



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

농학석사 학위논문

지리산 임결령 지역의
구상나무 개체군 동태

Dynamics of *Abies koreana* population in
Imgeollyeong area on Mt. Jirisan

2023년 8월

서울대학교 대학원

농림생물자원학부 산림환경학전공

남 광 현

지리산 임걸령 지역의
구상나무 개체군 동태

Dynamics of *Abies koreana* population in
Imgeollyeong area on Mt. Jirisan

지도교수 박 필 선

이 논문을 농학석사 학위논문으로 제출함
2023년 8월

서울대학교 대학원
농림생물자원학부 산림환경학전공
남 광 현

남광현의 농학석사 학위논문을 인준함
2023년 8월

위 원 장 김 현 석 (인)

부위원장 박 필 선 (인)

위 원 한 아 름 (인)

초 록

전 세계적으로 기후변화로 인한 산림 생태계의 변화가 보고되고 있다. 우리나라에서도 구상나무(*Abies koreana* E.H. Wilson), 분비나무(*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.), 가문비나무(*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière) 등 높은 고도의 산지에 서식하는 침엽수의 개체군 감소가 계속해서 관찰 및 보고되고 있다.

본 연구는 우리나라의 대표적인 고유수종인 구상나무의 개체군 동태를 파악하고자 구상나무의 주요 자생지인 지리산국립공원 내 임결령 지역에 설치한 1ha의 영구 방형구에서 2005년부터 2023년까지 4차에 걸쳐 수집한 자료를 이용하여 입지 특성과 입분 구조 그리고 기상의 영향을 분석하였다.

연구대상지의 평균 해발고도는 1,294m이며 주된 사면향은 북서향을 나타내었다. 또한 연구대상지는 크게 계곡 지형과 사면 지형으로 이루어져 있었다. 연구대상지에서는 약 40종의 수종이 나타났으며 구상나무의 중요도가 가장 높았다. 흉고직경 분포와 수고 분포는 역 J자형이었고, 구상나무의 흉고직경과 수고 분포 범위가 가장 넓었다. 구상나무의 공간 분포는 계곡 지형보다 사면 지형에서의 밀도가 높아 지형의 영향을 받는 것으로 나타났다.

2005년부터 2023년 사이 연구대상지의 구상나무 개체수는 459본/ha에서 317본/ha로 30.9% 감소하여, 입분 전체 밀도 감소의 약 70%를 구상나무의 밀도 감소가 차지하였다. 구상나무의 중요도는 28.9%에서 25.1%로 감소하였으며 직경급별 구상나무의 밀도는 2.5-25cm의 직경급에서 큰 감소율을 보였다.

구상나무의 연간 고사율은 시기별로 다르게 나타났으며 2차 조사(2009-2013)와 3차 조사(2015-2017) 사이의 연간 고사율이 4.93%로 가장 높게 나타났다. 각 조사 시기 간의 고사율과 진계생장률을 이용한 개체군 성장모델로 구상나무 개체군의 향후 크기를 예측해본 결과 구상나무 개체군 크기는 계속해서 감소할 것으로 나타났으며 2차 조사(2009-2013)

와 3차 조사(2015-2017) 사이의 생장모델로 예측한 구상나무 개체군이 가장 큰 감소세를 보였다.

연구대상지 내 구상나무는 서 있는 생육목의 비율이 감소하고 부러지거나 쓰러진 고사목의 비율이 증가하였다. 구상나무의 고사 양상은 1차 조사(2005-2008)와 2차 조사(2009-2013) 사이에는 서 있는 채로 고사한 상태의 고사목이 56%를 차지하였으나 2차 조사와 4차 조사(2021-2023) 사이에는 부러지거나 쓰러진 상태의 고사목이 고사한 개체 중 70% 이상을 차지하였다.

2003년부터 2022년까지 순간최대풍속 14m/s 이상의 강풍이 발생한 일수가 가장 많은 기간은 2010년부터 2013년 사이로, 연 50회 이상의 강풍을 기록했다. 또한 2010년대 초에 한반도에 큰 피해를 준 태풍이 발생하였다.

본 연구는 지리산 임결령 지역을 대상으로 장기적으로 수집한 자료를 분석하여 지난 15여 년간의 구상나무 개체군 동태를 파악하였고, 강풍과 태풍과 같은 바람에 의한 교란이 이 지역 구상나무의 주요 고사 원인일 가능성을 제시하였다. 본 연구는 지리산 지역 구상나무 개체군 특성의 이해와 구상나무 보전 정책 수립에 도움을 줄 것으로 기대한다.

주요어 : 구상나무, 지리산, 개체군 동태, 바람, 장기생태모니터링

학 번 : 2021-26279

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 방법	4
1. 연구대상지	4
2. 연구 방법	9
2.1. 현장 조사	9
2.1.1. 입지요인 조사	
2.1.2. 매목조사	
2.1.3. 유목 조사	
2.2. 기상 자료	11
2.2.1. 자동기상관측장치(AWS)	
2.2.2. 연구대상지 기상 측정	
2.2.3. 강풍과 태풍	
2.3. 자료 분석	13
2.3.1. 임분 구조	
2.3.1.1 수종 구성	
2.3.1.2 수고 분포	
2.3.1.3 흉고직경 분포	
2.3.1.4 공간 분포	
2.3.2. 개체군 동태	
2.3.2.1 고사율과 이입률	
2.3.2.2 개체군 성장 모델	
2.3.3 고사 양상 및 고사목 동태	
2.3.4. 기상 자료 분석	
2.3.4.1 기상 자료 보간	
2.3.4.2 대기 온도 추세	
2.3.4.3 봄철 강수량 비교	

제 3 장 결 과	22
1. 입지 특성	22
2. 임분 구조	26
2.1. 수종 구성	26
2.2. 수고 분포	31
2.3. 흉고직경 분포	32
2.4. 유목	34
2.5. 공간 분포	37
3. 구상나무 개체군 동태	41
3.1. 구상나무의 흉고직경 분포	41
3.2. 고사율과 이입률	42
3.3. 개체군 성장 모델	46
4. 고사 양상 및 고사목 동태	52
4.1. 구상나무의 생육 형태	52
4.2. 고사 양상	53
4.3. 고사목 동태	54
5. 연구지 기상 특성	56
5.1. 대기 온도	56
5.2. 봄철 강수량	63
5.3. 강풍과 태풍	64
제 4 장 고 찰	66
1. 구상나무 개체군 동태	66
2. 구상나무 개체군 감소와 교란	67
3. 구상나무림 종 조성의 변화	70
제 5 장 결 론	71
참고문헌	72
Abstract	79

List of Tables

Table 1. Site description of the subplots.	24
Table 2. Species diversity index of the study site.	27
Table 3. Importance value (IV) of woody species in the study site. ·	28
Table 4. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 1 st inventory to 2 nd inventory for all plots.	43
Table 5. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 2 nd inventory to 4 th inventory for all plots.	43
Table 6. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 1 st inventory to 2 nd inventory for 13 plots.	44
Table 7. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 2 nd inventory to 3 rd inventory for 13 plots.	45
Table 8. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 3 rd inventory to 4 th inventory for 13 plots	45
Table 9. Growth matrix of <i>Abies koreana</i> between 1 st inventory and 2 nd inventory.	47
Table 10. Growth matrix of <i>Abies koreana</i> between 2 nd inventory and 3 rd inventory.	48
Table 11. Growth matrix of <i>Abies koreana</i> between 3 rd inventory and 4 th inventory.	49

List of Figures

Figure 1. The locations of (a) Mt. Jirisan, (b) Imgeollyeong area, (c) study site and (d) 1-ha permanent plot.	7
Figure 2. Monthly mean precipitation and temperature at Seongsamjae from 2003 to 2022.	8
Figure 3. The arrangement of subplots in the 1-ha permanent plot.	8
Figure 4. Topographic profile with vines and sasa vegetation cover of the study site.	22
Figure 5. Photographs from (a) the valley and (b) the slope in the study site.	23
Figure 6. Height distribution of woody species in the study site in the 1 st inventory (2005–2008).	31
Figure 7. DBH distribution of woody species in the study site in the 1 st inventory (2005–2008).	32
Figure 8. DBH distribution of woody species in the study site in the 2 nd inventory (2009–2013).	33
Figure 9. DBH distribution of woody species in the study site in the 4 th inventory (2021–2023).	34
Figure 10. Density and height of saplings of tree species in the 1 st inventory.	35
Figure 11. Density and height of saplings of tree species in the study site from 4 th inventory.	36
Figure 12. Survival rate of the saplings from 1 st inventory to 4 th inventory.	36
Figure 13. Distribution of the major tree species on the topographic profile in 1 st inventory (2005–2008).	37
Figure 14. Intensity functions of ten major species in the study site.	39

Figure 15. Summary statistics ($L(r)$, $g(r)$) of the univariate spatial point pattern analysis of <i>Abies koreana</i> in the study plot.	40
Figure 16. DBH Distribution of <i>Abies koreana</i> in the study site.	41
Figure 17. Predicted <i>Abies koreana</i> population by DBH class using the growth model between 1 st inventory and 2 nd inventory. ...	50
Figure 18. Predicted <i>Abies koreana</i> population by DBH class using the growth model between 2 nd inventory and 3 rd inventory. ...	50
Figure 19. Predicted <i>Abies koreana</i> population by DBH class using the growth model between 3 rd inventory and 4 th inventory. ...	51
Figure 20. Changes of the percentage of the status of <i>Abies koreana</i> from 2005 to 2023.	52
Figure 21. Death patterns of dead <i>Abies koreana</i> (a) between 1 st inventory and 2 nd inventory and (b) between 2 nd inventory and 4 th inventory for all plots.	53
Figure 22. Death patterns of dead <i>Abies koreana</i> (a) between 1 st inventory and 2 nd inventory, (b) between 2 nd inventory and 3 rd inventory (c) 4 th inventory for 13 plots.	54
Figure 23. Changes of status of dead trees between (a) 1 st inventory and 2 nd inventory and (b) 2 nd inventory and 4 th inventory for all plots.	55
Figure 24. Changes of status of dead trees between (a) 1st inventory and 2nd inventory, (b) 2nd inventory and 4th inventory and (c) 3rd inventory and 4th inventory for 13 plots.	55
Figure 25. Daily mean air temperature (°C) obtained from the study site.	56
Figure 26. Comparison between the temperature of Seongsamjae and the study site.	57
Figure 27. Scatter plot of temperature from Seongsamjae AWS and the study site.	58

Figure 28. Daily mean air temperature of the study site from 2003–2022 including predicted data.	59
Figure 29. Predicted and actual monthly mean air temperature of the study site.	59
Figure 30. A comparison of monthly mean air temperature for 20 years with each year’s monthly mean air temperature.	60
Figure 31. Visualization of the temporal variation in monthly mean air temperature with LOESS smoothing.	61
Figure 32. Linear trendline of March monthly mean temperature from 2003 to 2022.	61
Figure 33. A comparison of 10-day mean air temperature for 20 years with each year’s 10-day mean air temperature from DOY 1–150.	62
Figure 34. Visualization of the temporal variation in 10-day mean air temperature with LOESS smoothing.	63
Figure 35. A comparison of the 20-year mean monthly precipitation during spring (March – June) and the monthly precipitation for each year.	63
Figure 36. Frequency of strong wind events at Seongsamjae from 2003 to 2022.	64
Figure 37. Annual frequency of typhoon impacted on the Korean Peninsula from 2003 to 2022.	65

제 1 장 서론

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 2023년 IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서를 통해 과거(1850~1900년) 대비 현재(2011~2020년)의 지구 온도가 약 1.1℃ 상승하였으며, 이로 인해 산림 생태계를 포함한 지구의 모든 생태계에 비가역적인 변화가 일어났으며 그 규모와 정도가 점점 커질 것으로 보고하였다(IPCC, 2023).

기후변화에 따른 온도의 상승, 가뭄의 증가 등은 지구 전역의 산림 생태계에 영향을 미치고 있으며, 전 세계적인 수목의 고사율 증가와 산림 생태계서비스 저하의 원인이 되고 있다(Meshinev *et al.*, 2000; Kullman, 2002; Parmesan & Yohe, 2003; Allen *et al.*, 2010; Walther, 2010; Bauman *et al.*, 2022). 특히 고산 및 아고산 지역은 생태구배의 극단지역으로 기후변화에 대한 지역적인 취약성을 지니고 있어, 현재 아고산 지대에 서식하고 있는 식물의 분포 범위가 축소되거나 소멸할 위험성이 높은 것으로 알려져 있다(Kimmins, 2004; Horikawa *et al.*, 2009; Mathys *et al.*, 2017; Koo *et al.*, 2017; Forzieri *et al.*, 2021).

실제로 국내를 비롯하여 세계 곳곳에서 고산 및 아고산 지대에 서식하는 전나무속(*Abies*)을 비롯한 다양한 수종들의 쇠퇴가 보고되고 있다(Adams *et al.*, 1985; Splechtna *et al.*, 2000; Jang and Park, 2010; Tanaka *et al.*, 2012; Kharuk *et al.*, 2017; 김은숙 등 2019). 이에 따라 국내에서는 고도가 높은 산지 지역에 자생하는 구상나무(*Abies koreana* Wilson), 분비나무(*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.), 가문비나무(*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière) 등의 7개 침엽수종을 ‘멸종위기 고산 침엽수종’으로 지정하였다(임중환 외, 2019).

구상나무는 전나무(*Abies holophylla* Maxim.), 분비나무와 더불어 국내 자생하는 3종의 소나무과 전나무속 수종이다. 구상나무는 우리나라의 고유수종으로, 한라산, 지리산, 덕유산 등 해발 1,000- 1,900m 이상의 높은 고도의 산지에 분포하는 침엽수종이며, 기후변화 민감종이다(엄규백,

1962; 차종환, 1969; 강상준, 1984; 공우석, 2014; 국립공원공단, 2016; 박홍철 등, 2019; 장진성 등, 2022).

구상나무가 감소하고 있다는 보고는 1980년대부터 있었으며(Hong *et al.*, 2015), 이 중 특히 구상나무의 최대 서식지인 한라산과 지리산에서 광범위한 구상나무의 생장 쇠퇴 현상이 나타나고 있다(강상준, 1984; 김은식, 1994; 김진원 등, 2021). 한국의 자생 식물 중 처음으로 국제자연보전연맹(International Union for Conservation of Nature, IUCN)의 적색목록에 위기(Endangered) 단계로 2010년에 등재되면서부터 그 심각성이 널리 알려지게 되었다(Kim *et al.* 2011). 이에 따라 구상나무의 쇠퇴 여부와 보존 방안에 대한 연구의 필요성이 제기되어, 최근 10년간 구상나무 서식지와 개체수의 감소 현황, 생육 쇠퇴 및 고사의 원인 규명 등 다양한 분야의 연구가 진행되어왔다(구경아와 김다빈, 2020).

구상나무의 생육이 쇠퇴하는 원인으로는 봄철 일사량 증가, 겨울철 및 봄철의 기온 상승, 봄철의 가뭄, 적설량 감소, 토양 수분 부족 등에 의한 수분수지 불균형을 주로 꼽고 있으며(박원규와 서정욱, 1999; 구경아 등, 2001; 오순자 등, 2001; Woo *et al.*, 2008; 서정욱 등, 2019a), 일부는 태풍 등 바람에 의한 교란을 구상나무의 고사 원인으로 제시하기도 하였다(김은식, 1994; 서정욱 등, 2019b). 또한 구상나무는 개체군이 파편화되어 있고 분포지역이 한정되어있어, 기후변화에 적응할 수 있는 유전적 다양성이 부족함이 언급되기도 한다(공우석, 2012).

기후변화에 따른 생태계 또는 생물 군집의 변화를 파악하기 위해서는 장기적인 모니터링을 통해 교란이 생태계에 미치는 영향을 이해하고, 시간에 따른 군집의 변화를 평가할 필요가 있다(Hernández *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2020). 이를 위해 국내에서는 2004년부터 국가장기생태연구사업을 실시하여 산림생태계를 포함한 육상생태계, 담수생태계, 연안생태계, 동물생태계 등 한반도의 생태계별로 장기적인 환경 및 생물다양성의 기초데이터를 수집하고 환경과 기후의 변화가 생태계에 미치는 영향을 연구하고 있다(국립환경과학원, 2013; 정길상 등, 2018). 2005년부터는 남부권의 산림생태계를 모니터링하기 위해 지리산이 선정되어 지리산의

주 능선에 속하는 임결령 지역에 위치한 구상나무림을 대상으로 한 영구 방형구가 설치되었다.

따라서 본 연구에서는 국내 구상나무 주요 자생지인 지리산국립공원의 구상나무림을 대상으로 2005년부터 2023년까지 실시한 장기적인 모니터링 자료로부터 구상나무 개체군의 구조와 시간에 따른 개체군의 동태를 파악하고, 향후 구상나무 개체군의 변화를 예측하고자 하였다.

제 2 장 재 료 및 방 법

1. 연구대상지

본 연구의 대상지인 지리산은 1967년 국립공원으로 지정된 최초의 국립공원으로, 지리산국립공원은 경남의 하동, 함양, 산청, 전남의 구례, 전북의 남원 등 3개의 도와 5개의 시·군에 걸쳐있으며, 범위는 북위 35° 12' 45.23" ~ 35° 26' 52.31" , 동경 127° 27' 11.44" ~ 127° 49' 32.01" 로 약 48만 ha의 면적을 지니고 있어 대한민국의 육상 국립공원 중 면적이 가장 넓은 산악형 국립공원이다(Figure 1 (a)). 지리산의 주봉은 천왕봉으로 해발고도가 1,915m에 이르며, 그 외에도 제석봉(1,806m), 반야봉(1,732m), 촛대봉(1,703m), 노고단(1,507m) 등 해발고도 1,500m 내외의 높은 봉우리 20여 개가 연속적으로 이어져 있다(국립공원공단, 2023).

주 능선인 천왕봉-노고단 능선은 동서 방향으로 발달하여 거리는 25.5 km에 달한다. 동서 방향의 주 산릉으로부터 북동-남서 방향의 능선과 북북서-남남동 방향의 능선이 다수 발달하였으며 능선들 사이 북동-남서 방향 또는 북서-남동 방향의 크고 작은 계곡들(칠선계곡, 피아골계곡, 뱀사골계곡, 심원계곡 등)이 많이 자리 잡고 있다. 또한 지리산국립공원의 지질은 화강편마암 등 고생대 시기의 편마암 복합체에 속하는 변성암류와 중생대 시기의 편마암 복합체를 관입한 화강암, 그리고 시대 미상의 반려암 등의 다양한 변성암 등으로 구성되어 있다(국립공원공단, 2019).

지리산국립공원의 식물상으로 장창기 등(2007)은 지리산국립공원의 관속식물이 현장에서 확인된 109과 382속의 708 분류군을 포함하여 총 1,825 분류군이 생육하고 있으며, 그 중 한반도 특산식물이 구상나무, 세뿔투구꽃(*Aconitum austrokoreense* Koidz.), 물들메나무(*Fraxinus chiisanensis* Nakai) 등을 포함하여 76 분류군이 분포하고 있다고 보고한 바 있다. 국립공원공단(2019)은 지리산의 관속식물을 176과 699속의

2,042 분류군(1,661종, 22 아종, 276 변종, 83 품종)으로 정리하였으며 그 중 국가생물적색목록(국립생물자원관, 2012)의 위기(EN) 범주에 속하는 종이 2 분류군(구상나무, 복주머니란(*Cypripedium macranthos* SW.)), 취약(VU) 범주에 속하는 종이 3 분류군(느리미고사리(*Dryopteris tokyoensis* (Matsum. ex Makino) C. Chr), 땃뚜릅나무(*Oplopanax elatus* (Nakai) Nakai), 세뿔투구꽃(*Aconitum austrokoreense* Koidz.), 그리고 준위협(NT) 범주에 속하는 분류군이 2 분류군(백작약(*Paeonia japonica* (Makino), 애기물파리아재비(*Mimulus tenellus* (Bunge) Miyabe & Takeda)으로 보고하였다.

지리산국립공원은 면적과 고도 범위(해발 110m~1,915m)가 넓고, 지형이 다양하여 가문비나무군락, 구상나무군락 등의 아고산대 침엽수림, 사스래나무군락, 야광나무군락 등의 아고산대 낙엽활엽수림, 신갈나무군락, 줄참나무군락 등의 산지대 활엽수림, 그리고 소나무군락, 전나무군락 등의 산지대 침엽수림 등 총 20개의 다양한 식물군락이 자리 잡고 있는 것으로 나타났다(권재환 등, 2013).

지리산국립공원 내 구상나무, 가문비나무, 주목 등의 아고산대 상록침엽수가 분포하는 면적은 약 41km²로, 공원 면적의 약 8.7%를 차지한다. 그중 99% 이상의 면적에서 구상나무가 분포하고 있고, 위치로는 주 능선인 노고단~반야봉~세석평전~천왕봉을 중심으로 거의 모든 능선부에 구상나무가 분포하고 있다. 지리산국립공원 내 구상나무의 분포 범위는 해발고도로는 800m부터 1,900m까지이며 주로 1,300m 이상의 지역에서 분포한다(박홍철 등, 2019).

지리산 임결령(N 35° 18' 11" E 127° 33' 35")은 지리산의 주 능선인 노고단~천왕봉 중 노고단(1,502m)과 삼도봉(1,499m)의 사이에 있는 고개로, 해발 1,325m 부근에 위치하고 있어 구상나무의 분포지역에 포함된다(Figure 1b). 임결령의 능선으로부터 10m 떨어진 곳에 반야봉으로부터 발원된 샘이 있으며 북서 방향으로 형성된 계곡 지형을 따라 물이 흐르는 전석지가 형성되어 있다.

임결령 지역에서 서쪽으로 약 4km 떨어진 성삼재에 설치되어 있는

기상청 자동기상관측장치(Automatic Weather Station, AWS)에 기록된 최근 20년(2003~2022)의 연 평균 기온은 8.11°C이며, 최난월인 8월의 월 평균 기온은 20.01°C, 최한월인 1월의 월 평균 기온은 -5.18°C이다(Figure 2). 해당 기간 최고 일 평균 기온은 26°C, 최저기온은 -16.9°C를 기록하였다. 연 평균 강수량은 1876.4mm이며 6~9월 사이에 연 강수량의 66%인 1,244.5mm가 내리고, 12-2월에 가장 적은 강수량을 보였다(기상정보개방포털, 2023).

