 영신봉, 천왕봉 일원 약 5.94km<sup>2</sup> 대상으로 상록침엽수 고사목 공간분포 특성을 분석한 결과, 총 27,421개가 확인된 것에 비하여 비슷한 면적에서 보다 적은 개체가 고사한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 단순히 고사목 개체수만으로 비교하기는 어려우며, 대상지의 생육목 현황과 함께 고사목 추이를 이해하는 것이 필요하다. 그러나 두 지역 모두 2013년부터 최근에 고사한 개체가 비교적 많다는 것이 중요하다. 특히 지리산국립공원의 경우 주요 3개 봉우리에서

2013년부터 2017년에 고사한 개체가 전체 고사목 비율의 약 56.8%를 차지한다. 설악산국립공원의 경우 약 46%에 해당하는 상록침엽수 개체들이 2013년부터 2016년에 고사하였다. 지리산 반야봉, 영신봉 및 설악산 귀뚜기청봉을 대상으로 나이테를 분석한 결과, 구상나무, 분비나무 고사목들이 2000년대 후반부터 주로 고사하였고, 고지대 특성상 강풍, 수분 부족 등으로 인해 지속적인 생육 스트레스가 누적되어 고사한 것으로 나타났다(KNPRI, 2018; KNPRI, 2019). 최근 기후변화로 인한 온도 상승, 태풍 발생 빈도 증가, 적설 감소 등으로 인해 수목이 겪는 생육 스트레스가 보다 클 것으로 예상되고 있으며, 이를 종합적으로 파악하기 위한 미기상 관측 등이 야고산대를 대상으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

그러나 해양성 기후에 속하는 한라산에서 구상나무 고사 관련하여 Ahn *et al.*(2019)이 분석한 결과, 한라산 구상나무는 과도한 토양수분에 의하여 고사한 것이라 밝힌 바 있어 지리산, 설악산과 같은 내륙형 산림과는 차이를 보였다. 따라서 실제로 지역에 따른 차이가 있는지에 대한 정밀한 비교, 분석 연구가 추후 필요할 것으로 보인다. 또한 Ahn *et al.*(2019)은 항공영상을 활용하여 구상나무 생육목과 고사목을 모두 분석한 반면, 설악산, 지리산은 항공영상만으로

다른 상록침엽수종인 잣나무, 전나무, 가문비나무 등을 구분하기 어려워 아직까지 생육목까지 범위를 확장하지 못한 한계가 있다. 생육목 개체수를 파악하여야 개체군 동태, 고사 정도를 파악할 수 있기 때문에 생육목 검출에 대한 조사가 향후 필요하다.

구상나무를 포함한 우리나라 *Abies*림의 천이는 밀도 높고 동일한 크기의 개체가 집단을 이루는 순림을 발달 중기까지 형성하며, 이후 수관 구성 개체의 밀도 조절 및 활엽수 성장에 의해 침활혼합림이 형성되고 및 그 이후에는 소규모 교란에 의해 유지되는 일련의 과정으로 알려져 있으며, 토양 사면과 같은 특정 서식지 조건에 따라 생성 후 거의 소멸할 수 있다(KNA, 2015). 이처럼 지형 요소는 공간 규모와 관계없이 식물종 서식을 제어하는 중요한 인자(Bledsoe *et al.*, 2000; Han *et al.*, 2019)로 본 연구에서는 주로 지형 요인과 상록침엽수 고사와의 관계를 분석하였다. 그러나 단순히 지형요인만 분비나무 고사에 영향을 미치지 않으며, 다양한 요인이 복합적으로 작용할 수 있다. 이와 관련하여 지형 요인과 함께 향후 바람에 대한 상록침엽수 영향 또한 분석할 필요가 있다. 아고산대는 바람의 영향을 많이 받으며, 천근성수종인 침엽수에서 풍해가 많이 발생한다(Nishimura, 2005). 겨울에 부는 강풍은 일부 지역엔 눈이 쌓이지 못하게 하기도 하고, 일부 지역엔 눈이 깊게 쌓이게도 해 미지형에 따라 식물에게 수분 스트레스를 줄 수도 있다(Wooldridge *et al.*, 1996). 특히 해당 지역은 상록침엽수 편향수가 다수 관찰되어 바람맞이 지역임을 예측할 수 있다. 최근 덕유산을 대상으로 미지형과 바람이 가문비나무의 성장과 분포 특성에 미치는 영향을 분석한 결과, 바람맞이 사면에서 바람맞이 지역에 비하여 가문비나무의 수고 및 수관생장률이 낮았고, 편향수가 발달하는 경향을 보여 바람맞이 지형의 중요성을 보여주었다(Han *et al.*, 2019). 해당 연구를 통해

바람이 상록침엽수 성장에 미치는 영향을 파악할 수 있었으나 향후 상록침엽수 고사에 지형적 요인과 바람 등 미기상이 어떻게 영향을 미치는지도 함께 분석하는 것이 필요하다.