조사지역은 임결령 샘으로부터 서쪽으로 50m 지점에 위치하고 있으며, 주 능선으로부터 북쪽으로 50m 떨어진 지점이다. 교목층은 구상나무가 우점하고 있으며, 아교목층은 쇠물푸레나무(*Fraxinus sieboldiana* Blume)와 당단풍나무(*Acer pseudosieboldianum* (Pax) Kom.)가, 관목층은 철쭉(*Rhododendron schlippenbachii* Maxim.), 노린재나무(*Symplocos sawafutagi* Nagam.), 물참대(*Deutzia glabrata* Kom.) 등이 우점하고 있다. 구상나무 개체군의 장기적인 모니터링을 위해 1ha 크기(100m×100m)의 영구 방형구를 설치하였으며, 영구 방형구의 좌표는 N 35° 18' 11.31-11.38" E 127° 33' 28.50-32.72" (Trimble GPS, Korean 1985 / Modified Central Belt)이다. 영구 방형구는 효율적인 조사를 위해 20m×20m 크기의 소방형구 25개로 나누어 고유번호를 매기고 조사를 시행하였다(Figure 3).

영구 방형구가 설치된 곳의 지형은 사면을 포함한 계곡 지형으로 계곡 지형의 임상은 암석 노출도가 70%가 넘는, 바위로 이루어진 전석지의 형태를 보이지만, 암석 노출도가 낮은 사면 지형은 조릿대가 하층을 점유하고 있거나 조릿대가 고사한 흔적을 보이는 곳이 대부분을 차지하였다. 사면은 대부분 북-서사면으로 이루어져 있으며 일부 소방형구는 남서사면의 사면향을 나타냈다.

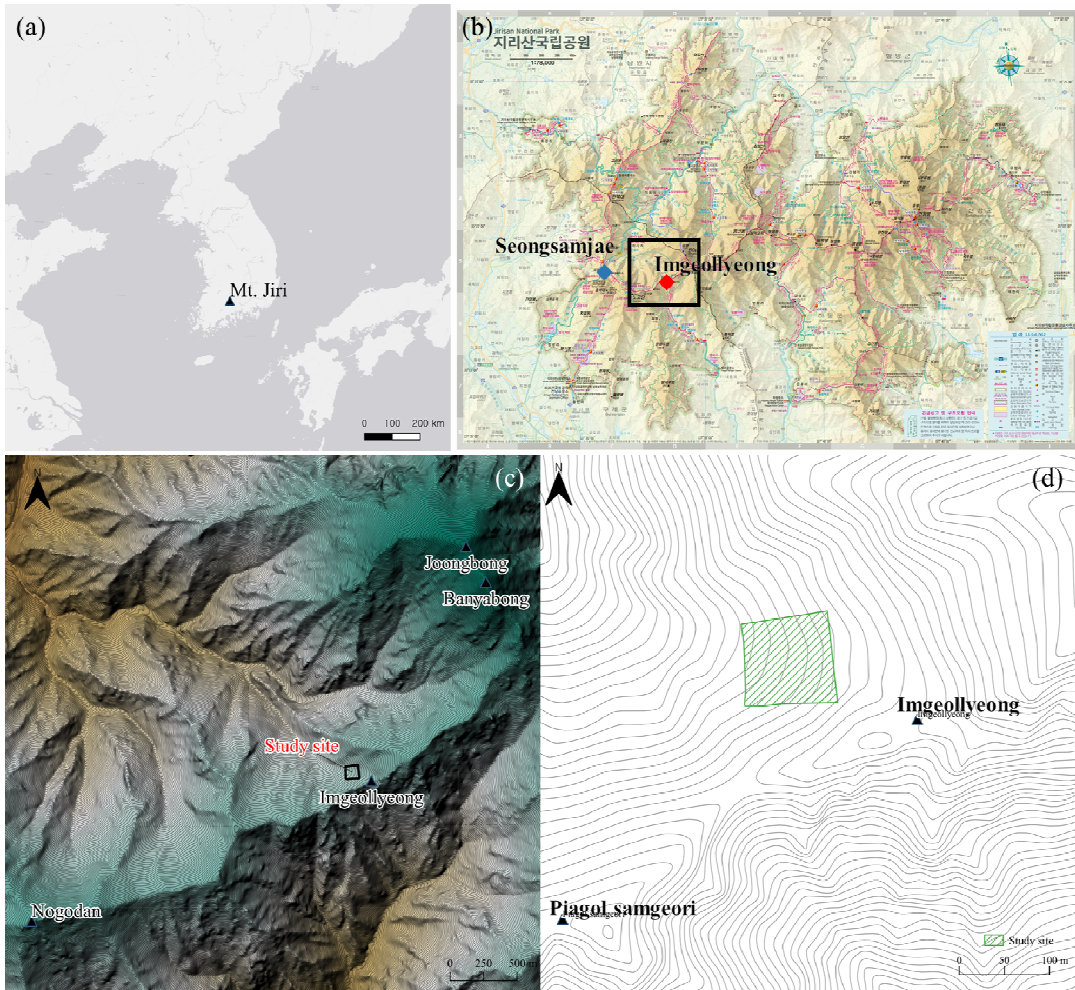


Figure 1. The locations of (a) Mt. Jirisan, (b) Imgeollyeong area, (c) study site and (d) 1-ha permanent plot.

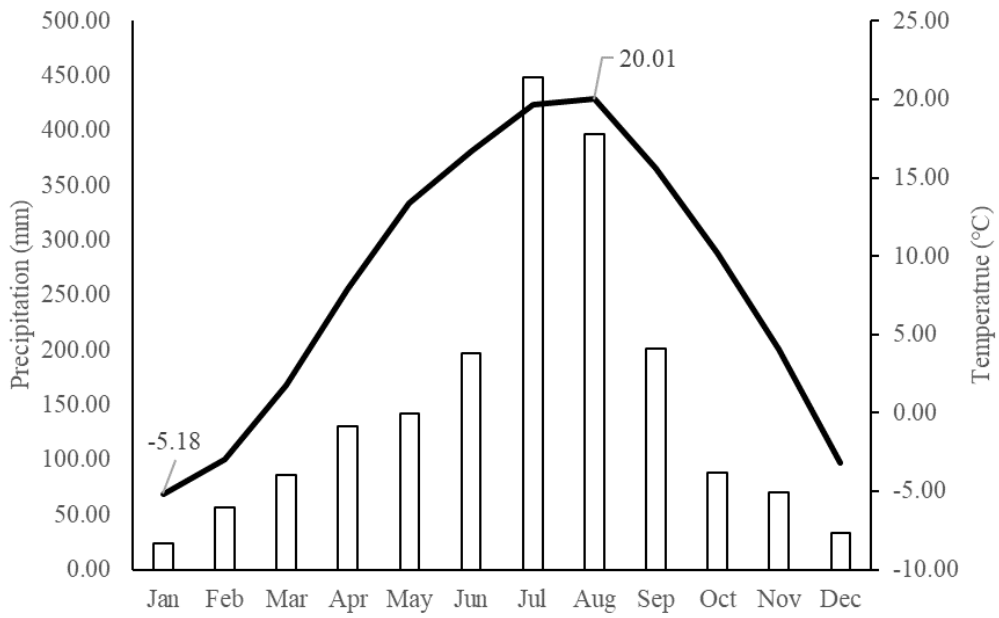


Figure 2. Monthly mean precipitation and temperature at Seongsamjae from 2003 to 2022.

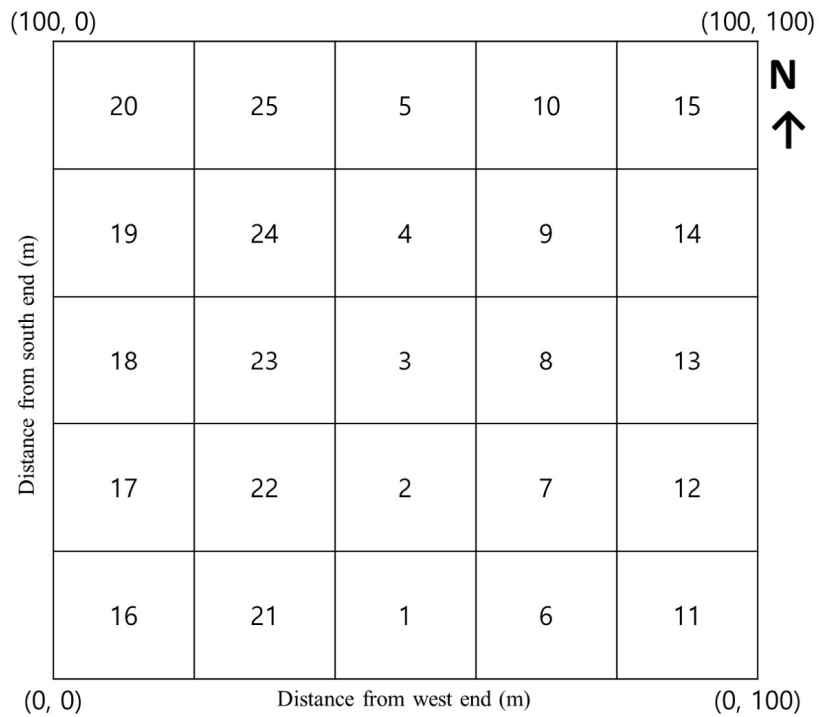


Figure 3. The arrangement of subplots in the 1-ha permanent plot.

2. 연구방법

2.1. 현장 조사

현장 조사는 2005년 5월부터 2023년 5월까지 진행되었으며, 크게 4차례에 걸쳐 이루어졌다. 1차 조사 기간은 2005년부터 2008년까지로 4년에 걸쳐 모든 소방형구에 대한 입지요인 조사, 매목조사, 그리고 교목성 수종의 유목 조사를 실시하였다. 2차 조사 기간은 2009년부터 2013년까지로 5년에 걸쳐 모든 소방형구에 대한 매목조사를 실시하였다. 3차 조사 기간은 2015년부터 2017년까지로 3년에 걸쳐 13개의 방형구를 대상으로 매목조사를 실시하였다. 4차 조사 기간은 2021년부터 2023년까지로, 2021년에는 모든 방형구를 대상으로 매목조사를 실시하였으며, 2022년과 2023년에는 모든 방형구를 대상으로 교목성 수종의 유목 조사를 실시하였다. 조사 방법은 국립환경과학원에서 실시한 제1차 국가장기생태연구사업의 조사방법론(국립환경과학원, 2011)을 따랐으며, 현장 상황과 여건에 맞게 일부 조정하여 실시하였다. 목본의 동정은 김진석과 김태영(2018)과 장진성 등(2012)을, 수목의 학명은 장진성 등(2012)과 국가표준식물목록(국립수목원, 2023)을 참고하였다.

2.1.1. 입지요인 조사

모든 소방형구를 대상으로 GARMIN 社의 GPSMAP60CSx를 이용하여 GPS 좌표와 해발고도를 측정하였고, Suunto 社의 나침반과 클리노미터(Suunto tandem, Swiss)를 이용하여 소방형구의 사면향과 사면 경사를 측정하였다. 또한 Trimble 社의 R4s GNSS 수신기를 이용해 영구 방형구 네 모서리의 GPS 좌표를 획득하였다.

암석 노출도와 조릿대 피도, 그리고 낙엽층 피도는 목측으로 조사하여 백분율로 기록하였으며, 토심과 낙엽층의 깊이는 절척을 이용해 임의로 5곳을 측정한 후, 이를 평균 내어 기록하였다. 또한 소방형구의 임상 특

성을 기록하기 위해 전석지 계곡, 건천, 사면으로 지형을 구분하여 소방형구의 모식도 위에 그림으로 그려 기록하였다. 건천은 육안으로 물이 흐르는 것이 확인되거나, 바닥으로 물이 흐르는 소리가 확인되었을 경우 건천으로 분류하였다. 지형 요소는 아니지만 목본 발달과 생장에 영향이 큰 조릿대 출현지와 덩굴류가 우점하는 지역도 소방형구의 지형 모식도 위에 함께 기록하였다.

2.1.2. 매목조사

1차 조사에서는 영구 방형구 내 고사목을 포함한 모든 흉고직경 (Diameter at Breast Height, DBH) 2.5cm 이상의 목본을 대상으로 목본의 종명, 생육 형태, 소방형구 내 위치, 흉고직경, 수고 등을 조사하였다. 그리고 지표면으로부터 1.3m 상단의 남쪽으로 수목의 번호를 적은 알루미늄 번호표를 부착하였다.

목본의 생육 형태는 아래와 같이 살아있는 목본과 고사한 목본을 구분하여 기록하였다.

AS : Standing alive, 생육 입목

AB : Broken alive, 생육, 본 줄기 부러짐

AL : Leaning alive, 생육, 기울어 자람

AF : Fallen/prone alive, 생육, 지표면에 쓰러져 자람

AD : Standing alive with dead top, 생육, 정단부만 고사

DS : Standing dead, 고사 입목

DB : Broken dead, 고사, 줄기가 부러짐

DL : Leaning dead, 고사, 기울어짐

DF : Fallen/prone dead, 고사, 도목

소방형구 내의 목본의 위치는 소방형구 내의 남서쪽 모서리를 원점으로 하여 원점으로부터 동쪽으로의 거리와 북쪽으로의 거리를 m 단위로 하

여 소수점 첫 번째 자리까지 기록하였다.

흉고직경은 임분 바닥으로부터 1.3m 높이의 직경을 줄자로 측정하였으며, 2.5cm 이상의 줄기가 2개 이상이면 2.5cm 이상의 모든 줄기의 흉고직경을 측정하여 기록하였다.

수고는 Haglof 사의 VERTEX IV Hypsometer를 이용하여 수목별로 가장 높은 나뭇가지의 수직높이를 측정하였다.

2차 조사부터는 번호표를 부착한 목본을 대상으로 번호표가 부착된 지점에서의 흉고직경과 생육 형태를 재조사하고, 조사기준(흉고직경 2.5cm 이상)을 만족한 새로운 목본은 새 번호표를 부착한 후, 위치, 생육 형태, 흉고직경, 수고를 조사하여 기록하였다.

2.1.3. 유목 조사

흉고직경이 2.5cm 미만이며 수고는 50cm 이상인 개체를 유목으로 구분하고 이 중 교목성 수종으로 동정된 개체를 대상으로 소방형구 내 위치와 개체수, 높이, 생육 형태를 조사하여 기록하였다. 쇠물푸레나무는 아교목성 수종이나 중요도와 유목의 개체수를 고려하여 조사 대상에 포함하였다.

2.2. 기상 자료

2.2.1. 자동기상관측장치(AWS)

기상자료개방포털을 통해 조사지역인 임결령으로부터 서쪽으로 약 4km 떨어진 곳에 있는 성삼재에 설치된 자동기상관측장치(Automatic Weather Station, AWS)에 기록된 기상 자료를 수집하였다.

성삼재에 2002년 6월 27일 설치된 AWS의 좌표는 WGS 84 좌표계 기준 N 35° 18' 24.23" E 127° 30' 38.84" 이며 해발고도 1,088m에 위치하고 있다. 조사지역인 임결령으로부터 인접한 3개의 AWS(성삼재, 피아골,

뱀사골) 중 조사지역이 속하여 있는 주 능선인 노고단-천왕봉 능선과 거리와 해발고도가 가장 인접하여 조사지역의 기상을 나타내기에 가장 적합한 지점이라고 판단하였다.

수집한 항목으로는 일 단위의 평균 대기 온도(°C), 최저 대기 온도(°C), 최고 대기 온도(°C), 강수량(mm), 평균 풍속(m/s), 최대 순간 풍속(m/s), 최대 순간 풍속 풍향(°)이며, 2003년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지의 기상 자료를 수집하여 분석에 이용하였다.

2.2.2. 연구대상지 기상 측정

연구대상지의 기상을 직접 측정하기 위해 영구 방형구 내 간이기상정보 수집장치인 Onset 社의 HOBO를 2개 설치하여 2006년 6월 28일부터 2017년 8월 17일까지의 대기 온도와 대기 습도(%), 그리고 2021년 10월 1일부터 2022년 10월 23일까지의 대기 온도, 대기 습도, 토양 온도(°C), 토양수분함량(m^3/m^3)을 조사하였다.

측정 항목인 대기 온도와 대기 습도는 Onset 社의 U23-001A 온습도 센서를 이용하여 측정하였으며, 토양 온도와 토양수분함량은 Onset 社의 S-TMB-M002 온도 센서와 S-SMC-M005 토양 수분 센서를 이용하여 측정하였다. 대기 온도 및 대기 습도는 지표면에서 1m 높이에서 측정하였고, 토양 온도 및 토양수분함량은 토양 깊이 5cm 지점에서 측정하였다. 기상 정보는 30분 간격으로 저장하였으며, 이를 종합하여 일별로 평균하여 분석하였다.

대기 습도는 결측치와 이상치가 많아 분석 대상에서 제외하였으며, 토양 온도와 토양수분함량 자료는 수집 기간이 짧아 본 연구에서는 분석에서 제외하였다.

2개의 온도 센서로부터 수집된 일평균 대기 온도는 결측치 및 이상치를 제외한 후 평균을 내어 사용하였으며, 2개의 온도 센서 중 1개의 자료만 있을 경우 그 자료를 해당 일의 평균 기온으로 사용하였다.

2.2.3. 강풍과 태풍

구상나무 개체군에 교란으로 작용할 수 있는 강풍의 횡수와 세기를 조사하기 위해 성삼재 AWS의 순간 최대 풍속 자료를 이용하였다. 김현욱 등(2020)이 정의한 기준을 따라 일 순간 최대 풍속이 14m/s 이상 20m/s 미만인 바람을 강풍(Strong wind), 일 순간 최대 풍속이 20m/s 이상인 바람을 돌풍(Gust wind)으로 보고 강풍과 돌풍의 발생 시기를 파악하고 연도별 강풍 및 돌풍이 발생한 일수를 계산하였다.

또한, 기상자료개방포털을 통해 2005년부터 2022년간 발생한 태풍의 목록을 수집하였다. 태풍 목록은 태풍의 발생 시기와 소멸 시기, 영향도를 포함하고 있으며 태풍의 영향도는 우리나라에 아무런 영향도 끼치지 않은 ‘없음’ 과 우리나라에 직접적인 영향을 끼친 ‘직접영향’, 그리고 우리나라에 상륙한 ‘상륙’ 으로 구분된다. 연도별로 태풍의 영향도가 ‘직접영향’ 또는 ‘상륙’ 을 기록한 태풍의 수와 시기를 파악하고 성삼재 AWS의 강풍 자료와 비교하였다.

2.3. 자료 분석

구상나무 개체군의 동태를 파악하기 위해서 조사 시기에 따른 연구대상지의 임분 구조의 변화, 그리고 구상나무의 개체수 변화와 생육 형태 변화에 대한 분석을 실시하였다.

2.3.1. 임분 구조

2.3.1.1. 수종 구성

흉고직경 2.5cm 이상의 목본을 대상으로 Curtis and McIntosh(1951)의 방법을 이용하여 종 중요도(IV: Importance value)를 계산한 후, 조사 시기별 종 중요도의 변화를 확인하였다. 종 중요도는 상대밀도(RD), 상대피

도(RC), 상대빈도(RF) 값을 이용하여 계산하였으며 상대피도는 흉고단면적을 이용하여 계산하였다.

$$RD(\%) = \frac{\text{Density for a species}}{\text{Total density for all species}} \times 100$$

$$RC(\%) = \frac{\text{Basal area for a species}}{\text{Total basal area for all species}} \times 100$$

$$RF(\%) = \frac{\text{Frequency for a species}}{\text{Total frequency for all species}} \times 100$$

$$IV(\%) = \frac{1}{3}(RD + RC + RF)$$

목본 종의 종 다양성지수 H' (Shannon-Weaver, 1949), 종 균등도 지수 J' (Pielou, 1969), 우점도 지수 C (Simpson, 1949)는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$H' = -\sum p_i \log p_i, p_i = \frac{n_i}{N}$$

$$H'_{\max} = \ln S$$

$$J' = H' / H'_{\max}$$

$$C = \sum (n_i / N)^2$$

여기서 n_i 는 표본에서의 종 i 의 개체수, N 은 모든 종의 총 개체수이며, S 는 출현한 종의 수를 나타낸다.

2.3.1.2. 수고 분포

수고는 살아있는 목본을 대상으로 3m 간격으로 3m 미만, 3~6m, 6~9m, 9~12m, 12~15m, 15~18m, 18~21m, 21m 이상까지 총 8개의 수고급으로 분류하였다. 1ha 크기의 영구 방형구 내의 중요도가 높은 상위 10개 수

종을 선정하여 각 수고급별 밀도를 계산하였다. 수고 자료는 1차 조사 자료만을 분석하였다.

2.3.1.3. 흉고직경 분포

흉고직경은 살아있는 목본을 대상으로 2.5~5cm, 5~10cm, 10~15cm, 15~20cm, 20~25cm, 25~30cm, 30~35cm, 35~40cm, 40~45cm, 45~50cm, 50~55cm, 55~60cm, 60cm 이상 총 13개의 직경급으로 분류하여 정리하였다. 1ha 크기의 영구 방형구 내의 중요도가 높은 상위 10개 수종을 선정하여 직경급에 해당하는 임목의 본수를 각 조사 차수별로 나타내었다.

2.3.1.4. 공간 분포

연구대상지 내 수목의 공간적인 분포를 확인하기 위해 살아있는 구상나무의 위치를 흉고직경 2.5cm 이상 10cm 미만, 10cm 이상 30cm 미만, 30cm 이상으로 나누어 표시하였다. 또한 중요도가 높은 교목성 수종인 신갈나무(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), 물들메나무, 잣나무(*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.)는 흉고직경 2.5cm 이상의 개체 위치를 모두 표시하였다. 그 외의 수종도 흉고직경이 10cm 이상인 경우 위치를 표시하였다.

2차 조사와 4차 조사의 공간 분포에서 생육 형태가 고사로 변동된 것이 확인된 개체의 경우, 구상나무는 흉고직경 2.5cm 이상 10cm 미만, 10cm 이상 30cm 미만, 30cm 이상으로 나누고, 구상나무 외의 수종은 흉고직경 10cm 이상의 개체만을 표시하였다.

중요도가 높은 상위 10개 수종의 연구대상지 내 공간적인 분포 범위를 파악하기 위해 R 4.1.3의 spatstat 패키지를 이용해 Kernel Intensity Estimation을 실시하였다(Diggle, 1985). 한 점 x 에서의 intensity $\lambda(x)$ 는 x 를 중심으로 한, 정해진 크기의 원 안에 포함되는 점들의 개수를 원의

면적으로 나눈 값으로, Kernel Intensity Estimation은 관찰을 통해 얻어낸 자료를 이용해 Kernel 함수를 적용하여 임의의 지점에 점이 나타날 분포 확률 밀도를 나타내는 비모수적인 방법이다. Kernel Intensity Estimation에 사용되는 Kernel 함수 중 본 연구에서는 Stoyan and Stoyan(1994)의 Epanecnikov kernel 함수를 이용하였으며 그 식은 아래와 같다.

$$e_h(d) = \begin{cases} \frac{3}{4h} \left(1 - \frac{d^2}{h^2}\right) & -h \leq d \leq h \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

위 식에서 e_h 은 kernel weight, d 는 원 안의 임의의 점으로부터 원의 중심까지의 거리, h 는 원의 반지름을 나타낸다.