마지막으로 본 연구에서는 고사목에 대한 공간 변화 양상에만 집중하였지만 현장조사 결과 고사 밀도가 높은 지역에서도 분비나무 치수가 발생하고 있기 때문에 이와 같은 개체군 동태를 종합적으로 이해하는 것이 필요하다. 향후 후계목 발생지에 대한 현장조사 등을 통해 어떤 공간특성에서 후계목이 발생하고 있으며, 이를 바탕으로 변화 예측 모델링 개발을 통해 잠재 서식지 도출 및 보전 관리가 필요하다.

#### IV. 결 론

본 연구는 설악산국립공원 서북능선 일원을 대상으로 분비나무 등 상록침엽수 고사목에 대한 연차별 고사 경향 및 입지환경 특성을 분석하였으며, 지리산 구상나무 고사현황과 비교·분석하였다. 2008년 이전보다 비교적 최근에 고사한 개체가 많았으며, 비교적 일사량이 높고 토양수분도가 낮은 지역에서 고사 경향이 증가한 것을 확인하였고, 지리산 구상나무 고사현황과도 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 상록침엽수 고사에 영향을 줄 수 있는 지형요인을 파악하였으나 이외에도 미기상, 개체군 동태 등 다양한 요인이 고사에 영향을 미치기 때문에 이를 종합하여 분석할 필요가 있다.

#### References

- Walter, H.(1979) Vegetation of the earth in relation to climate and the eco-physiological conditions. Springer-Verlag, New York. 240 pp.
- Adams, H.D., M. Guardiola-Claramonte, G.A.

- Barron-Gafford, J.C. Villegas, D.D. Breshears, C.B. Zou, P.A. Troch, T.E. Huxman.(2009) Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality: implications for regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106: 7063~7066.
- Ahn, U.S., D.S. Kim, Y.S. Yun, S.H. Ko, K.S. Kim, 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.
- Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Venetier, 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, 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: 660~684.
- Anderegg, W.R.L., J.M. Kane., L.D.L. Anderegg.(2013) Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change* Vol 3: 30~36.
- Bigler C., D.G. Gavin, C. Gunning, T.T. Veblen.(2007) Drought induces lagged tree mortality in a subalpine forest in the Rocky Mountains. *Oikos* 116: 1983-1994.
- Bledsoe B.P., T.H. Shear.(2000) Vegetation along hydrologic and edaphic gradients in a North Carolina coastal plain creek bottom and implications for restoration. *Wetlands*. 20: 126~147.
- Breshears, D.D., O.B. Myers, C.W. Meyer, F.J. Barnes, C.B. Zou, C.D. Allen, N.G. McDowell, W.T. Pockman.(2009) Tree die-off in response to global-change-type drought: mortality insights from a decade of plant water potential measurements. *Frontiers in Ecology and Environment* 7: 185~189.
- Chun, Y.M., H.Y. Lee, J.H. Gwon, H.C. Park.(2019) Monitoring on the Structure and Dynamics of *Abies nephrolepis* Populations in Seoraksan National Park. *Korean journal of environmental and ecology* 33(5): 565~577.
- Collins, D. N.(1984) Climatic variation and runoff from Alpine glaciers. *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie* 20: 127~145.
- Gong, W.S.(2004) Species Composition and Distribution of Native Korean Conifers. *Journal of the Korean Geographical Society* Vol. 39(4): 528~543.
- Grant, P.J.(1984) Drought effect on high-altitude forests, Ruahine Range, North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany* 22 (1): 15~27.
- Han A.R., J.B. Jung, P.S. Park(2019) Effects of micro-topography on the crown growth of *Picea jezoensis* under different wind conditions on Mt. Deokyu, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* Vol. 21(4): 277~285
- Hankyoreh(1992) Let's protect this place. Emergency call for conservation of natural ecosystems 26: *Abies Koreana* forests in Banyabong where have got ice age history. 1992.03.13.(in Korean)