구상나무 개체군의 공간 분포 패턴(spatial point pattern)을 분석하기 위해 Ripley's K 함수를 수정한 Besag's L 함수, 그리고 pair-correlation 함수 $g(r)$ 을 사용하였다(Wiegand and Moloney, 2004; Wiegand et al., 2007; Wiegand and Moloney, 2014). Ripley's K 함수는 조사구(Window) 면적 안에서 임의의 점(Point)을 기준으로 반경이 r (m)인 원 안에 있는 모든 점의 개수를 구하고, r 를 일정한 간격으로 늘려가며 이를 반복하여 $K(r)$ 값을 산출한다. 여기서 $K(r)$ 는 아래의 식으로 계산한다.

$$K(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n I_r(u_{ij})$$

n 은 조사구 내 전체 점의 수이며 A 는 조사구의 크기(m^2)이다. u_{ij} 는 i 번째 점과 j 번째 점 사이의 거리로 $I_r(u_{ij})$ 는 u_{ij} 가 반경 r 보다 작거나 같으면 1, r 보다 크면 0을 부여한다.

그리고 반경에 따라 산출된 $K(r)$ 값과 모든 위치에서 점이 나타날 확률이 동일한(Homogeneous) 임의 분포 패턴을 가정하거나(Completed

Spatial Randomness) 혹은 위치에 따라 점이 나타날 확률이 동일하지 않은(Heterogeneous) 상황을 고려한 Null model에서 산출된 $K(r)$ 값을 비교하여 공간 분포 패턴을 해석한다. Null model에서의 $K(r)$ 값의 신뢰구간(confidence envelope)을 구하기 위해 Monte Carlo simulation을 이용하여, null model의 생성을 반복하고, 이렇게 구해진 신뢰구간과 $K(r)$ 값을 비교하여 $K(r)$ 이 신뢰구간 안에 존재하면 임의 분포(random), 신뢰구간보다 높으면 집중 분포(clumped), 신뢰구간보다 낮으면 균일 분포(regular)한다고 해석한다.

개체들이 임의 분포할 경우 $K(r)$ 은 반경이 r 인 원의 면적과 같으므로 Besag' L 함수는 임의 분포 상황에서 $L(r)$ 의 값이 0이 되도록 이를 수정한 함수이다. 또한 $K(r)$ 과 $L(r)$ 은 원의 반경 r 이 커질수록 해당 원 안에 포함되는 점 개수가 점점 증가하여 축적(accumulation)되는 특징이 있으므로 pair-correlation 함수 $g(r)$ 은 원의 중심으로부터 거리 r 만큼 떨어진 점의 개수만을 고려하도록 수정한 함수이다. 따라서 임의 분포 상황에서 $g(r)$ 의 값은 1이 된다. $L(r)$ 과 $g(r)$ 은 각각 아래와 같이 구한다.

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r$$

$$g(r) = \frac{dK(r)}{dr} / 2\pi r$$

조사구의 경계선 때문에 생기는 문제를 보정하기 위해(edge correction) Wiegand and Moloney(2004)의 WM 계수를 적용하였으며 이는 원의 반경 r 로 분리된 모든 점의 쌍에 동일한 가중치를 부여하는 계수로 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$w(r) = 2\pi r dr / \bar{v}(r)$$

반경 r , 너비 dr 을 가진 조사구 내의 모든 원의 면적을 평균 면적 $\bar{v}(r)$ 로 나누어 계산하여 모든 점의 쌍에 동일한 가중치 $w(r)$ 이 부여된다.

본 연구에서는 1차 조사 시기 구상나무의 공간 좌표를 이용하여 구상나무 개체군의 공간 분포 패턴의 일변량 분석을 실시하였으며, 분석에는 ‘programita’ 프로그램을 이용하였다. Null model은 구상나무의 위치가 임의 분포하는 것으로 가정하는 경우와 구상나무의 위치가 Kernel intensity estimation을 통해 구한 intensity function을 따르는 것으로 가정하는 경우를 각각 homogeneous Poisson 방법과 heterogeneous Poisson 방법으로 반복하여 생성하였다. 본 연구에서는 95%의 신뢰수준의 신뢰구간을 구하기 위해 99회 반복한 후 5번째로 높은 값과 낮은 값을 이용하였다.

2.3.2. 개체군 동태

2.3.2.1. 고사율과 이입률

중요도가 높은 상위 10개 수종을 대상으로 각 조사 차수별로 살아있는 개체(AS, AL, AB, AF, AD)의 개체수(생존목)와 직전 조사 차수에서는 살아있었으나 해당 조사 차수에서는 고사한 개체수(고사목), 그리고 해당 조사 차수에서 새로 흉고직경 2.5cm 이상으로 자라 목본으로 추가된 개체수(진계목)를 파악하였다. 그 후, 각 조사 차수별 생존목, 고사목, 진계목의 수를 이용해 아래의 식으로 각 수종의 연간 고사율(m)과 이입률(r)을 계산하였다(Sheil *et al.*, 1995). 소방형구별로 직전 조사와 해당 조사간의 기간이 상이하므로 계산이 쉽도록 각 차수의 기간을 5년으로 동일하게 하여 계산하였다.

$$m(\%) = \{1 - (N_t / N_0)^{1/t}\} \times 100$$

N_t = 이전 조사에서 살아있는 줄기 중 해당 조사에서 살아있는 줄기 수

N_0 = 이전 조사에서 살아있는 줄기 수

t = 측정사이의 기간

$$r(\%) = \{1 - (1 - (N_t / N_0)^{1/t})\} \times 100$$

N_t = 해당 조사에서 추가된 줄기 수

N_0 = 이전 조사에서 살아있는 줄기 수

t = 측정사이의 기간

2.3.2.2. 개체군 성장 모델

3차 조사를 실시한 13개 소방형구의 구상나무를 대상으로 5cm 간격으로 직경급을 구분하여 이전 차수에서 다음 차수로 넘어갈 때의 직경급 내 생존율, 고사율, 다음 직경급으로의 성장율, 그리고 진계성장률을 아래의 식에 대입하여 성장 매트릭스를 고안하고, 개체군 성장 모델을 만들어 각 조사차수별 성장률에 따른 구상나무 개체군의 크기를 예측하였다(Buongiorno and Michie, 1980).

$$\begin{aligned} y_{1t+1} &= a_1 y_{1t} + R_t \\ y_{2t+1} &= b_1 y_{1t} + a_2 y_{2t} \\ y_{3t+1} &= \quad \quad b_2 y_{2t} + a_3 y_{3t} \\ &\quad \quad \quad \vdots \\ y_{nt+1} &= b_{(n-1)t} y_{(n-1)t} + a_n y_{nt} \end{aligned}$$

n 은 직경급의 수이며, y_{it} 는 시간 t 에서 i 직경급에 속하는 목본의 개체수를 뜻하며, a_i 는 시간 t 에서 i 직경급에 속하는 개체 중 시간 $t+1$ 에서도 살아남아 i 직경급에 속하는 개체의 수를 뜻한다. b_i 는 시간 t 에서 i 직경급에 속하는 개체 중 시간 $t+1$ 에서는 $i+1$ 직경급에 속하는 개체의 수를 뜻한다. R_i 는 시간 t 에서 시간 $t+1$ 로 넘어가는 동안 유입된 어린 개체의 수이며 본 연구에서는 아래와 같은 식으로 구하였다.

$$R_t = \frac{r_0}{N_0} \times N_t$$

r_0 는 해당 차수에서 새로 유입된 진계목의 수이며, N_0 은 해당 차수에서 살아있는 목본의 개체수, N_t 는 시간 t 에서 살아있는 목본의 개체수를 뜻한다.

이를 통해 도출된 임분 성장 모델을 각 조사 차수의 생존목을 초기 조건으로 두고 시간 t 의 단위를 5년으로 하여 100년 후까지의 개체수를 예측하고, 다음 조사 차수의 실제 생존목 수와 비교하였다.

2.3.3. 고사 양상 및 고사목 동태

구상나무의 조사 시기에 따른 고사 양상을 파악하기 위해 이전 조사에서는 살아있었으나 다음 조사에서는 고사한 구상나무를 대상으로 고사 형태를 조사하였다. 고사 형태는 해당 시기에 고사한 목본의 생육 형태(DS, DL, DB, DF)로 나타내었으며, 고사 형태별 비율을 분석하였다.

구상나무 고사목의 동태를 파악하기 위해 이전 조사 시기에 남아있던 구상나무 고사목의 고사 형태를 다음 조사 시기의 고사 형태와 비교하여 변화를 조사하였다.

2.3.4. 기상 자료 분석

2.3.4.1 기상 자료 보간

연구대상지의 대기 온도 자료는 2006년 6월 말부터 2022년 10월까지 수집하였고, 2014년 말부터 2015년 중반, 그리고 2017년 중반부터 2021년 말까지의 대기 온도 자료는 수집되지 않았다. 대기 온도 자료가 수집되지 않은 기간의 연구대상지의 대기 온도를 추정하기 위해 성삼재

AWS에서 측정된 일 평균 대기 온도와 연구대상지에서 측정된 평균 대기 온도 간의 상관관계 분석과 선형 회귀 분석을 실시하였다. 이를 통해 얻은 관계식을 사용하여 성삼재 AWS 자료를 기반으로 연구대상지 기상 자료의 결측치를 예측하고 대체하였다.

두 기상 자료 간의 선형 회귀 분석은 R 4.1.3의 stats 패키지와 caret 패키지를 이용하여 실시하였다. 선형 회귀 모델의 검증에 위해 기상 자료를 8:2의 비율로 훈련 자료와 검증 자료로 나누고, 훈련 자료를 이용해 선형 회귀 모델을 구성한 후, 검증 자료를 활용하여 예측값과 실제값의 차이를 MSE(Mean Squared Error), RMSE(Root Mean Squared Error), R2 값으로 평가하였다.

2.3.4.2 대기 온도 추세

20년간의 대기 온도 추세를 보기 위해 2.3.4.1을 통해 얻은 2003년부터 2022년까지 20년간의 월평균 대기 온도와 각 연도의 월평균 대기 온도를 비교하고, 월평균 대기 온도의 연도에 따른 변화를 LOESS 방식을 이용하여 분석하였으며, 추세선은 Excel의 추세선 기능을 이용하여 R제공값과 함께 나타내었다.

상반기의 대기 온도 추세를 자세히 확인하기 위해 연중일수(Day of Year, DOY)단위로 1일부터 150일까지를 10일 단위로 15개의 구간으로 나누어 열흘간의 평균대기 온도를 비교하고, LOESS 방식을 이용하여 시기 별 온도 변화를 분석하였다.

2.3.4.3 봄철 강수량 비교

2003년부터 2022년까지 성삼재 AWS에 기록된 월 강수량 자료를 이용하여 20년간의 봄철(3월~6월) 평균 월 강수량과 각 해의 월 강수량을 비교하여 20년 평균보다 강수량이 적은 시기를 확인하였다.

제 3 장 결 과

1. 입지 특성

연구대상지의 해발고도 범위는 1,264~1,320m이며 평균고도는 1,294m이다. 사면의 경사 방향은 대체로 북서향을 나타냈으며, 사면의 경사는 6~48%로, 평균 28%의 경사도를 나타내었다. 조사지역의 지형은 계곡과 사면으로 이루어져 있었다(Figure 4). 25개의 소방형구 중 연구대상지의 남동쪽과 북서쪽을 가로지르는 중심부의 14개의 소방형구는 계곡 지형이며 암석 노출도가 80%가 넘는 전석지였다. 특히 일부 전석지 계곡 지형의 소방형구에서는 돌 밑으로 물이 흐르는 소리가 들리거나 개울이 있는 곳도 있었다. 반면, 사면 지형의 소방형구는 연구대상지의 남서쪽과 북동쪽에 자리 잡고 있으며 대부분 조릿대의 피복도가 80% 이상이었다. 낙엽 피복도는 대체로 높게 나타났으나 일부 경사가 심한 곳에서는 낙엽 피복도가 낮게 나타났다. 토심은 지형에 따라 암석과 일부 낙엽 유기물로 이루어져 토심의 측정이 불가능한 소방형구도 있었으나 20cm 이상의 토심을 지닌 소방형구도 있었다(Table 1).

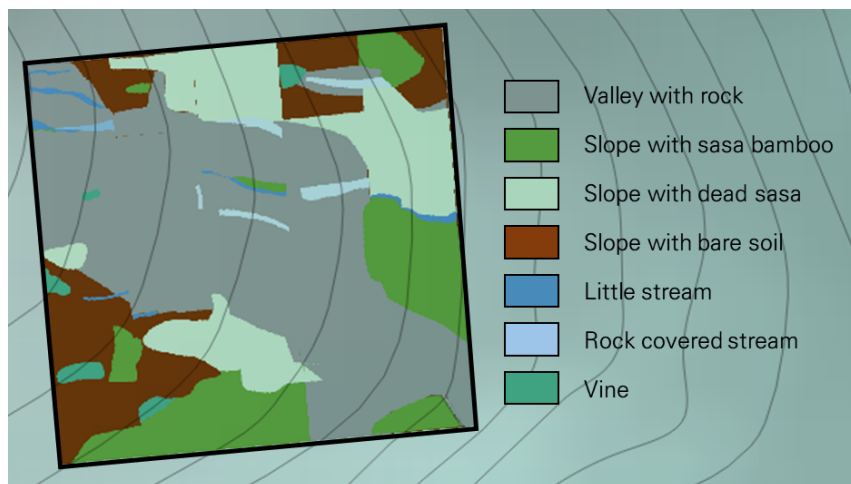


Figure 4. Topographic profile with vines and sasa vegetation cover of the study site.



Figure 5. Photographs from (a) the valley and (b) the slope in the study site.

Table 1. Site description of the subplots.

Subplot	1	2	3	4	5
Elevation (m)	1317	1277	1290	1259	1283
Aspect (°)	330	320	280	290	270
Slope (%)	40	10	11	15	34
Topography	Slope	Valley	Valley	Valley	Slope
Rock coverage (%)	1	75	99	99	8
Sasa bamboo coverage (%)	99	50	3	5	95
Litter coverage (%)	60	60	70	N/A	95
Litter depth (cm)	2	3	0.5	N/A	2.5
Soil depth (cm)	N/A	15	1	N/A	17
Subplot	6	7	8	9	10
Elevation (m)	1318	1295	1308	1306	1299
Aspect (°)	320	314	280	270	260
Slope (%)	48	35	31	25	37
Topography	Mid-slope	Mid-slope	Valley	Valley	Slope
Rock coverage (%)	90	99	95	99	20
Sasa bamboo coverage (%)	1	18	6	38	0
Litter coverage (%)	80	10	30	80	N/A
Litter depth (cm)	1.5	0.5	0.5	2	3.5
Soil depth (cm)	10	3	2	4	5
Subplot	11	12	13	14	15
Elevation (m)	1320	1305	1317	1301	1300
Aspect (°)	300	284	276	270	280
Slope (%)	43	30	35	22	19
Topography	Mid-Slope	Upper slope	Mid-slope	Upper slope	Upper slope
Rock coverage (%)	99	100	95	50	25
Sasa bamboo coverage (%)	45	45	85	100	36
Litter coverage (%)	0.7	80	50-80	100	95
Litter depth (cm)	2	2	2-3	1-2	2
Soil depth (cm)	N/A	5-20	N/A	5-14	13

Table 1. (*Continued*).

Subplot	16	17	18	19	20
Elevation(m)	1264	1289	1286	1270	1267
Aspect(°)	350	310	300	300	290
Slope(%)	30	30	30	23	31
Topography	Slope	Slope	Slope	Slope	Slope
Rock coverage(%)	0	5	80	99	40
Sasa bamboo coverage(%)	25	10	10	0	30
Litter coverage(%)	N/A	40	70	40	60
Litter depth(cm)	3	1.5	1	1	2.5
Soil depth(cm)	26	26	7	16	9
Subplot	21	22	23	24	25
Elevation(m)	1301	1298	1295	1295	1292
Aspect(°)	345	340	290	290	270
Slope(%)	40	6	24	15.2	23
Topography	Slope	Slope	Valley	Valley	Valley
Rock coverage(%)	1	20	100	90	80
Sasa bamboo coverage(%)	90	30	3	25	45
Litter coverage(%)	100	100	N/A	N/A	50
Litter depth(cm)	1.5	1.5	1	1	2
Soil depth(cm)	20	20	4	11	10

2. 임분 구조

2.1. 수종 구성

연구대상지에서 확인된 흉고직경 2.5cm 이상 목본의 종 수는 1차 조사 시기(2005-2008)에는 40종, 2차 조사 시기(2009-2013)에는 38종, 4차 조사 시기(2021-2023)에는 39종이었다. Shannon-Weaver의 종 다양성 지수 H' 은 1차 조사 시기에서부터 4차 조사 시기까지 꾸준히 증가(1차 2.40, 2차 2.41, 4차 2.54) 하는 양상을 보였다. 종 균등도 지수 J' 역시 1차 조사에서는 0.45의 값을 나타냈지만 2차 조사에서는 0.46, 4차 조사에서는 0.48의 값을 나타내며 소폭 상승한 것으로 나타났다. 우점도 지수 C 는 1차 조사에는 1.21의 값을 나타내었고 이후 2차 조사에는 1.20, 4차 조사에는 1.16의 값을 나타내며 점차 감소하는 모습을 보였다(Table 2).

중요도가 가장 높은 수종은 구상나무로 조사 시기별 종 중요도가 1차 28.9%, 2차 27.7%, 4차 25.1%로 나타났으며, 전 기간동안 밀도, 흉고단면적, 빈도가 임분에서 가장 높았다(Table 3).

구상나무 다음으로 중요도가 높은 수종은 신갈나무로 조사 시기별 종 중요도는 1차 16.0%, 2차 16.6%, 4차 16.0%로 나타났으며 밀도, 흉고단면적, 빈도 모두 구상나무 다음으로 높은 수치를 보였다.

그 외로 중요도가 높은 수종은 조사 시기별로 순서의 차이는 있으나 쇠물푸레나무, 당단풍나무, 철쭉, 물들메나무, 잣나무, 고로쇠나무(*Acer pictum* Thunb. var. *mono* (Maxim.) Maxim. ex Franch.), 피나무(*Tilia amurensis* Rupr.), 산딸나무(*Cornus kousa* Bürger ex Hance) 8종이 공통적으로 중요도가 높게 나타났다.

목본의 밀도는 대부분의 종이 시간이 지남에 따라 감소하는 추세를 보였다. 1차 조사에서 1ha 내 1,244본이었던 연구대상지의 목본 밀도는 2차 조사에서는 1,203본으로 밀도가 약 3% 감소하였으며, 4차 조사에서는 1,015본으로 약 16% 감소하였다. 특히 구상나무의 밀도는 1차 조사 시 459본/ha에서 4차 조사 시 317본/ha로 감소하여 31%가량 감소하였으며,

구상나무의 밀도 감소가 전체 수목의 밀도 감소의 과반을 차지하였다. 반면 당단풍나무, 노린재나무(*Symplocos sawafutagi* Nagam.), 함박꽃나무 (*Magnolia sieboldii* K.Koch) 등 일부 관목성, 아교목성 수종은 밀도는 소폭 증가하였다.

흉고단면적은 1차 조사에 비하여 2차 조사에 잣나무, 까치박달, 노각나무 등을 제외하고 대부분 증가하였으나 4차 조사에는 구상나무, 신갈나무, 쇠물푸레나무, 고로쇠나무 등 주요 수종에서도 흉고단면적의 합이 감소하는 경향을 보였다.

구상나무의 중요도는 4차 조사 시기까지 지속적으로 감소하여 1차 조사 시기에 비해 4차 조사 시기의 중요도가 약 3.8% 감소하였으며, 신갈나무와 쇠물푸레나무의 중요도는 2차 조사 시기에서는 증가하다가 4차 조사 시기에 감소하여 1차 조사 시기와 비슷한 중요도를 나타내었다. 한편 중요도 상위 10개의 수종 중 당단풍나무, 물들메나무, 피나무 3종은 조사 기간 동안 꾸준히 중요도가 증가한 것으로 나타났다.

Table 2. Species diversity index of the study site.

	1 st (2005-2008)	2 nd (2009-2013)	4 th (2021-2023)
Species richness	40	38	39
H'	2.40	2.41	2.54
H' _{max}	5.32	5.25	5.29
J'	0.45	0.46	0.48
C	1.21	1.20	1.16

Table 3. Importance value (IV) of woody species in the study site.

Korean Name	Scientific Name	Density (tree/ha)			BA (m ² /ha)			Frequency (plot/ha)			Importance Value (%)		
		1st	2nd	4th	1st	2nd	4th	1st	2nd	4th	1st	2nd	4th
구상나무	<i>Abies koreana</i> E.H.Wilson	459	439	317	12.58	12.97	11.83	25	25	25	28.89	27.65	25.07
신갈나무	<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	129	126	110	8.84	10.63	9.80	25	24	23	16.00	16.60	16.04
쇠물푸레나무	<i>Fraxinus sieboldiana</i> Blume	109	103	80	0.99	1.23	1.15	19	19	19	6.24	6.31	6.08
당단풍나무	<i>Acer pseudosieboldianum</i> (Pax) Kom.	93	96	98	0.97	1.32	1.53	20	20	21	5.91	6.32	7.29
철쭉	<i>Rhododendron schlippenbachii</i> Maxim.	107	100	86	0.23	0.27	0.23	15	15	15	4.89	4.82	4.88
물들메나무	<i>Fraxinus chiisanensis</i> Nakai	29	28	29	1.61	2.25	2.58	12	12	13	3.94	4.37	5.07
잣나무	<i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc.	31	30	26	1.17	1.11	1.26	14	14	13	3.76	3.58	3.67
고로쇠나무	<i>Acer pictum</i> Thunb. var. <i>mono</i> (Maxim.) Maxim. ex Franch.	35	32	29	0.78	0.80	0.72	14	14	14	3.44	3.33	3.37
피나무	<i>Tilia amurensis</i> Rupr.	39	39	38	0.71	0.84	1.19	13	13	13	3.35	3.44	4.01
산딸나무	<i>Cornus kousa</i> Bürger ex Hance	32	32	28	0.26	0.37	0.44	13	13	11	2.68	2.80	2.69
개회나무	<i>Syringa reticulata</i> (Blume) H.Hara	25	22	12	0.06	0.07	0.11	11	10	6	2.03	1.87	1.23
까치박달	<i>Carpinus cordata</i> Blume	21	20	19	0.32	0.20	0.27	9	9	9	1.97	1.82	1.98
노린재나무	<i>Symplocos sawafutagi</i> Nagam.	23	24	31	0.03	0.03	0.04	11	10	10	1.94	1.89	2.28
함박꽃나무	<i>Magnolia sieboldii</i> K.Koch	16	17	24	0.05	0.07	0.12	10	11	13	1.67	1.86	2.50
거제수나무	<i>Betula costata</i> Trautv.	11	11	11	0.46	0.51	0.63	7	7	7	1.62	1.63	1.84
산벚나무	<i>Prunus sargentii</i> Rehder	8	8	7	0.31	0.39	0.28	7	7	6	1.37	1.43	1.24
마가목	<i>Sorbus commixta</i> Hedl.	10	10	9	0.30	0.35	0.42	7	7	7	1.42	1.45	1.56

Table 3. (Continued).