- Hong, S.G., J.J. Kim, H.K. Cho.(2008) Studies on Natural Regeneration of *Abies Koreana*. The National Academy of Sciences 47(1): 71~84.
- Horikawa M., Tsuyama I., Mastsui T., Kominami Y., Tanaka N.(2009) Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*). Landscape Ecology 24: 115~128.
- Jo D. K., T. K. Lee, I. S. Chun, H. S. Jeon, C. M. Auh.(1996) Solar Radiation Measurement and Analysis of a High Mountain Area. Solar Energy Vol. 16(2): 49~63.
- Kim, G.T.(2000) Studies on the Structure of *Abies koreana* Forest Community at Subalpine Zone Area. Korean Journal of Environment and Ecology 14(1): 28~37.
- Kim, G.T., G.C. Choo.(2000) Comparison of Growth Condition of *Abies koreana* Wilson by Districts. Korean Journal of Environment and Ecology 14(1): 80~87.
- Kim, G.T., G.C. Choo., T.W. Um.(2007) Studies on the Structure of *Abies koreana* Community at Subalpine Zone in Hallasan. Korean Journal of Environment and Ecology 21(2): 161~167.
- Kim, T. J.(2008) Wild flowers and resources plants in Korea. 3. Seoul National University. pp. 206~269.
- Kim J.K., J.G. Koh., H.T. Yim., D.S. Kim.(2017) Changes of Spatial Distribution of Korean fir Forest in Mt. Hallasan for the Past 10 Years(2006, 2015). Korean Journal of Environment and Ecology 31(6): 549~553.
- KNA(Korean National Arboretum)(2015) Ecology of woody plants in South Korea(Ⅰ) Conifers. Sumunkil, 216pp. (in Korean)
- KNPRI(Korea National Park Research Institute)(2017) Establishment of a base for monitoring coniferous trees for management of *Larix kaempferi* afforestation in Taebaeksan National Park. 45pp.(in Korean)
- KNPRI(Korea National Park Research Institute)(2018) Monitoring of ecosystems related to climate change in National Park, Korea, 201pp. (in Korean)
- KNPRI(Korea National Park Research Institute)(2019) Monitoring of ecosystems related to climate change in National Park, Korea, 201pp. (in Korean)
- Koh, J.G., D.S. Kim., S.C. Koh., M.H. Kim.(1996) Dynamics of *Abies koreana* Forests in Mt. Halla. The Research of Jeju island 13: 223~241.
- Kyunghyang Shinmun(1979) *Abies Koreana* Rare Tree, which lives only in Hallasan is in endangered. 1979.11.29.(in Korean)
- Lee, H.Y.(2013) The Phytosociological Characteristics of *Abies nephrolepis* Community and Population Dynamics as Climate Condition Changes in Mt. Seorak, Korea. PhD Thesis, Dongguk University, Seoul, 12pp.
- Lim, K.B.(1993) Tree, Past, Present, and Future, Mountain and Korean Life. pp. 225~252.
- Liu, H., S. He, O.A. Anenkhonov, G. Hu, D.V. Sandanov, 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.
- Nishimura, T. B.(2005) Tree characteristics related to stem breakage of *Picea glehnii* and *Abies sachalinensis*. Forest Ecology and Management 215, 295~306.
- Park, H.C., G.S. Moon, H. Lee, N.Y. Lee.(2020)

- A Study on the Spatial Information and Location Environment of Dead Coniferous Tree in Subalpine Zone in Jirisan National Park. Korean Journal of Environment and Ecology 34(1): 45~54.
- Park, H.C., H.Y. Lee, N.Y. Lee, H. Lee, 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., J.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.
- Rebetez, M., Dobbertin, M.(2004) Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. Theor Appl Climatol 79: 1~9.
- Redding, T.E., Hope, G.D., Fortin, M.J., Schmidt, M.G., Bailey, W.G.(2003) Spatial patterns of soil temperature and moisture across subalpine forest-clearcut edges in the southern interior of British Columbia. Can. J. Soil Sci. 83 (1): 121~130.
- SBS(2005) *Abies Koreana* which lives only in Korea is in endangered. 2005.05.31.(in Korean)
- Western, A.W., R.B. Grayson, G.Bloschl, G.R. Willgoose, 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., J.C. Gallant.(2000) Terrain analysis: principles and applications. Wiley, New York, USA.
- Woodward, A, Silsbee, D.G., Shreiner, E.G., Means, J.E.(1994) Influence of climate on radial growth and cone production in sub-alpine fir and mountain hemlock. Can. J.For. Res. 24: 1133~1143.
- Wooldridge, G.L., R.C. Musselman, R.A. Sommerfeld, D.G. Fox, B.H. Connell.(1996) Mean wind patterns and snow depths in an alpine -subalpine ecosystem as measured by damage to coniferous trees. Journal of Applied Ecology 33: 100~108.
- Yim Y.J., S.D. Baek.(1985) Vegetation of Seorak mountain. Chung-Ang University. pp. 102~105.
- Yonhapnews(2013) *Abies Koreana* are dying because of the extreme climate change. 2013.09.01.(in Korean)