Korean Name	Scientific Name	Density (tree/ha)			BA (m ² /ha)			Frequency (plot/ha)			Importance Value (%)		
		1st	2nd	4th	1st	2nd	4th	1st	2nd	4th	1st	2nd	4th
노각나무	<i>Stewartia koreana</i> Nakai ex Rehder	6	4	9	0.10	0.04	0.06	6	4	7	0.98	0.62	1.21
층층나무	<i>Cornus controversa</i> Hemsl.	5	6	6	0.19	0.20	0.23	5	6	6	0.93	1.08	1.16
부계꽃나무	<i>Acer ukurunduense</i> Trautv. & C.A.Mey.	6	6	7	0.07	0.10	0.12	5	5	6	0.82	0.86	1.08
대뺏집나무	<i>Ilex macropoda</i> Miq.	7	6	4	0.10	0.12	0.13	4	4	3	0.77	0.76	0.63
물참대	<i>Deutzia glabrata</i> Kom.	8	9	2	0.01	0.01	0.00	4	5	2	0.69	0.86	0.31
서어나무	<i>Carpinus laxiflora</i> (Siebold & Zucc.) Blume	5	5	5	0.04	0.04	0.06	4	4	4	0.65	0.66	0.71
야광나무	<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.	4	4	3	0.09	0.10	0.09	3	3	2	0.56	0.56	0.44
소나무	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	2	2	2	0.26	0.30	0.36	1	1	1	0.46	0.47	0.54
회나무	<i>Euonymus sachalinensis</i> (F.Schmidt) Maxim.	3	3	1	0.01	0.01	0.00	3	3	1	0.44	0.45	0.16
버들개회나무	<i>Syringa fauriei</i> H.Lév.	6	6	5	0.03	0.05	0.04	1	1	1	0.31	0.34	0.33
주목	<i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.	2	2	3	0.06	0.07	0.09	2	2	2	0.35	0.37	0.43
복장나무	<i>Acer mandshuricum</i> Maxim.	1	1	1	0.06	0.06	0.07	1	1	1	0.21	0.21	0.23
팔배나무	<i>Aria alnifolia</i> (Siebold & Zucc.) Decne.	1	1	1	0.03	0.04	0.05	1	1	1	0.18	0.18	0.20
청시닥나무	<i>Acer barbinerve</i> Maxim.	2	3	2	0.00	0.00	0.00	1	1	1	0.17	0.21	0.19
시닥나무	<i>Acer komarovii</i> Pojark.	1	1	1	0.02	0.02	0.00	1	1	1	0.17	0.17	0.16
음나무	<i>Kalopanax septemlobus</i> (Thunb.) Koidz.	1	1	2	0.01	0.01	0.03	1	1	2	0.15	0.16	0.34

Table 3. (Continued).

Korean Name	Scientific Name	Density (tree/ha)			BA (m ² /ha)			Frequency (plot/ha)			Importance Value (%)		
		1st	2nd	4th	1st	2nd	4th	1st	2nd	4th	1st	2nd	4th
좀갈매나무	<i>Rhamnus taquetii</i> (H.Lév. & Vaniot) H.Lév.	1	0	0	0.00	N/A	N/A	1	N/A	N/A	0.15	N/A	N/A
딱총나무	<i>Sambucus williamsii</i> Hance	1	0	0	0.00	N/A	N/A	1	N/A	N/A	0.15	N/A	N/A
물개암나무	<i>Corylus sieboldiana</i> Blume var. <i>mandshurica</i> (Maxim.) C.K.Schneid.	1	1	1	0.00	0.00	0.00	1	1	1	0.15	0.15	0.16
두릅나무	<i>Aralia elata</i> (Miq.) Seem.	1	2	2	0.00	0.01	0.01	1	2	2	0.15	0.30	0.32
생강나무	<i>Lindera obtusiloba</i> Blume	1	1	1	0.00	0.00	0.00	1	1	1	0.15	0.15	0.16
갈매나무	<i>Rhamnus davurica</i> Pall.	1	1		0.00	0.00	N/A	1	1	N/A	0.15	0.15	N/A
개암나무	<i>Corylus heterophylla</i> Fisch. ex Trautv.	1	1	1	0.00	0.00	0.00	1	1	1	0.15	0.15	0.16
물푸레나무	<i>Fraxinus rhynchophylla</i> Hance	0	0	1	N/A	N/A	0.00	N/A	N/A	1	0.00	0.00	0.16
수국	<i>Hydrangea macrophylla</i> (Thunb.) Ser.	0	0	1	N/A	N/A	0.00	N/A	N/A	1	0.00	0.00	0.16

2.2. 수고 분포

연구대상지의 수고 분포는 1차 조사 시기를 기준으로 3-6m 수고급에서 가장 높은 밀도를 보이는 역 J자형의 분포를 나타내었다(Figure 6). 모든 수고급에서 구상나무의 밀도가 높게 나타났으며, 상층을 차지하는 9m 이상의 수고급에서는 신갈나무가, 중층을 차지하는 6-9m의 수고급에서는 쇠물푸레나무가, 6m 미만의 수고급에서는 철쭉의 밀도가 높게 나타났다.

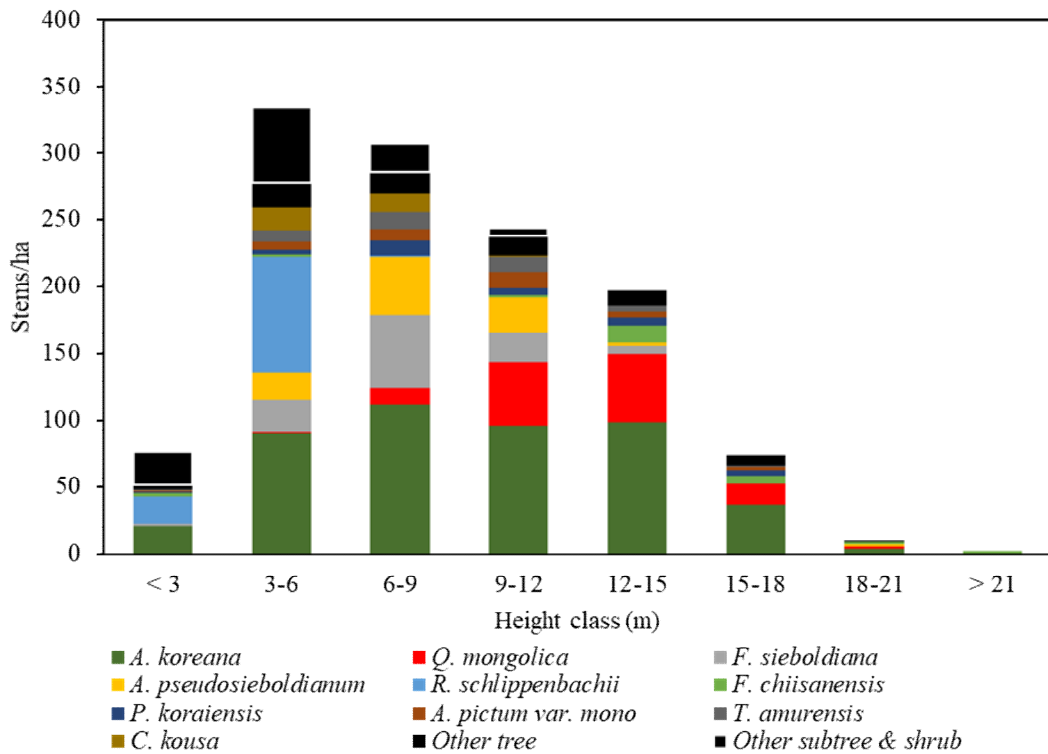


Figure 6. Height distribution of woody species in the study site in the 1st inventory (2005-2008).

2.3. 흉고직경 분포

연구대상지의 흉고직경 분포는 전체적으로 5-10cm 직경급에서 가장 높은 밀도를 보이며 직경이 커질수록 밀도가 낮아지는 역 J자형의 분포를 나타내었다(Figure 7). 흉고직경의 범위는 1차 조사 시기에서는 최대 71.6cm, 2차 조사 시기에서는 최대 70cm, 4차 조사 시기에서는 최대 72cm까지 분포하였다. 가장 높은 밀도를 나타낸 5-10cm 직경급의 밀도는 1차 조사 시기에서는 ha당 299본, 2차 조사 시기에서는 283본, 4차 조사 시기에서는 235본으로 나타났다.

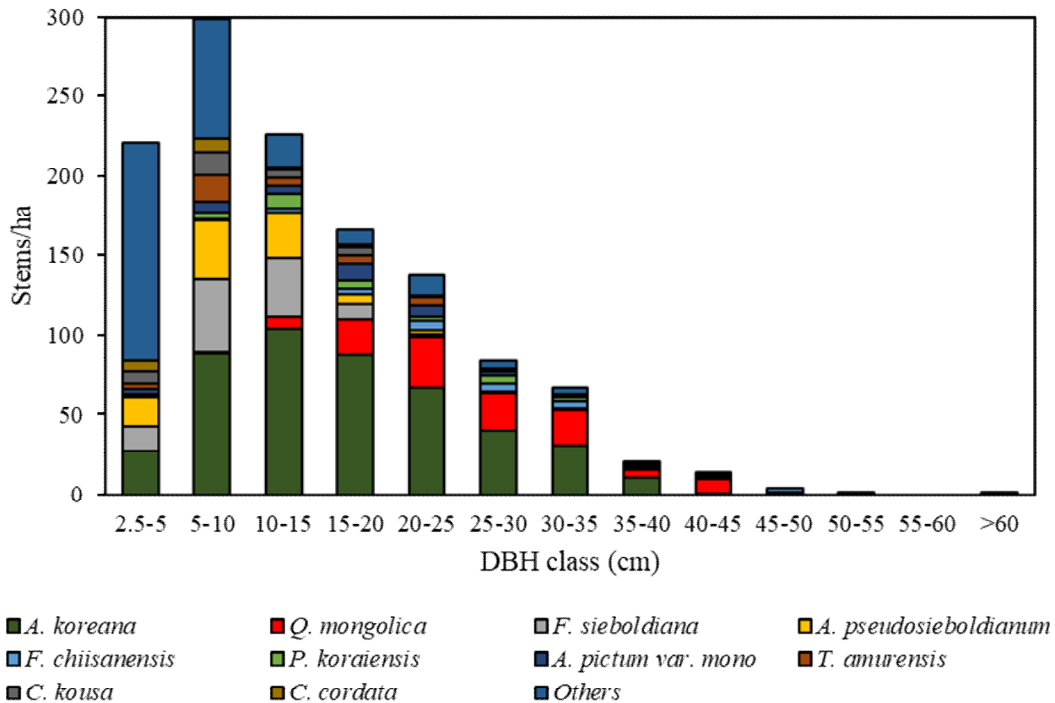


Figure 7. DBH distribution of woody species in the study site in the 1st inventory (2005-2008).

2차 조사 시기는 1차 조사 시기와 비교해 5-25cm 사이의 직경급은 소폭 감소하였으나 25-30cm, 35cm 이상의 직경급에서는 밀도가 증가하였으며 특히 35-40cm 직경급은 ha당 21본에서 32본으로 증가하여 약 52%의 증가율을 보였다(Figure 8).

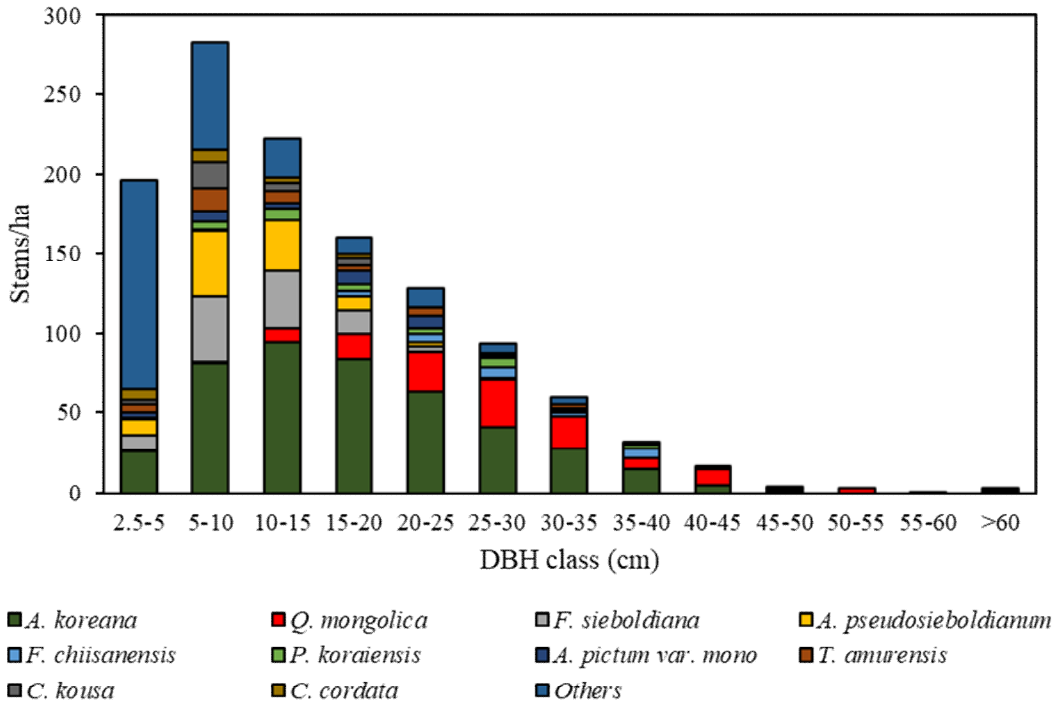


Figure 8. DBH distribution of woody species in the study site in the 2nd inventory (2009-2013).

4차 조사 시기는 2차 조사 시기에 비하여 2.5-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 20-25cm 직경급의 밀도가 각각 26.5%, 17.0%, 21.6%, 28.9%만큼 큰 폭으로 감소하였다. 한편 35-40cm 직경급은 32본에서 41본으로 약 28% 증가하였으며, 45-50cm, 50-55cm 직경급에서도 밀도가 증가하였다(Figure 9).

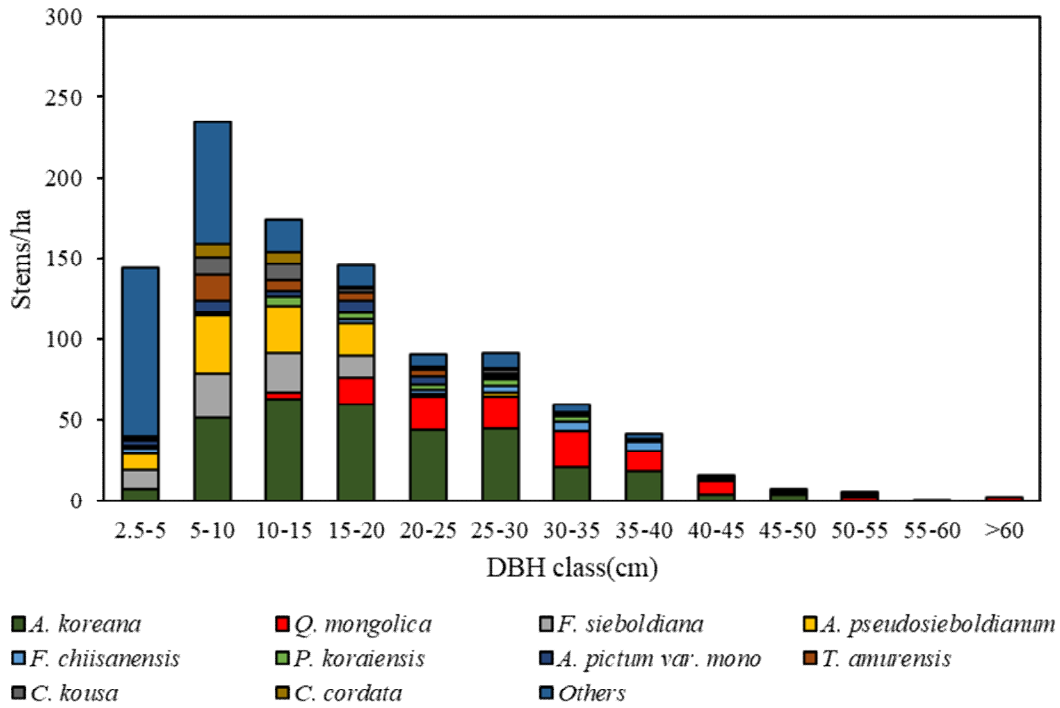


Figure 9. DBH distribution of woody species in the study site in the 4th inventory (2021-2023).

2.4 유목

1차 조사 결과, 구상나무, 잣나무, 물들메나무 순으로 유목의 수가 많았다(Figure 10). 구상나무의 유목은 ha당 42본이 확인되었으며, 그중 수고가 50-100cm인 유목의 수가 21본으로 가장 많았다. 잣나무는 ha당 38본의 유목이 조사되었고, 그 중 26본이 30-50cm의 수고를 보였다. 물들메나무의 유목은 ha당 21본이며 그 중 수고가 50-100cm인 유목의 수가 12본으로 가장 많았다. 그 외에도 주목, 음나무, 고로쇠나무 등의 유목이 확인되었다.

4차 조사 시 유목의 수가 가장 많은 수종은 잣나무와 쇠물푸레나무였으며 두 수종 모두 ha당 62본의 유목이 확인되었다. 구상나무의 유목은 ha당 36본, 물들메나무의 유목은 ha당 47본이 확인되었으며 그 외에도 함

박꽃나무, 주목, 음나무, 마가목, 당단풍나무 등의 유목이 확인되었다 (Figure 11).

1차 조사에서 확인된 유목의 생존 여부를 4차 조사에서 파악해본 결과, 4차 조사에서도 유목이 생존한 수종은 구상나무, 물들메나무, 잣나무, 주목, 음나무 총 5종이었다. 그중 물들메나무 유목은 20개체 중 14개체가 생존하고 1개체는 흉고직경 2.5cm 이상의 성목으로 성장하여 가장 높은 생존율을 보였다. 구상나무는 42개체의 유목 중 16개체가 생존하고 3개체가 성목으로 성장하였으며, 잣나무는 38개체 중 22개체가 생존하고 1개체가 성목으로 성장하였다(Figure 12).

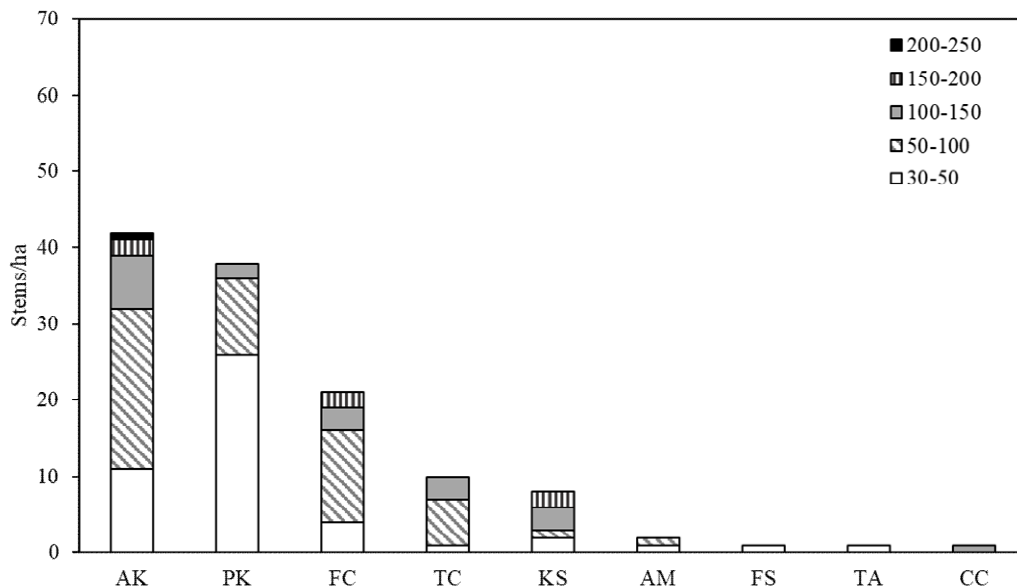


Figure 10. Density and height of saplings of tree species in the 1st inventory. AK: *Abies koreana*, PK: *Pinus koraiensis*, FC: *Fraxinus chiisanensis*, TC: *Taxus cuspidata*, KS: *Kalopanax septemlobus*, AM: *Acer pictum* var. *mono*, FS: *Fraxinus sieboldiana*, TA: *Tilia amurensis*, CC: *Cornus controversa*.

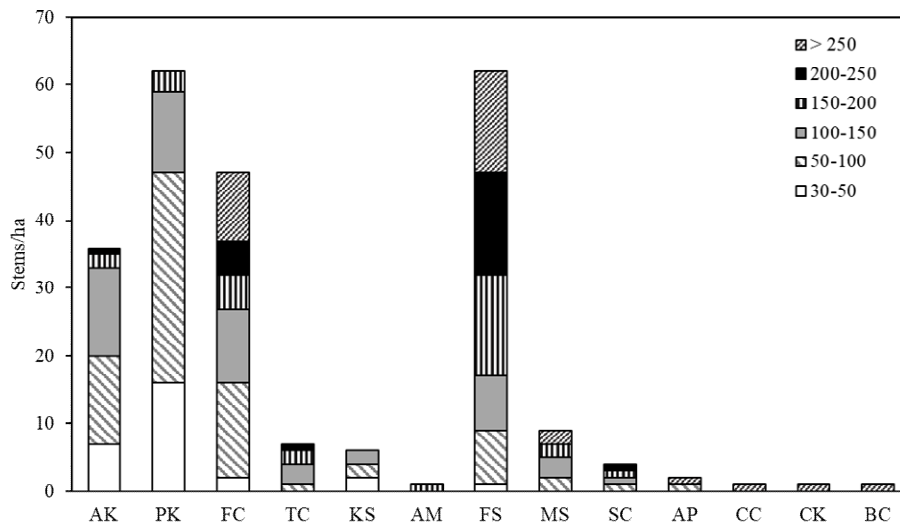


Figure 11. Density and height of saplings of tree species in the study site from 4th inventory. AK: *Abies koreana*, PK: *Pinus koraiensis*, FC: *Fraxinus chiisanensis*, TC: *Taxus cuspidata*, KS: *Kalopanax septemlobus*, AM: *Acer pictum* var. *mono*, FS: *Fraxinus sieboldiana*, MS: *Magnolia sieboldii*, SC: *Sorbus commixta*, CC: *Cornus controversa*, CK: *Cornus kousa*, BC: *Betula costata*.

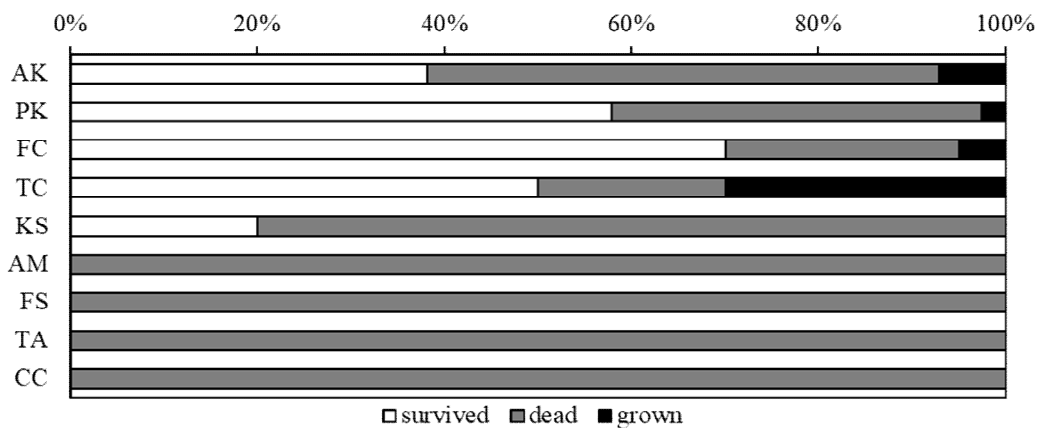


Figure 12. Survival rate of the saplings from 1st inventory to 4th inventory. AK: *Abies koreana*, PK: *Pinus koraiensis*, FC: *Fraxinus chiisanensis*, TC: *Taxus cuspidata*, KS: *Kalopanax septemlobus*, AM: *Acer pictum* var. *mono*, FS: *Fraxinus sieboldiana*, TA: *Tilia amurensis*, CC: *Cornus controversa*.

2.5. 공간 분포

연구대상지의 1차 조사 시기(2005-2008) 교목성 수종의 위치를 연구대상지의 지형 모식도 위에 나타내었다(Figure 13).

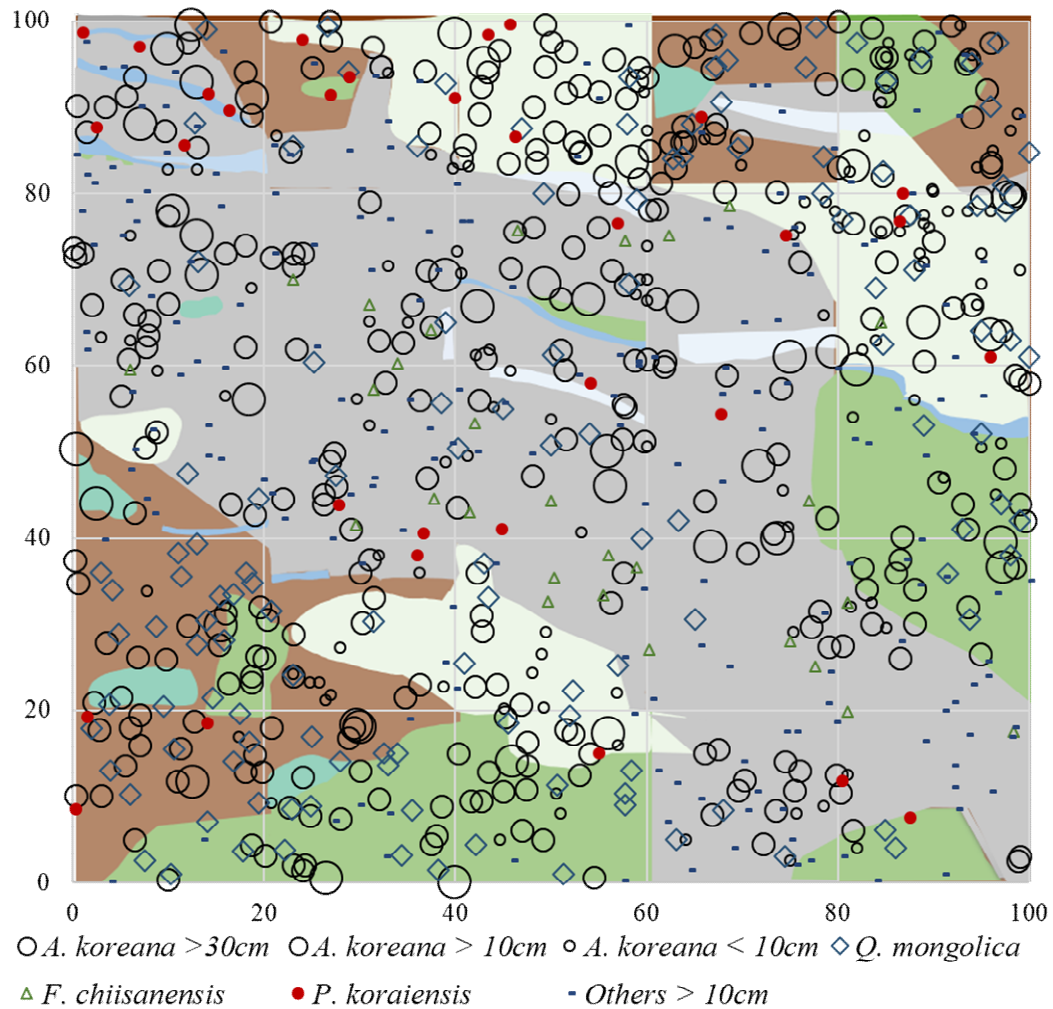


Figure 13. Distribution of the major tree species on the topographic profile in 1st inventory (2005-2008).

Kernel Intensity Estimation을 통해 구한 중요도가 높은 10개 수종의 Intensity function은 Figure 14과 같다. 구상나무는 다른 수종에 비해 연구대상지 전 면적에 걸쳐 높은 값을 보였으며, 그중에서도 사면 지형에 해당하는 북동쪽, 남서쪽 부근에서 계곡 지형에 해당하는 중앙보다 더 높은 값을 보여 계곡 지형보다 사면 지형에서 구상나무의 밀도가 더 높은 것으로 나타났다.

쇠물푸레나무, 물들메나무, 당단풍나무는 계곡 지형에 해당하는 남동쪽과 북서쪽을 가로지르는 중앙 부분에서 높은 밀도를 보였으며, 신갈나무, 당단풍나무, 잣나무는 사면 지형에서 높은 밀도를 보였다. 철쭉, 피나무, 산딸나무는 특정 부분에서 높은 intensity 값을 보였지만 사면이나 계곡 등의 지형과 분포가 일치하지 않았다.

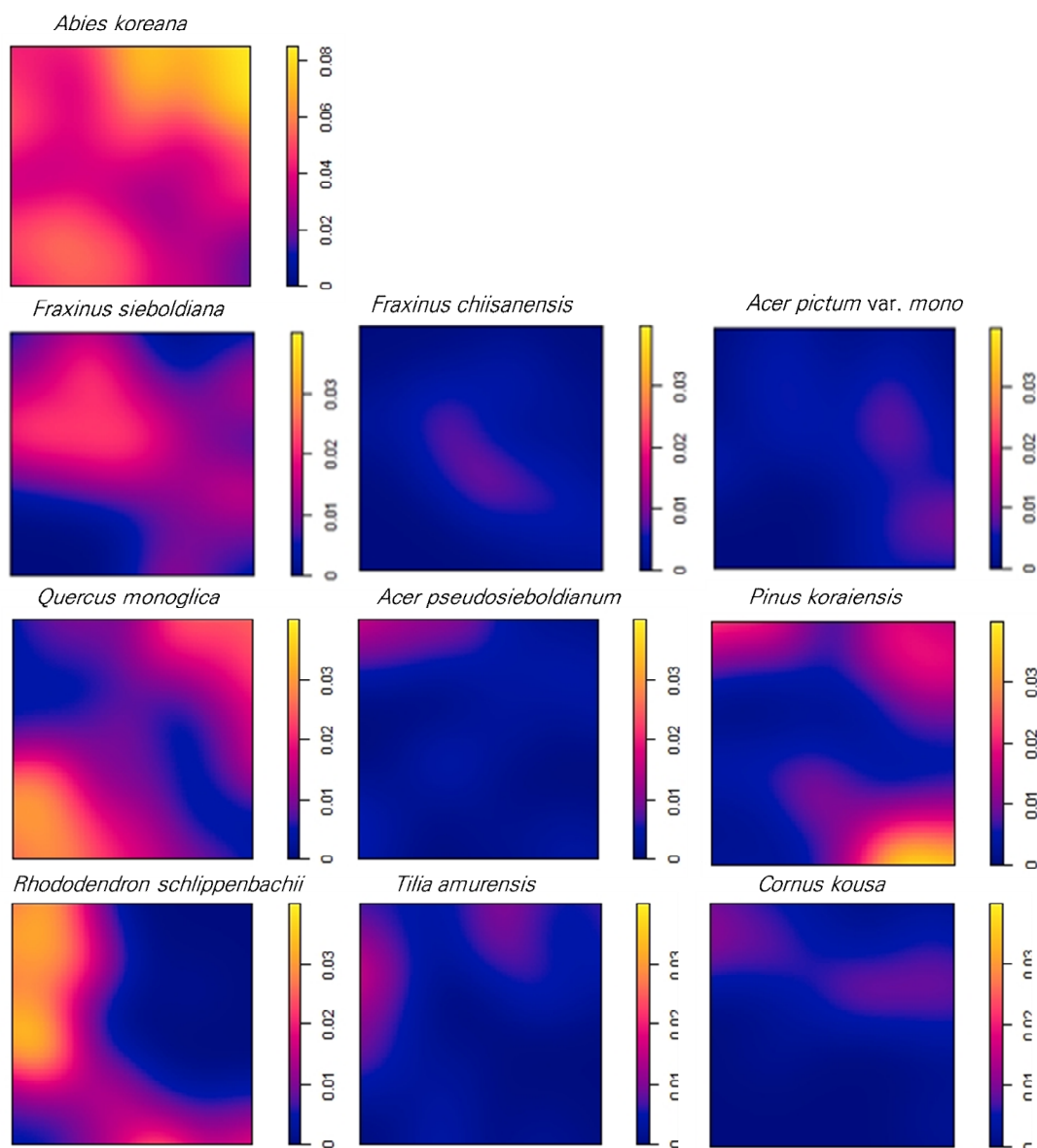


Figure 14. Intensity functions of ten major species in the study site.

구상나무의 공간 분포 패턴을 분석한 결과, 임의 분포를 가정한 경우 구상나무의 $L(r)$ 값은 약 25m까지, $g(r)$ 값은 6m까지 신뢰구간보다 높은 값을 보이며 집중 분포하는 것으로 나타나지만, 지형에 따라 구상나무의 밀도가 달라짐을 반영하여 intensity function을 적용한 경우, $L(r)$ 값은 모든 거리에서 신뢰구간 안에 포함되었으며, $g(r)$ 값도 7m 거리에서 신뢰구간보다 낮은 값을 나타낸 것을 제외하고는 모든 거리에서 신뢰구간 안에 포함되었다(Figure 15). 따라서 연구대상지의 구상나무는 집중 분포를 보이지만 이는 구상나무 개체 간의 영향보다는 지형 등의 외부 요인의 영향이 크게 나타난 결과로 볼 수 있다(Wiegand *et al.*, 2007).

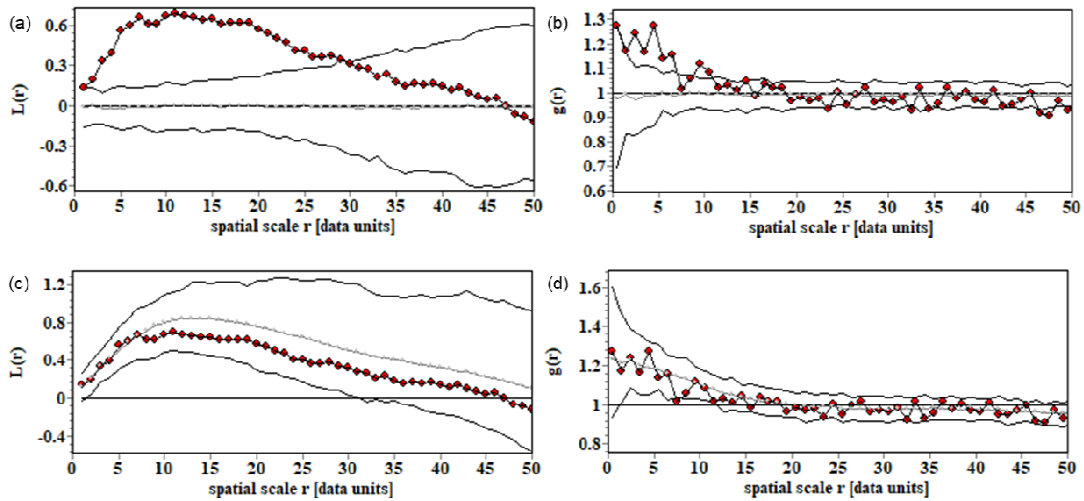


Figure 15. Summary statistics ($L(r)$, $g(r)$) of the univariate spatial point pattern analysis of *Abies koreana* in the study plot. (a), (b): CSR null model, (c), (d): Heterogeneous Poisson null model.

3. 구상나무 개체군 동태

3.1. 구상나무의 흉고직경 분포

구상나무의 흉고직경 분포는 1차 조사에는 최대 40.2cm, 2차 조사에는 최대 42.3cm, 4차 조사에는 최대 47cm까지 분포하였다. 모든 시기에서 10-15cm 직경급의 밀도가 가장 높은 단봉형 분포를 보였다. 흉고직경 25cm 이하의 모든 직경급에서 시간이 지남에 따라 개체수가 감소하는 추세를 보였다. 밀도가 가장 높은 직경급인 10-15cm 직경급에서는 밀도가 1차 조사 시 105본/ha에서 2차 조사 시기 95본/ha로 8.7% 감소하였으며, 4차 조사 시 63본/ha로 33.7% 감소하였다. 이와 반대로 25-30cm 직경급과 35-40cm 직경급은 이와 반대로 개체수가 증가하는 추세를 보였는데 1차 조사에는 각각 40본/ha, 11본/ha였던 25-30cm 직경급과 35-40cm 직경급의 밀도가 4차 조사에는 45본/ha, 18본/ha로 증가하였다 (Figure 16).

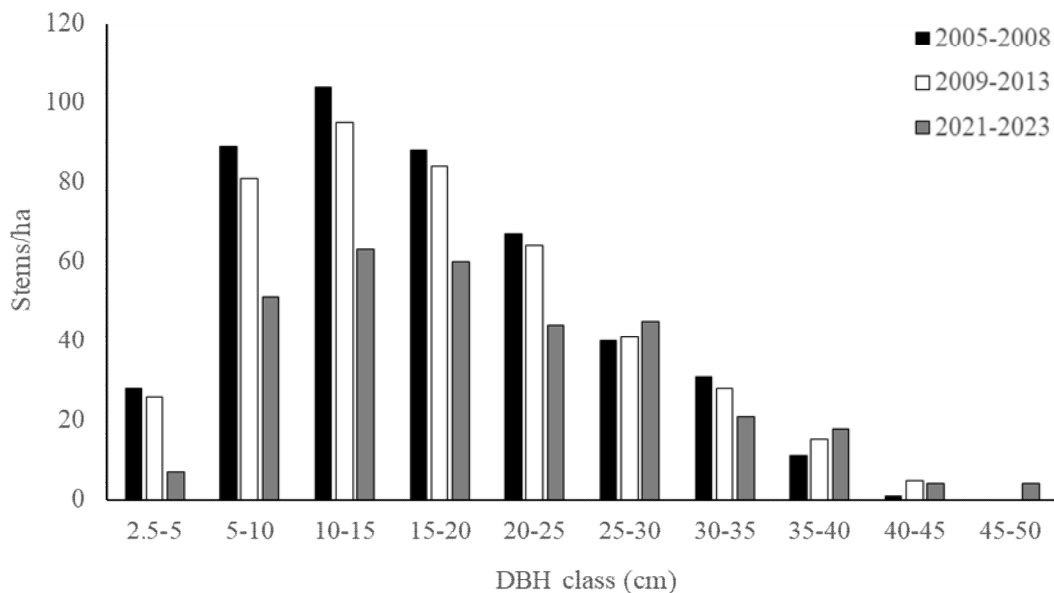


Figure 16. DBH Distribution of *Abies koreana* in the study site.

3.2. 고사율과 이입률

연구대상지 내 중요도가 가장 높은 10종의 생존목, 고사목, 그리고 진계목의 수로 연평균 고사율과 진계생장률을 계산해본 결과, 1차 조사와 2차 조사 사이에 구상나무는 25개체가 고사하고 5개체가 추가되어 연평균 1.11%의 고사율과 0.22%의 진계생장률을 보였다. 신갈나무는 추가된 개체 없이 3개체가 고사하여 0.47%의 연평균 고사율을 나타냈다. 쇠물푸레나무는 8개체가 고사하고 2개체가 추가되어 고사율과 진계생장률이 각각 1.51%, 0.37%로 나타났다. 단 한 개체도 고사하지 않은 당단풍나무, 피나무를 제외한 다른 수종들은 0.47~2.35%의 연평균 고사율을 나타냈고, 진계생장은 전혀 이루어지지 않았거나, 1% 미만의 진계생장률을 나타냈다(Table 4).

2차 조사와 4차 조사 사이에 구상나무는 131개체가 고사하고 9개체가 추가되어 연평균 고사율 3.48%로 나타났으며, 진계생장률은 0.21%로 나타났다. 신갈나무는 추가된 개체 없이 16개체가 고사하여 1.35%의 연평균 고사율을 나타냈다. 쇠물푸레나무는 31개체가 고사하고 8개체가 추가되어 고사율과 진계생장률이 각각 3.52%, 0.81%로 나타났다. 연구대상지의 중요도 상위 10개 수종은 0.53~3.52%의 연평균 고사율을 나타냈고, 새로운 개체가 추가되지 않은 신갈나무를 제외한 다른 수종들의 연평균 진계생장률은 0.21~1.53%로 나타났다. 대부분의 수종에서 고사율이 진계생장률보다 높게 나타났으나 당단풍나무와 물들메나무는 진계생장률이 고사율보다 높게 나타났다(Table 5).

Table 4. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 1st inventory to 2nd inventory for all plots.

Species	Number of trees		Dead individual	Recruited individual	Annual mortality (m, %)	Annual ingrowth (r, %)
	2005-2008	2009-2013				
<i>Abies koreana</i>	459	439	25	5	1.11	0.22
<i>Quercus mongolica</i>	129	126	3	-	0.47	-
<i>Fraxinus sieboldiana</i>	109	103	8	2	1.51	0.37
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	93	96	-	3	-	0.65
<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	107	100	12	5	2.35	0.95
<i>Fraxinus chiisanensis</i>	29	28	1	-	0.65	-
<i>Pinus koraiensis</i>	31	30	3	-	1.78	-
<i>Acer pictum</i> var. <i>mono</i>	35	32	1	1	0.52	0.52
<i>Tilia amurensis</i>	39	39	-	-	-	-
<i>Cornus kousa</i>	32	32	1	-	0.97	-

Table 5. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 2nd inventory to 4th inventory for all plots.

Species	Number of trees		Dead individual	Recruited individual	Annual mortality (m, %)	Annual ingrowth (r, %)
	2009-2013	2021-2023				
<i>Abies koreana</i>	439	317	131	9	3.48	0.21
<i>Quercus mongolica</i>	126	110	16	-	1.35	-
<i>Fraxinus sieboldiana</i>	103	80	31	8	3.52	0.81
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	96	98	5	7	0.53	0.75
<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	100	86	20	6	2.21	0.62
<i>Fraxinus chiisanensis</i>	28	29	3	4	1.13	1.53
<i>Pinus koraiensis</i>	30	26	5	1	1.81	0.34
<i>Acer pictum</i> var. <i>mono</i>	32	29	5	2	1.68	0.64
<i>Tilia amurensis</i>	39	38	2	1	0.53	0.26
<i>Cornus kousa</i>	32	28	5	1	1.68	0.32

3차 조사를 실시한 13개의 소방형구만을 대상으로 중요도가 가장 높은 상위 10개 수종의 생존목, 고사목, 진계목, 연평균 고사율과 연평균 진계생장률의 경우, 1차 조사와 2차 조사 사이 고사한 구상나무는 7개체로 0.6%의 연평균 고사율을 나타냈으나 2차 조사와 3차 조사 사이 고사한 구상나무는 52개체로 연평균 고사율이 4.93%인 것으로 나타났다. 3차 조사와 4차 조사 사이 고사한 구상나무의 개체수는 21개체로 연평균 고사율은 2.39%였다. 한편 구상나무의 연평균 진계생장률은 0.17%, 0.26%, 0.22%로 대체로 낮은 수치를 기록하였다. 철쭉과 당단풍나무를 제외한 다른 수종들도 2차 조사와 3차 조사 사이의 연평균 고사율이 가장 높았으며 잣나무와 고로쇠나무의 경우 연평균 고사율이 각각 6.89%, 5.59%로 나타나 가장 높은 고사율을 보였다. 진계생장률의 경우 구상나무, 신갈나무, 피나무를 제외한 수종들은 3차 조사와 4차 조사 사이에서 가장 높은 진계생장률을 보였다(Table 6, 7,8).

Table 6. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 1st inventory to 2nd inventory for 13 plots.

Species	Number of trees		Dead individual	Recruited individual	Annual mortality (m, %)	Annual ingrowth (r, %)
	2005-2008	2009-2013				
<i>Abies koreana</i>	238	233	7	2	0.60	0.17
<i>Quercus mongolica</i>	63	61	2	-	0.64	-
<i>Fraxinus sieboldiana</i>	52	52	1	1	0.39	0.39
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	66	66	-	-	-	-
<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	28	25	3	-	2.24	-
<i>Fraxinus chiisanensis</i>	17	16	1	-	1.21	-
<i>Pinus koraiensis</i>	10	10	-	-	-	-
<i>Acer pictum</i> var. <i>mono</i>	23	20	3	-	2.76	-
<i>Tilia amurensis</i>	13	14	-	1	-	1.59
<i>Cornus kousa</i>	18	18	-	-	-	-

Table 7. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 2nd inventory to 3rd inventory for 13 plots.

Species	Number of trees		Dead individual	Recruited individual	Annual mortality (m, %)	Annual ingrowth (r, %)
	2009-2013	2015-2017				
<i>Abies koreana</i>	233	184	52	3	4.93	0.26
<i>Quercus mongolica</i>	61	52	9	1	3.14	0.33
<i>Fraxinus sieboldiana</i>	52	45	8	2	3.29	0.78
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	66	66	2	-	0.61	-
<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	25	24	2	1	1.65	0.81
<i>Fraxinus chiisanensis</i>	16	16	0	-	0.00	-
<i>Pinus koraiensis</i>	10	7	3	-	6.89	-
<i>Acer pictum</i> var. <i>mono</i>	20	15	5	-	5.59	-
<i>Tilia amurensis</i>	14	14	1	1	1.47	1.47
<i>Cornus kousa</i>	18	15	3	-	3.58	-

Table 8. Annual mortality and annual ingrowth of ten major tree species from 3rd inventory to 4th inventory for 13 plots.

Species	Number of trees		Dead individual	Recruited individual	Annual mortality (m, %)	Annual ingrowth (r, %)
	2015-2017	2021-2023				
<i>Abies koreana</i>	184	165	21	2	2.39	0.22
<i>Quercus mongolica</i>	52	50	2	-	0.78	-
<i>Fraxinus sieboldiana</i>	45	41	7	3	3.32	1.37
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	66	65	3	2	0.93	0.61
<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	24	24	3	3	2.64	2.64
<i>Fraxinus chiisanensis</i>	16	18	-	2	-	2.64
<i>Pinus koraiensis</i>	7	8	-	1	-	3.04
<i>Acer pictum</i> var. <i>mono</i>	15	16	-	1	-	1.37
<i>Tilia amurensis</i>	14	14	-	-	-	-
<i>Cornus kousa</i>	15	15	1	1	1.37	1.37

3.3. 개체군 성장 모델

조사 회차간 자료로 고안한 성장 매트릭스는 Table 9, 10, 11과 같으며, 이를 바탕으로 만든 3개의 개체군 성장 모델에서 구상나무 개체군은 모두 향후 감소하는 것으로 나타났다.

1차 조사와 2차 조사 사이 같은 직경급 내 생존율은 0.64-0.88을 나타냈으며, 다음 직경급으로 성장하는 성장률은 0.09-0.29로, 고사율은 0.02-0.07로 나타났다. 이를 적용하여 1차 조사 기간 이후부터 향후 100년간의 구상나무 개체군의 크기를 예측한 결과 35cm 이하의 모든 직경급에서 개체군의 크기가 점차 감소할 것으로 나타났다(Figure 17).

2차 조사와 3차 조사 사이의 직경급 내 잔존율은 모두 감소하여 0.28-0.71로 나타났으며 다음 직경급으로의 성장률은 0.1-0.5로 나타났다. 직경급별 고사율은 0.08-0.43으로 나타났다. 2.5-5cm 직경급의 경우 같은 직경급에 남아있는 비율(0.28)보다 다음 직경급으로 성장하는 비율(0.5)이 더 높았다. 2차 조사와 3차 조사 사이의 잔존율과 성장률을 적용하여 1차 조사 기간 이후 5년 차부터 100년까지의 개체군 크기를 예측한 결과, 이전의 감소세보다 더 급한 기울기로 구상나무의 개체군 크기가 감소할 것으로 예측되었다(Figure 18).

3차 조사와 4차 조사 사이의 개체군 성장 행렬은 직경급 내 잔존율이 0.22-0.79, 다음 직경급으로의 성장률이 0.14-0.5, 고사율은 0.06-0.33으로 나타났다. 2차 조사와 3차 조사 사이의 성장 행렬과 마찬가지로 2.5-5cm 직경급의 성장률이 잔존율보다 높다. 3차 조사와 4차 조사 사이의 개체군 성장 행렬을 적용하여 1차 조사 기간 이후 10년 차부터 100년까지의 개체군 크기를 예측한 결과, 대체로 2차 조사와 3차 조사 사이의 성장 행렬을 적용하여 예측한 것보다 개체군의 감소세가 완화된 모습을 나타냈다(Figure 19).

Table 9. Growth matrix of *Abies koreana* between 1st inventory and 2nd inventory.

DBH class (cm)	2.5-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	Death
2.5-5	0.80	0.20								0
5-10		0.88	0.09							0.03
10-15			0.84	0.14						0.02
15-20				0.79	0.18					0.03
20-25					0.75	0.21				0.04
25-30						0.65	0.29			0.06
30-35							0.64	0.29		0.07
35-40								0.86	0.14	0

Table 10. Growth matrix of *Abies koreana* between 2nd inventory and 3rd inventory.

DBH class (cm)	2.5-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	Death
2.5-5	0.28	0.50								0.22
5-10		0.58	0.15							0.26
10-15			0.61	0.18						0.21
15-20				0.70	0.22					0.08
20-25					0.56	0.15				0.30
25-30						0.71	0.18			0.12
30-35							0.43	0.14		0.43
35-40								0.60	0.10	0.30
40-45									1.00	0.00

Table 11. Growth matrix of *Abies koreana* between 3rd inventory and 4rd inventory.

DBH class (cm)	2.5-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	Death
2.5-5	0.22	0.44									0.33
5-10		0.74	0.16								0.11
10-15			0.79	0.14							0.07
15-20				0.69	0.25						0.06
20-25					0.52	0.22					0.26
25-30						0.71	0.24				0.06
30-35							0.40	0.40			0.20
35-40								0.71	0.29		0
40-45									0.50	0.50	0

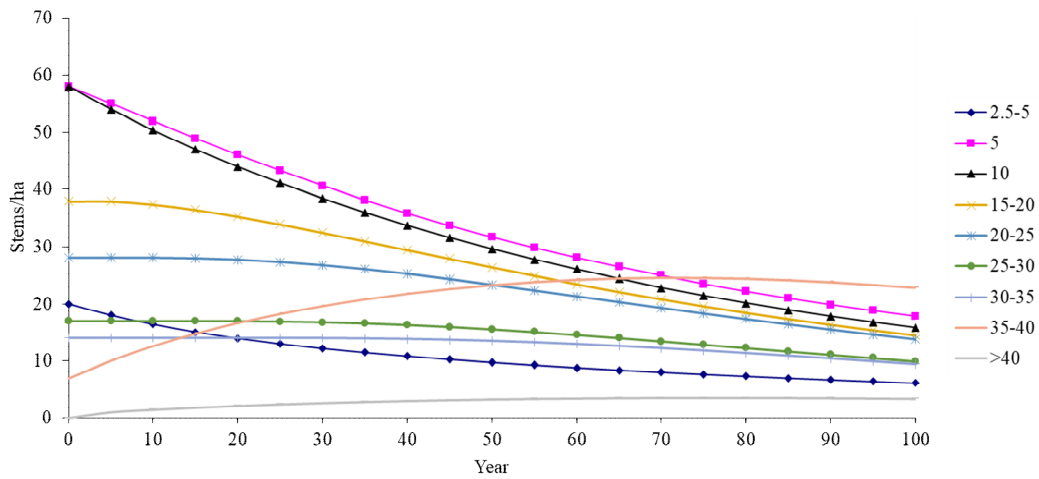


Figure 17. Predicted *Abies koreana* population by DBH class using the growth model between 1st inventory and 2nd inventory (Year 0 starts from 1st inventory).

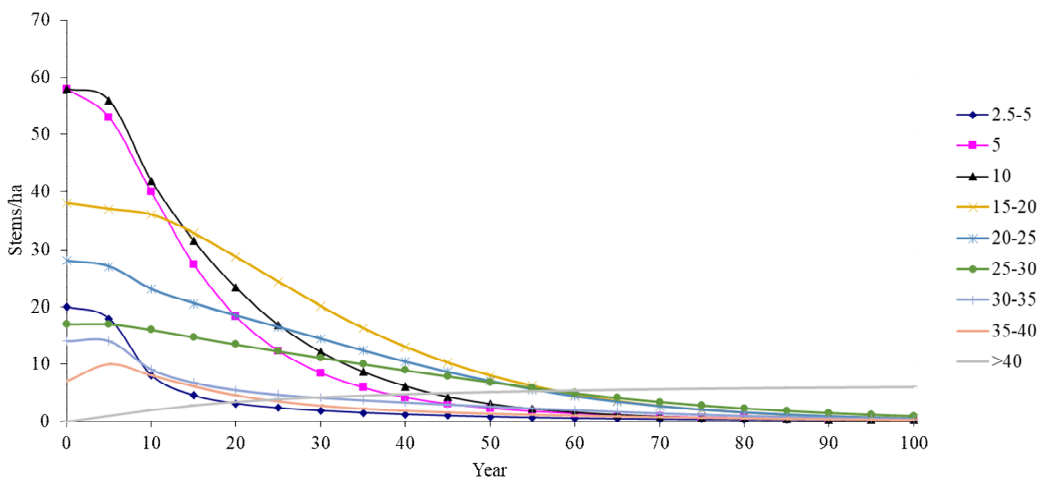


Figure 18. Predicted *Abies koreana* population by DBH class using the growth model between 2nd inventory and 3rd inventory (Year 0 starts from 1st inventory).

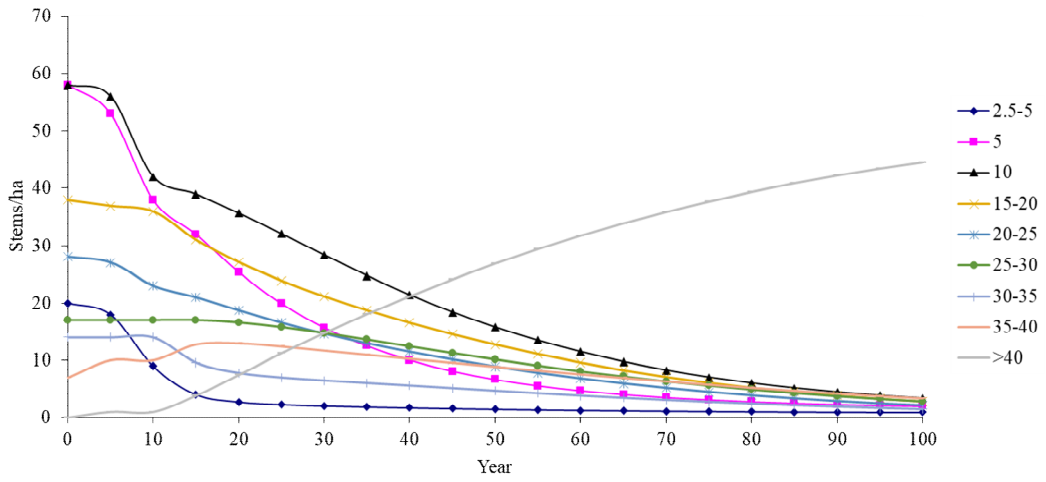


Figure 19. Predicted *Abies koreana* population by DBH class using the growth model between 3rd inventory and 4th inventory (Year 0 starts from 1st inventory).

4. 고사 양상 및 고사목 동태

4.1. 구상나무의 생육 형태

연구대상지 내 구상나무의 생육 형태를 확인해본 결과 1차 조사에는 전체 구상나무 중 AS 상태인 구상나무의 비율이 약 71%를 차지하였으며 DS 상태인 구상나무의 비율이 약 27%를 차지하여 구상나무 대부분이 AS와 DS 상태였다. 2차 조사에는 AS 상태인 개체의 비율이 65%로, DS 상태인 개체의 비율이 19%로 감소하였으며, DB 상태인 개체의 비율은 11%로 증가하였다. 4차 조사에는 AS 상태인 개체의 비율이 53%로, DS 상태인 개체의 비율이 7%로 감소하였으며, DB 상태인 개체의 비율이 31%로 증가하여 DB 상태인 개체가 DS 상태인 개체보다 더 많은 것으로 나타났다. 또한 4차 조사 시기에는 DF 상태인 개체의 비율도 6%로 증가하여 전체적으로 연구대상지 내에 구상나무 고사목의 비율이 증가하였으며, 고사목 중에는 쓰러지거나 부러진 개체의 비율이 증가한 것으로 확인되었다(Figure 20).

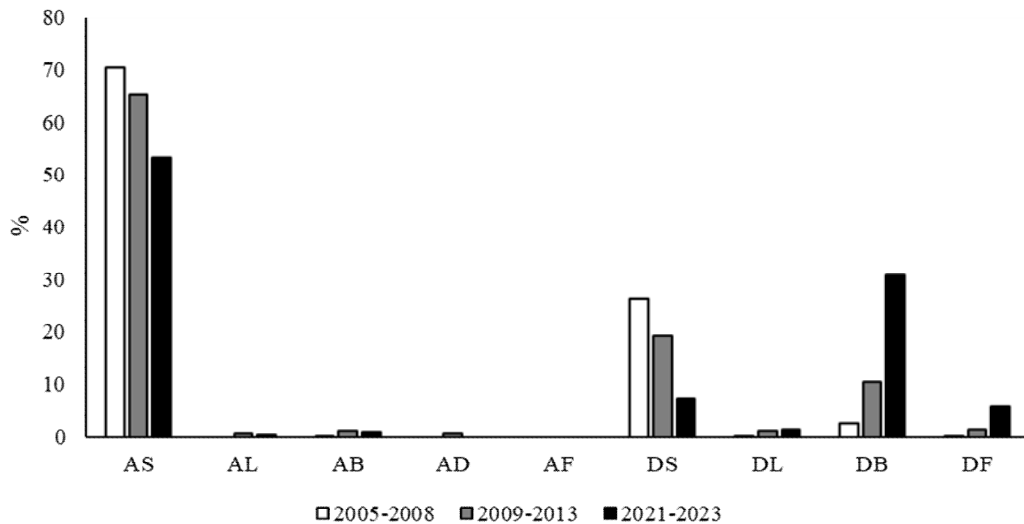


Figure 20. Changes of the percentage of the status of *Abies koreana* from 2005 to 2023.

4.2. 고사 양상

연구대상지에서 1차 조사와 2차 조사 사이에 고사한 구상나무의 고사 양상을 비율로 나타낸 결과 DS가 전체의 56%를 차지하였으며, DL 4%, DB 24%, DF 16%인 것으로 나타났다. 2차 조사와 4차 조사 사이에 고사한 구상나무의 고사 양상의 비율은 DS 22%, DL 1%, DB 50%, DF 27%로 부러진 채로 고사한 형태가 가장 큰 비율을 차지하고 있었다(Figure 21).

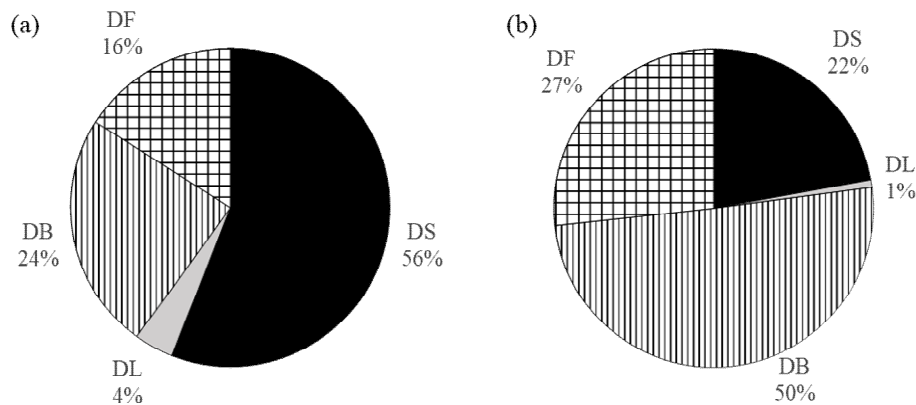


Figure 21. Death patterns of dead *Abies koreana* (a) between 1st inventory and 2nd inventory and (b) between 2nd inventory and 4th inventory for all plots.

3차 조사를 실시한 13개의 소방형구 내 구상나무의 고사 양상은 1차 조사와 2차 조사 사이에 고사한 구상나무는 71%가 DS 상태로 남아있었으며, 29%가 DB 상태로 남아있었다. 2차 조사와 3차 조사 사이에 고사한 구상나무의 고사 양상의 비율(DS 29%, DB 40%, DF 31%)과 3차 조사와 4차 조사 사이에 고사한 구상나무의 고사 양상의 비율(DS 28%, DB 43%, DF 29%)은 비슷한 값을 나타내어 부러진 채로 고사한 상태의 개체가 40% 이상으로 가장 큰 비율을 차지한 것으로 나타났다(Figure 22).

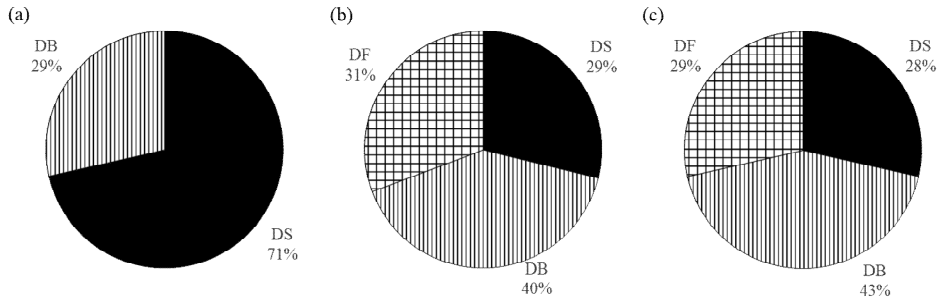


Figure 22. Death patterns of dead *Abies koreana* (a) between 1st inventory and 2nd inventory, (b) between 2nd inventory and 3rd inventory (c) 4th inventory for 13 plots.

4.3. 고사목 동태

연구조사지 내 고사목의 상태 변화를 통해 고사목의 동태를 살펴본 결과, 1차 조사에서 DS 상태였던 고사목의 64%가 2차 조사 시기에도 동일하게 DS 상태로 남아있었으며, 27%는 수간이 부러진 DB 상태가 된 것으로 확인되었다. 한편, 2차 조사에서 DS 상태였던 고사목은 4차 조사에서 약 10%만이 DS 상태로 남아있었고, DB 상태로 변한 개체가 44%, DF 상태로 변한 개체가 약 10%, 사라진 개체가 33%로 대부분이 부러지거나 쓰러진 것으로 확인되었다(Figure 23).

2차 조사와 4차 조사 사이의 동태를 살펴보기 위해 3차 조사를 실시한 13개의 소방형구만을 대상으로 고사목의 상태 변화를 확인한 결과, 마찬가지로 1차 조사에 DS 상태로 기록된 고사목들은 대부분 2차 조사 시기에도 DS 상태로 확인되었으나, 2차 조사에서 DS 상태로 기록된 고사목 중 약 24%만이 3차 조사에도 DS 상태인 것으로 확인되었고, 나머지는 모두 부러지거나 쓰러진 것으로 확인되었다(Figure 24).

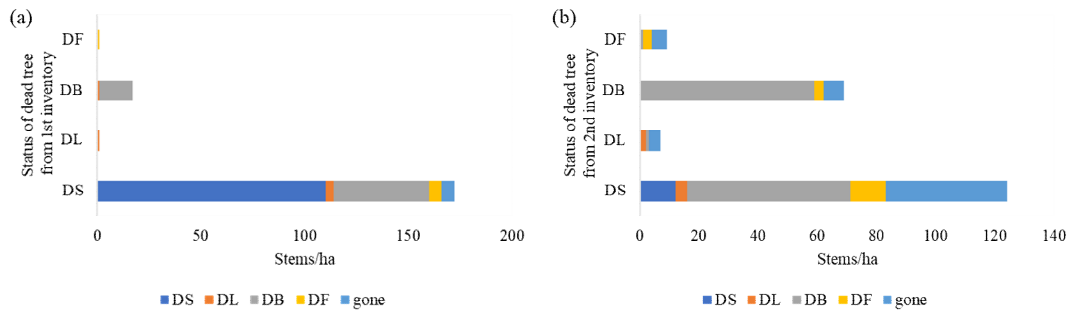


Figure 23. Changes of status of dead trees between (a) 1st inventory and 2nd inventory and (b) 2nd inventory and 4th inventory for all plots.

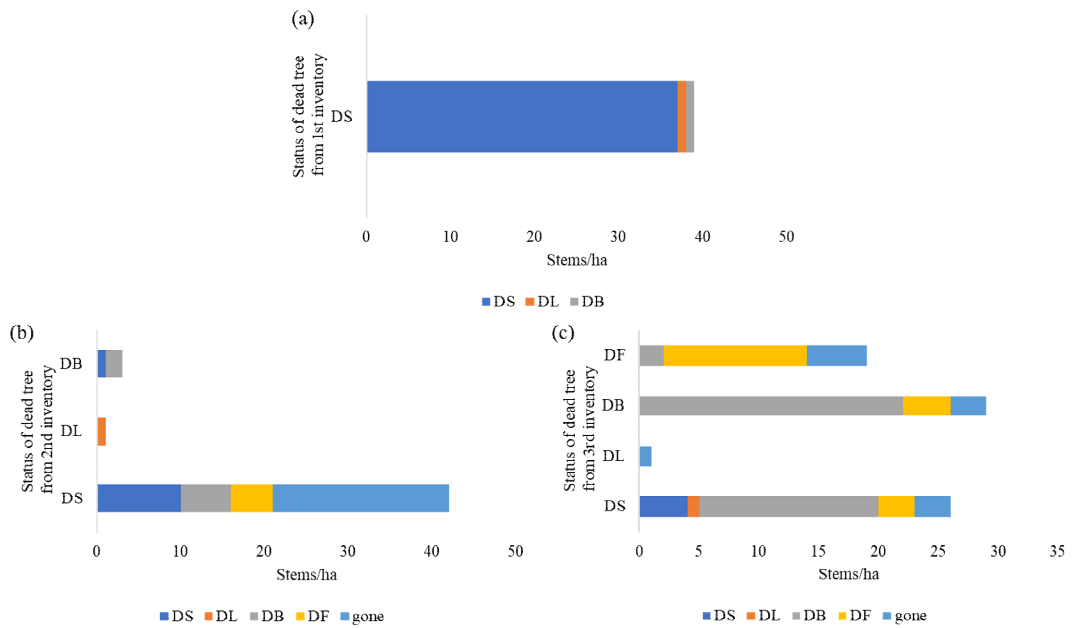


Figure 24. Changes of status of dead trees between (a) 1st inventory and 2nd inventory, (b) 2nd inventory and 4th inventory and (c) 3rd inventory and 4th inventory for 13 plots.

5. 연구지 기상 특성

5.1. 대기 온도

간이기상정보수집장치를 이용해 수집한 연구대상지의 대기 온도 자료는 Figure 25와 같다. 수집된 자료의 연평균 대기 온도는 6.5°C로, 인접한 자동기상관측장치인 성삼재 AWS의 연평균 대기 온도인 8.1°C보다 1.7°C 낮은 온도를 나타냈다. 월 평균 온도는 최난월인 8월의 온도가 18.3°C로, 성삼재의 대기 온도(20.0°C)와 약 1.7°C가량의 차이를 보였으며, 최한월인 1월의 온도는 영하 7°C로 성삼재의 온도(-5.2°C)보다 1.8°C 낮은 온도를 나타내었다(Figure 26).

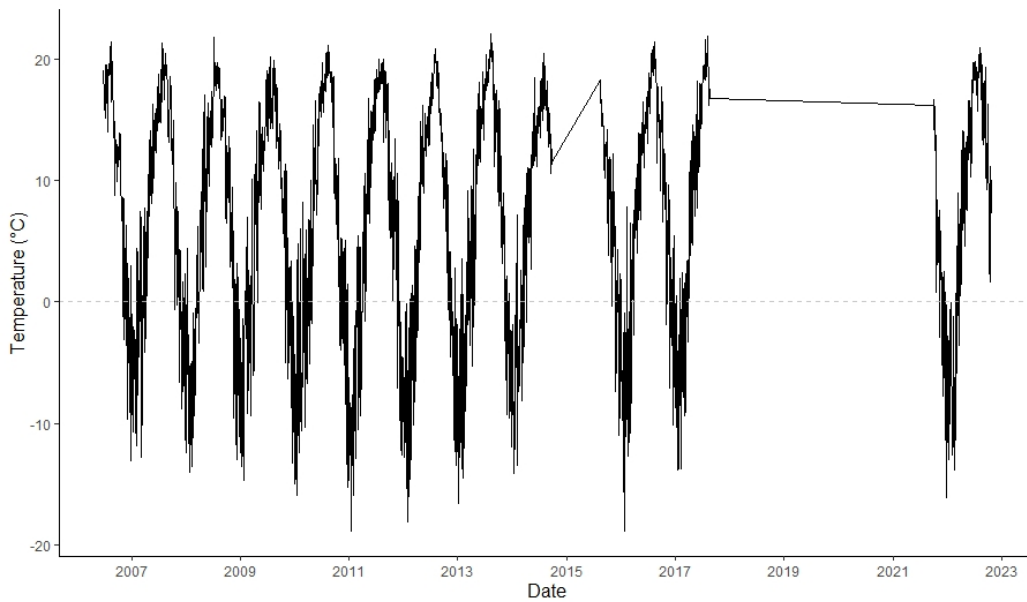


Figure 25. Daily mean air temperature (°C) obtained from the study site.

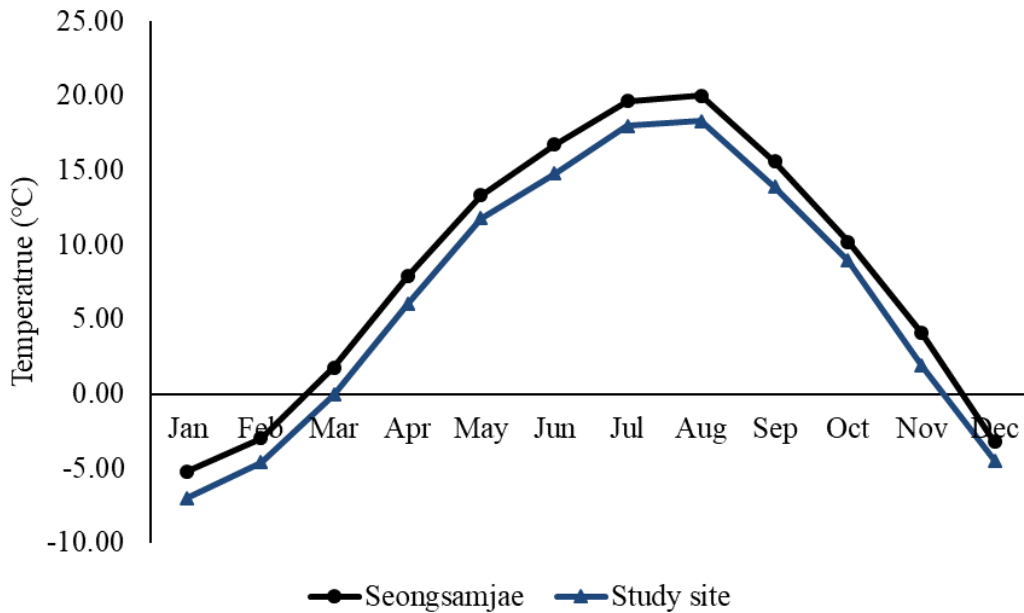


Figure 26. Comparison between the temperature of Seongsamjae and the study site.

성삼재와 연구대상지의 대기 온도는 유의한 상관관계를 가진 것으로 나타났으며($p < 0.001$), 상관 계수는 0.9954로 매우 강한 양의 관계인 것으로 나타났다. 두 대기 온도의 산점도 역시 두 대기 온도 자료가 선형 관계임을 나타내었다(Figure 27).

선형 회귀 분석 결과, 성삼재 AWS의 대기 온도(x)와 연구대상지의 대기 온도(y)는 아래와 같은 식의 관계를 보였다.

$$y = 0.990618x - 1.484682$$

x의 계수와 y 절편값 모두 유의한 것으로 나타났으며($p < 0.001$), 선형 회귀 모델의 R2값이 0.99로 1과 가까워 선형 회귀 모델의 설명력이 매우 높게 나타났다. 모델의 MSE는 0.8066, RMSE는 0.8978로 나타났다.

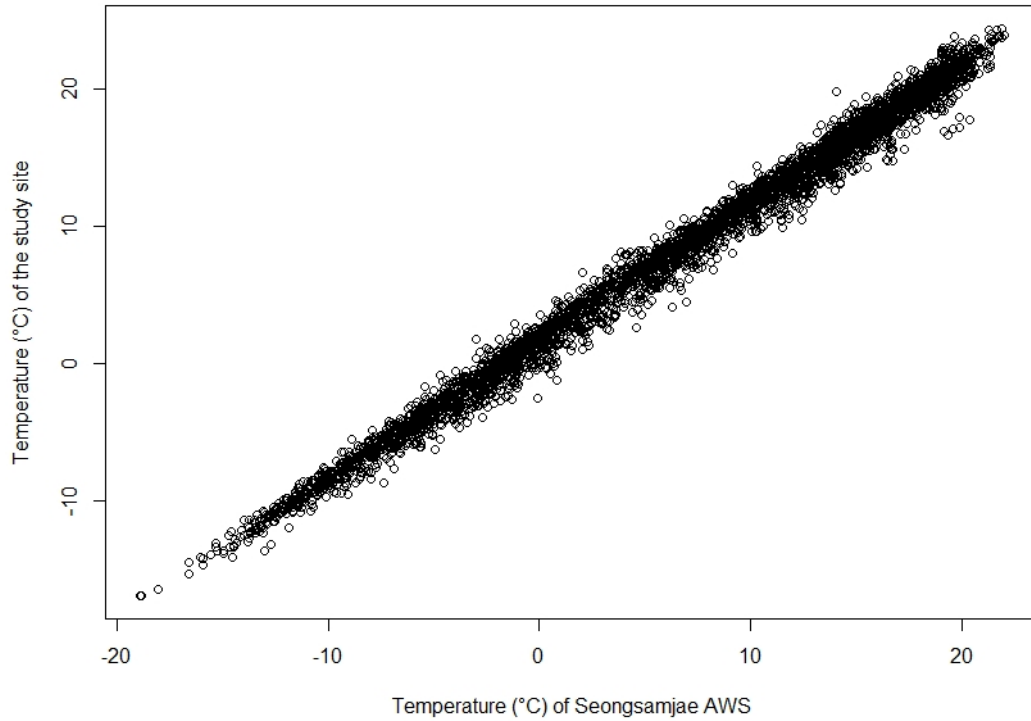


Figure 27. Scatter plot of temperature from Seongsamjae AWS and the study site.

이를 통해 연구대상지의 대기 온도 결측치를 추정하였으며(Figure 28), 추정치를 포함한 연구대상지의 2003년부터 2022년까지의 20년간의 연평균 대기 온도는 6.6°C로 나타났다(Figure 29). 최난월인 8월의 월평균 대기 온도는 18.4°C, 최한월인 1월의 월평균 대기 온도는 영하 6.7°C로 나타났다.

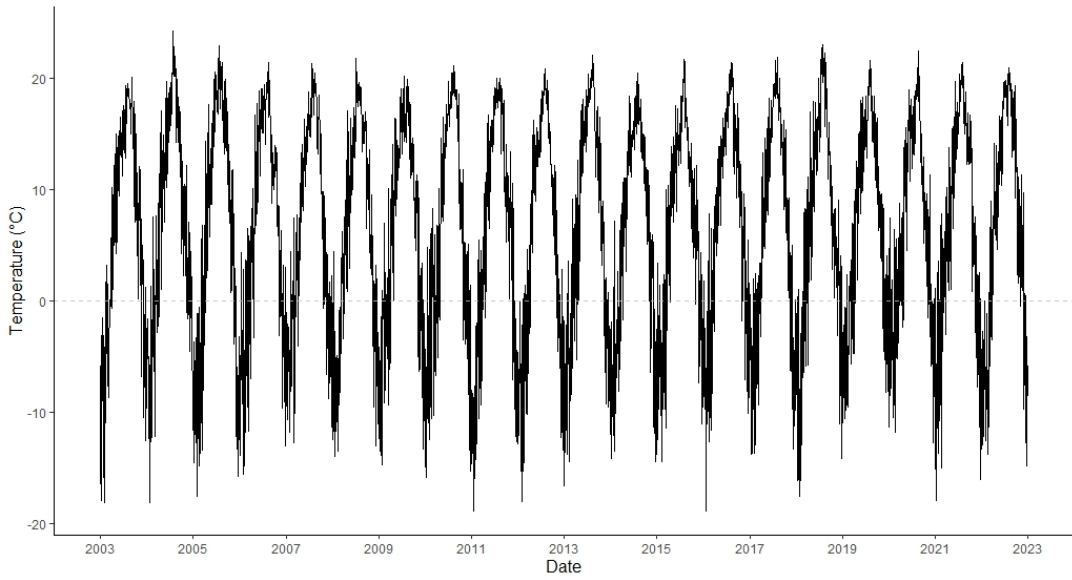


Figure 28. Daily mean air temperature of the study site from 2003–2022 including predicted data.

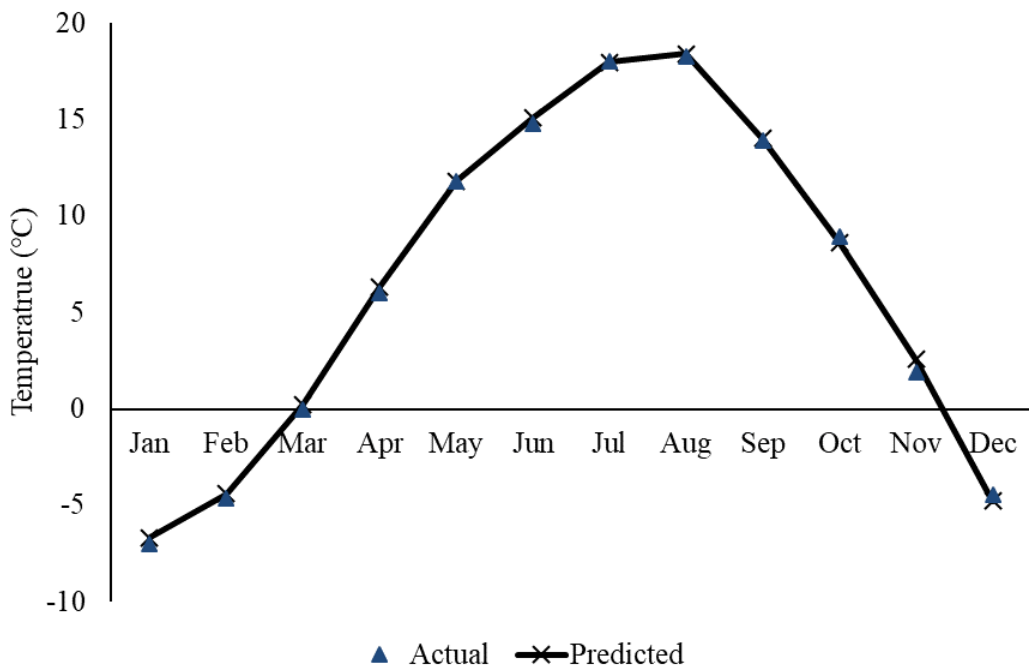


Figure 29. Predicted and actual monthly mean air temperature of the study site.

20년간의 대기 온도 추세를 살펴본 결과, 2013년부터 1월부터 5월까지의 월평균 대기 온도가 20년간의 월평균 대기 온도에 비하여 높았던 것으로 나타났으며(Figure 30), 2013년부터 1월과 3월의 월평균 대기 온도가 상승하는 양상을 보였다(Figure 31). 특히 2003년부터 2022년까지의 3월 월 평균 온도로부터 상승하는 추세선이 나타났고, R2값은 0.424로 추세선의 R2값이 열두 달 중 가장 높게 나타났다(Figure 32). 또한 2013년부터 한 해를 제외하고는 3월의 연 평균 온도가 영상을 기록하였다.

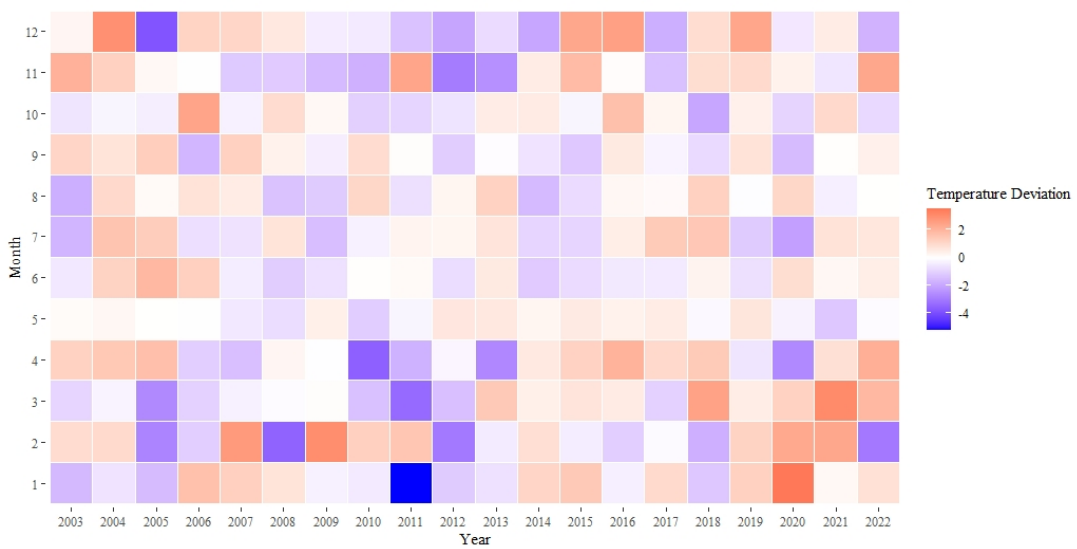


Figure 30. A comparison of monthly mean air temperature for 20 years with each year's monthly mean air temperature.

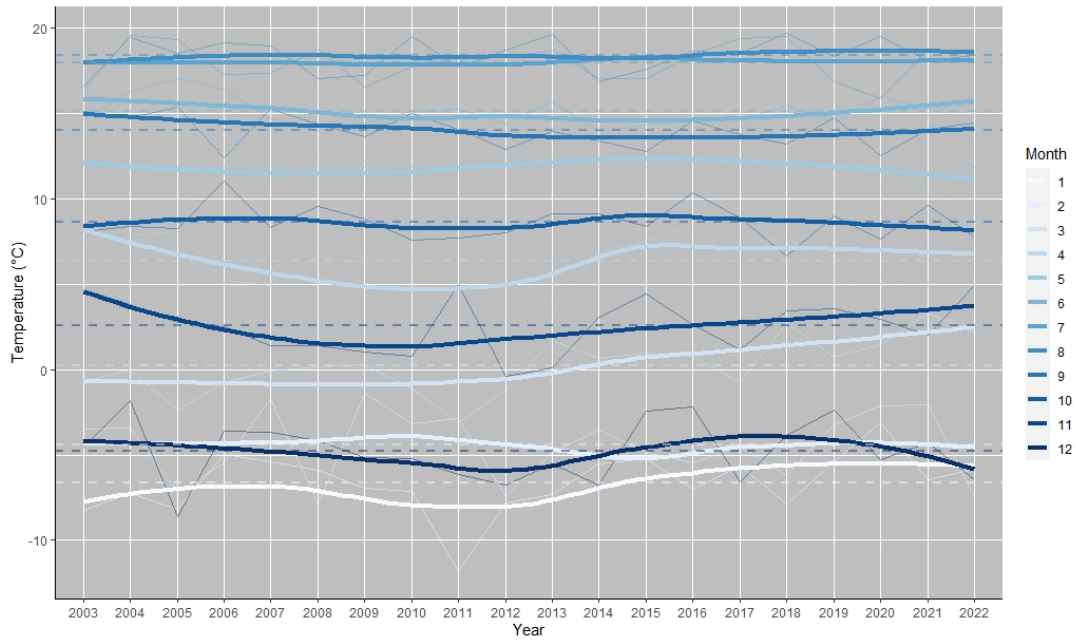


Figure 31. Visualization of the temporal variation in monthly mean air temperature with LOESS smoothing.

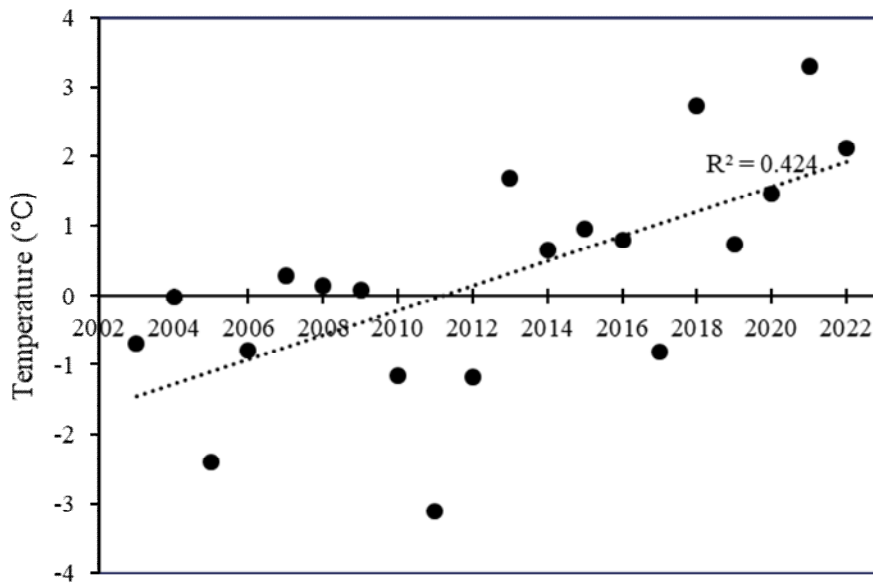


Figure 32. Linear trendline of March monthly mean temperature from 2003 to 2022.

2003년부터 2022년까지 20년간 상반기의 열흘간의 평균대기 온도를 비교한 결과 2011년과 2012년은 20년 평균보다 대기 온도가 낮은 구간이 많았고, 2014년 이후부터는 15개의 구간 중 절반 이상이 20년 평균보다 대기 온도가 높았고(Figure 33), LOESS 방식을 이용한 연도별 대기 온도 그래프에서도 2014년 이후 대기 온도가 상승하는 추세를 보였다(Figure 34).

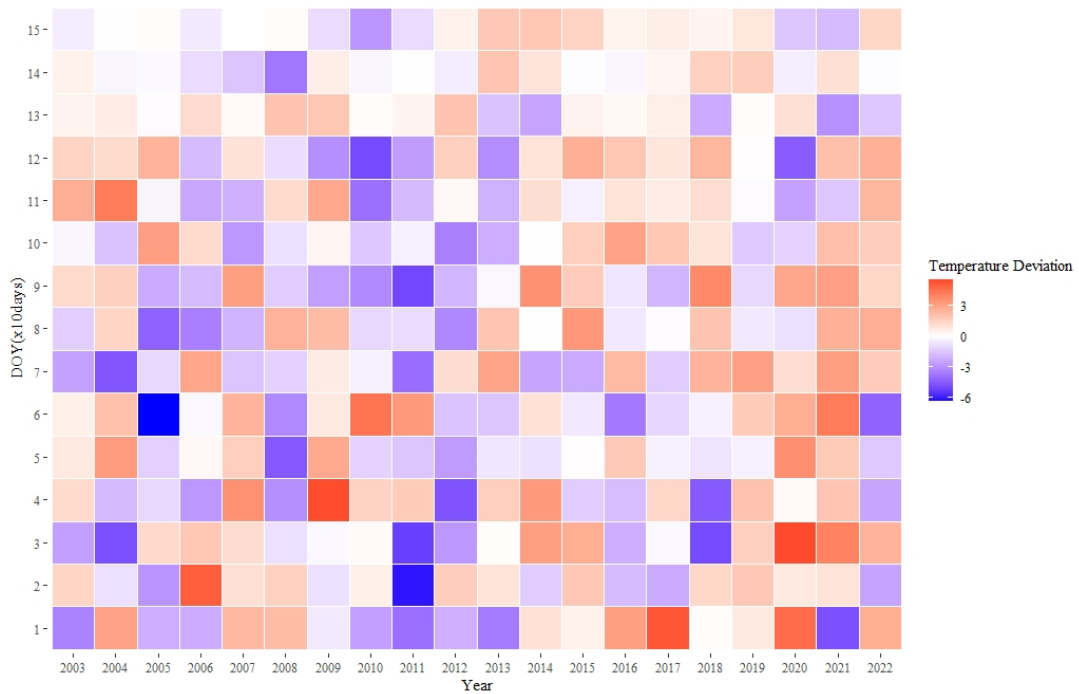


Figure 33. A comparison of 10-day mean air temperature for 20 years with each year's 10-day mean air temperature from DOY 1-150.

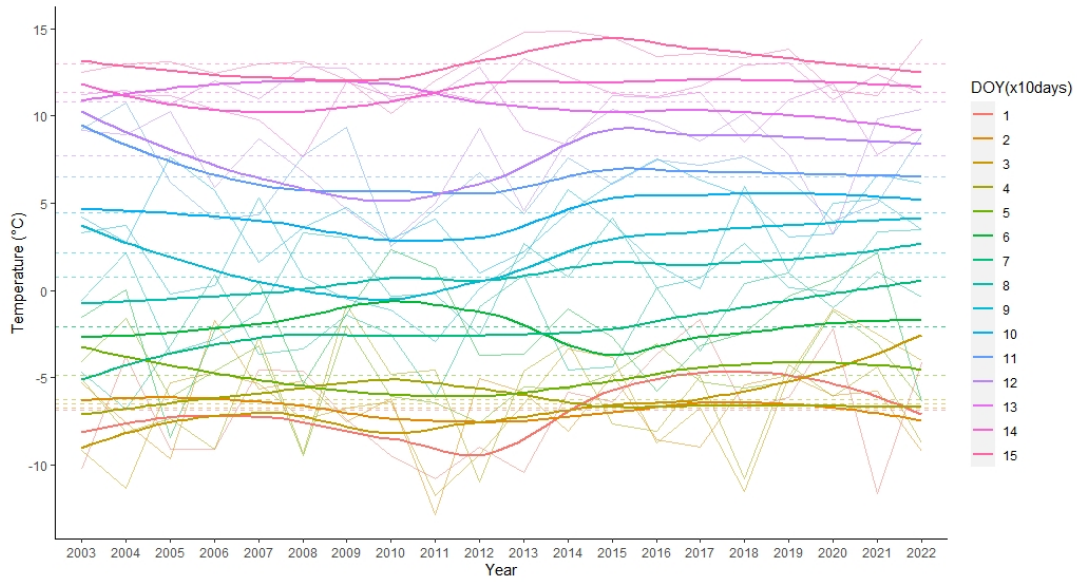


Figure 34. Visualization of the temporal variation in 10-day mean air temperature with LOESS smoothing.

5.2. 봄철 강수량

20년간의 봄철(3월~6월) 평균 월 강수량과 각 해의 월 강수량을 비교한 결과, 2006년부터 2010년까지 봄철의 강수량이 평균보다 낮았던 것으로 나타났다(Figure 35).

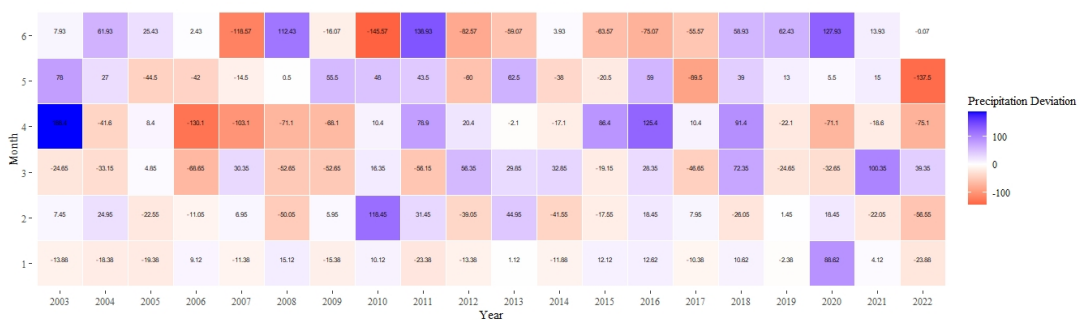


Figure 35. A comparison of the 20-year mean monthly precipitation during spring (March – June) and the monthly precipitation for each year.

5.3. 강풍과 태풍

2003년부터 2022년까지의 20년간 순간 최대 풍속이 14m/s 이상인 강풍이 발생한 날의 수는 연평균 30회로 나타났다. 가장 강풍이 자주 발생한 해는 2012년으로 한 해에 73회를 기록하였으며, 2010년은 59회, 2013년은 52회를 기록하여 뒤를 이었다. 순간 최대 풍속이 20m/s 이상인 돌풍이 가장 많이 발생한 해는 2012년으로 총 17회의 돌풍이 발생하였고, 다음으로 돌풍이 많이 발생한 해는 2010년(16회), 2011년(12회)이었다 (Figure 36).

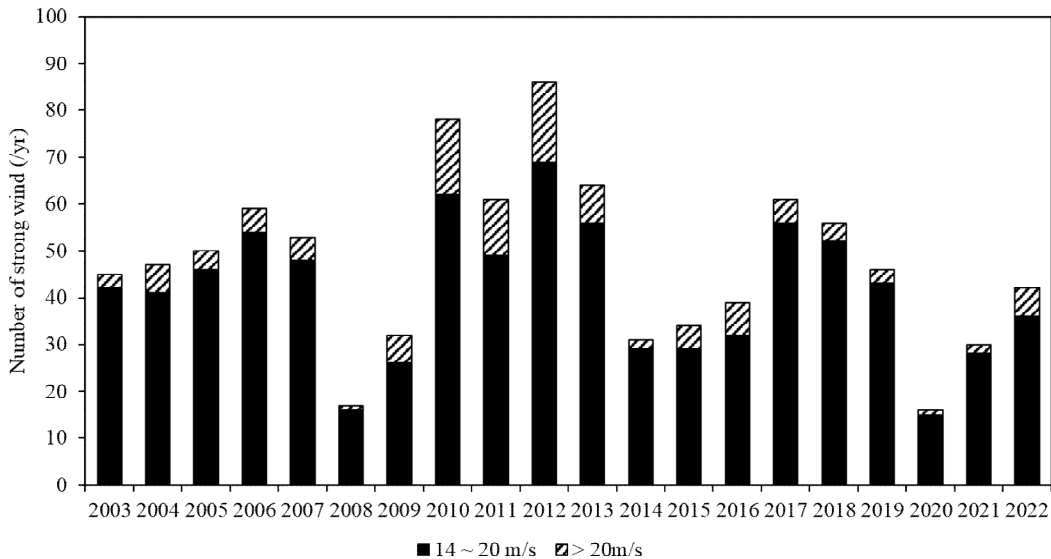


Figure 36. Frequency of strong wind events at Seongsamjae from 2003 to 2022.

2003년부터 2022년까지 한반도에 영향을 준 태풍의 수는 총 68개로 연평균 3.4개의 태풍이 한반도에 영향을 미쳤다. 한반도에 영향을 미친 태풍이 가장 많이 발생한 해는 2019년으로 7개의 태풍이 한반도에 영향을 끼쳤으며, 2004년, 2012년, 2018년, 2022년은 5개의 태풍이 한반도에 영향을 미쳤다. 그중 한반도에 직접 상륙하여 피해를 준 태풍은 2012년과 2020년에 연 3회로 가장 많이 발생하였다(Figure 37).

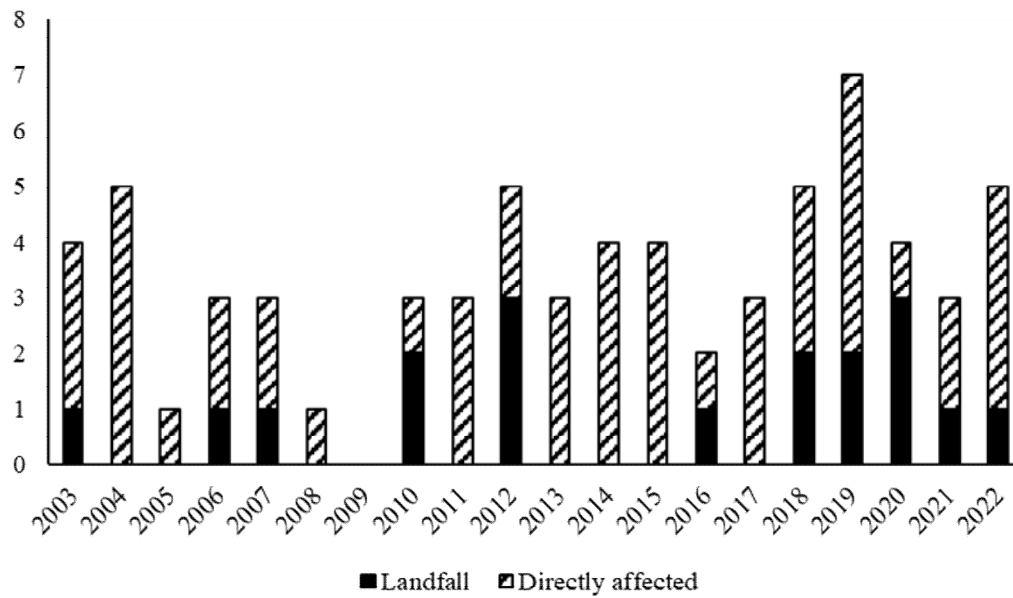


Figure 37. Annual frequency of typhoon impacted on the Korean Peninsula from 2003 to 2022.

제 4 장 고 찰

1. 구상나무 개체군 동태

2005년부터 2023년까지 4차에 걸친 구상나무 개체군 조사 결과, 연구 대상지 내 구상나무 개체군은 개체수, 흉고단면적, 중요도 모두 감소한 것으로 나타났다. 1차 조사에서의 구상나무 중요도는 28.9%로 오구균 등(2000), 박병주 등(2021)이 조사한 지리산 지역 구상나무 임분의 구상나무 중요도와 유사하였으나, 4차 조사에서의 중요도는 3.8% 감소하였고, 구상나무 개체수는 1차 조사 대비 30.9% 감소하였다. 연구 초기인 1차 조사와 2차 조사 사이에도 구상나무의 개체수와 중요도가 감소하며 개체군의 크기가 감소하는 양상을 보였으나 2차 조사와 4차 조사 사이에는 구상나무 개체군의 쇠퇴 양상이 더욱 두드러지게 나타났다.

이를 자세히 살펴보면 1차 조사와 2차 조사 사이의 약 5년의 기간에는 구상나무의 개체수는 20개가 감소하였으나 큰 직경급의 밀도가 높아져 흉고단면적은 0.39m² 증가하였다. 그러나 2차 조사와 4차 조사 사이의 약 10년의 기간에는 개체수가 122개 감소하였고, 특히 2.5-5cm 직경급부터 20-25cm 직경급까지의 밀도가 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다. 그 결과 이전에는 증가하였던 흉고단면적도 1.14m² 감소하였다.

또한 연구대상지 내 구상나무 고사목의 비율이 증가하고 있으며, 4차 조사에는 서 있는 상태의 고사목보다 부러져있는 상태의 고사목이 많이 증가한 것으로 나타났다.

연구대상지인 임결령 지역 구상나무의 연간 고사율은 1차 조사와 2차 조사 사이엔 1.1%였으나 2차 조사와 4차 조사의 사이에는 연간 고사율이 3배 이상 증가한 3.5%를 기록하였다. 3차 조사를 실시한 13개의 소방형구만을 대상으로 구상나무 개체수와 연간 고사율을 살펴보면, 1차 조사와 2차 조사 사이에는 7개체의 구상나무가 고사하고 2개체의 구상나무가 이입되어 개체수가 단 5개체 감소하였으며, 연간 고사율은 0.6%였으

나 2차 조사와 3차 조사 사이에는 52개체의 구상나무가 고사하고 3개체의 구상나무가 이입되어 개체수는 49개체가 감소하였고, 연간 고사율은 4.9%를 기록하여 전과 비교해 8배 이상 증가한 것으로 나타났다. 3차 조사와 4차 조사 사이에는 21개체가 고사하고 2개체가 이입하여 개체수는 19개 감소하였고, 연간 고사율은 2.4%로 나타나 1차 조사와 2차 조사 사이의 연간 고사율에 비해 3배 이상 높았으나 2차 조사 시기와 3차 조사 시기의 연간 고사율보다는 약 48% 경감된 고사율을 나타내었다.

구상나무의 고사율, 이입률 등을 반영한 개체군 성장 모델은 구상나무 개체군의 크기가 점차 감소할 것을 보여주었으며, 특히 2차 조사와 3차 조사 사이의 급격한 개체수 감소로 구상나무 개체군 크기의 감소가 가속화되었다는 것을 알 수 있었다.

따라서 연구대상지의 구상나무 개체군은 크기가 점차 감소하고 있으며, 2차 조사와 3차 조사 사이의 시기인 2010년부터 2016년에 구상나무의 고사가 많이 발생하였다. 이는 지리산국립공원 내 구상나무의 고사가 2014년과 2015년에 많이 발생했다는 선행 연구 결과와 일치한다(김진원 등, 2021). 구상나무의 고사율이 시기에 따른 차이를 보이는 것은 특정 교란의 발생으로 구상나무의 생존에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다.

2. 구상나무 개체군 감소와 교란

현재 많은 연구에서 한반도 내에서 구상나무가 쇠퇴하는 원인을 기후변화에 따른 온도상승과 봄철 강수량 감소로 발생한 수분수지 불균형에 의한 건조 스트레스, 그리고 강풍 및 태풍에 의한 피해로 꼽고 있다(김은식, 1994; 구경아 등, 2001; 서정욱 등, 2019; 구경아와 김다빈, 2020). 따라서 지리산 임결령 지역 구상나무의 개체수가 급격히 감소한 2차 조사와 3차 조사 사이인 2010년부터 2016년 동안 이와 같은 교란이 발생하였을 가능성을 두고 연구대상지의 대기 온도와 강수량, 그리고 지리산 지역의 강풍을 조사하였다.

20년간의 대기 온도를 살펴보면, 대기 온도는 꾸준히 증가하는 것이 아

년 변동(fluctuation)의 형태를 띤다. 다만 2014년과 2015년의 연초 온도가 평균보다 높았던 것으로 확인되었으며, 겨울철 및 봄철 온도가 2010년대 초반에 상승하는 추세를 보였다. 또한 2006년부터 2010년까지 봄철 강수량이 20년 평균보다 낮았다.

그러나 본 연구의 연구대상지와 인접한 임결령 지역에서 구상나무 고사목의 연륜분석을 실시한 서정욱 등(2019)의 연구에 의하면 이 지역의 고사목은 1970년대부터 생육 쇠퇴를 보여오다 2006~2008년 사이에 고사한 경우와 정상적으로 생육하고 있는 개체와 유사한 생장 패턴을 보이다가 2011년에 갑자기 쓰러져 고사한 경우로 나뉜다. 따라서 이상 기온이나 가뭄에 의해 구상나무의 생육 쇠퇴가 이루어질 수 있으나 이 지역에서 이로 인한 구상나무의 고사는 즉각적으로 나타나지 않았다는 것으로 해석할 수 있다. 그러므로 2010년대 초반에 나타난 평균보다 높은 겨울철 및 봄철의 대기 온도 또는 2000년대 후반 봄철의 낮은 강수량을 2010년대 초반 구상나무 고사율 증가의 직접적인 원인으로 보기엔 다소 어려움이 있다.

구상나무의 고사 양상과 고사목 동태를 살펴보면 1차 조사와 2차 조사 사이 고사한 구상나무의 경우 서 있는 상태로 고사한 DS 상태의 개체가 50% 이상을 차지하지만, 그 이후의 조사에서는 부러지거나(DB) 쓰러져 있는(DF) 상태로 고사한 경우가 70% 이상을 차지하고, DS 상태로 있던 고사목들도 2차 조사와 3차 조사 사이, 그리고 3차 조사와 4차 조사 사이 75% 이상이 부러지거나 쓰러진 것으로 나타났다. 이는 구상나무의 고사율이 가장 높았던 시기의 구상나무 고사 양상이 대부분 바람에 의한 피해와 유사한 양상을 띠며, 이 시기에 고사목 대부분이 부러지거나 쓰러진 것 또한 바람의 영향이 있었음을 보여준다.

연구대상지와 같이 고도가 높은 지역의 침엽수림은 바람이 숲의 구조와 동태에 영향을 미치는 주된 요인으로 알려져 있다(Veblen *et al.*, 2001; Dai *et al.* 2011; Zhang *et al.*, 2014; Vozmishcheva *et al.*, 2019). 바람에 의한 수목의 피해는 풍도, 수간 및 가지의 부러짐 등의 직접적인 피해와 바람에 수간이 흔들림에 따라 뿌리와 토양 간의 이격이 생겨 수분 및 양

분의 공급에 어려움을 겪는 간접적인 피해가 있다(Gardiner and Quine, 2000; Nishimura, 2005). 또한 수고가 높고 직경이 큰 대경목이 풍도할 경우 나무가 넘어진 방향에 있는 작은 개체들도 피해를 입을 수 있다. 실제로 연구대상지 내에 이와 같은 피해가 관찰되었으며, 연구대상지 내 구상나무 외 다른 수종도 같은 시기에 연간 고사율이 증가하였다.

또한 구상나무를 비롯한 전나무속 수종들은 천근성 수종으로 바람에 의한 교란에 취약한 것으로 알려져 있다(Jeon *et al.*, 2015). 상층을 우점할 정도로 수고가 높고, 사면에 위치해 있으며, 토심이 얇고, 토양 수분이 포화 상태일 경우 천근성 수종의 풍도 가능성은 더 커진다(Clinton and Baker, 2000).

실제로, 2010년대 초반(2010-2013)은 순간 최대 풍속이 14m/s 이상의 강풍이 발생한 날이 50일 이상으로 지난 20년간 가장 강풍이 자주 일어난 시기인 것으로 나타났으며, 곤파스(2010), 볼라벤(2012) 등 우리나라에 큰 피해를 준 태풍이 발생하고, 한반도에 상륙한 3개의 태풍(카눈, 덴빈, 산바)이 2012년 여름에 집중되어 이 시기에 바람에 의한 피해를 입었을 가능성이 큰 것으로 나타났다.

구상나무의 주요 서식지인 한라산의 구상나무림에서도 강한 태풍이 자주 발생한 2012년에 많은 구상나무가 쓰러져 고사하였으며, 이때 발생한 강한 바람으로 인한 수목의 피해가 구상나무 고사의 직·간접적인 원인으로 작용한 것으로 나타났다(Seo *et al.* 2021).

따라서 구상나무의 고사율이 가장 높았던 시기인 2010년대 초반 본 연구의 연구대상지에서 고사한 구상나무는 대부분 부러지거나 쓰러진 것으로 확인되었으며, 이 시기가 강한 태풍과 잦은 강풍이 발생한 시기가 일치한다는 점과 이상 기온이나 가뭄에 의한 구상나무의 생육 쇠퇴로 인한 구상나무의 고사는 즉각적으로 나타나지 않으며, 구상나무 외 다른 수종도 같은 시기에 고사율이 높았다는 점을 고려한다면 강풍 또는 태풍 등 바람에 의한 물리적인 피해가 이 지역의 2010년 초반 구상나무 고사율 상승의 원인으로 추정된다.

3. 구상나무림의 종 조성 변화

연구대상지 내 구상나무의 진계생장률과 유목 개체수는 연구 기간 동안 큰 변화를 보이지 않았다. 한편 물들메나무, 잣나무, 쇠물푸레나무는 1차 조사에 비해 4차 조사에서 유목의 수가 증가하여 치수 발생이 활발하게 이루어지고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 종 중요도의 변화를 살펴보면, 구상나무는 중요도가 3% 이상 감소하여 다른 교목성 수종이 0.5% 이하의 감소를 한 것과 비교하였을 때 비교적 큰 폭의 감소율을 보였다. 한편 교목성 수종 중에서는 물들메나무, 노각나무가, 아교목성 수종 중에서는 당단풍나무, 함박꽃나무 등이 중요도가 증가하였으며 물들메나무, 당단풍나무는 1% 이상 증가한 것으로 나타났다.

구상나무 성목의 개체수가 감소세를 보이고 있기 때문에 구상나무의 치수 발생과 진계생장률에 변화가 나타나지 않는다면 점차 연구대상지의 임분은 물들메나무, 당단풍나무 등의 활엽수종의 중요도가 증가하는 종 조성의 변화를 보일 것으로 예상된다. 그러므로 임분의 종 조성의 변화 양상을 파악하기 위해서는 면밀하고 장기적인 치수 및 유목의 모니터링이 필요하다.

제 5 장 결 론

본 연구는 우리나라의 고유수종이자 멸종위기 침엽수종인 구상나무의 개체군 동태를 파악하고자 구상나무의 주요 생육지 중 하나인 지리산의 임결령 지역 구상나무 개체군을 대상으로 수행되었다. 장기 모니터링을 통해 2005년부터 2023년까지 구상나무 개체군의 구조를 조사하고, 시기에 따른 개체군 동태의 변화를 파악하였다. 또한 연구대상지의 기상 자료를 분석하여 구상나무의 개체군 동태와 관련지어 살펴보았다.

지리산 임결령 지역의 구상나무는 해당 지역에서 가장 중요도가 높은 우점 수종이지만 2005년부터 2023년까지 구상나무 개체수는 ha당 459본에서 317본으로, 중요도는 28.9%에서 25.1%로 감소하여 구상나무 개체군의 크기가 크게 감소한 것으로 나타났다. 시기별로는 2010년대 초반의 구상나무의 고사율이 가장 높았다.

연구대상지의 기상 자료를 살펴본 결과, 구상나무의 고사가 많이 발생한 시기인 2010년대 초반에 풍속 14m/s 이상의 강풍이 많이 발생하였으며, 볼라벤 등 규모가 큰 태풍이 발생하였다.

구상나무의 고사 시기 및 고사 양상, 수종의 특징, 그리고 강풍 및 태풍 기록을 고려했을 때 2010년대 초반 지리산 임결령 지역의 구상나무 개체수가 급격히 감소한 이유를 태풍과 강한 바람에 의한 교란으로 제시하였다.

본 연구는 장기적인 개체군의 모니터링을 통해 지난 15여 년간의 구상나무 개체군의 개체군 동태를 파악하고, 고사 발생 시기와 원인을 제시하였다. 이를 통해 지리산 지역 구상나무 개체군의 특성을 이해하고, 구상나무 보전 정책 수립과 기후변화 및 교란에 따른 구상나무 개체군의 피해 양상을 예측 및 대비하는 데에 도움을 줄 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 강상준. 1984. 지리산 아고산대 침엽수림의 갱신. 한국생태학회지 7(4): 185-193.
- 공우석. 1999. 한라산의 수직적 기온 분포와 고산식물의 온도적 범위. 대한지리학회지 34(4): 385-393.
- 구경아, 박원규, 공우석. 2001. 한라산 구상나무(*Abies koreana* W.)의 연륜연대학적 연구 -기후변화에 따른 성장변동 분석-. 한국생태학회지 24(5): 281-288.
- 구경아, 김다빈. 2020. 국내 구상나무(*Abies koreana* Wilson) 연구 40년: 검토 및 제언. 한국환경생태학회지 34(5): 358-371.
- 국립공원공단. 2016. 국립공원 아고산대 침엽수림 분포도. 국립공원연구원, 원주.
- 국립공원공단. 2019. 지리산 국립공원 공원자원조사 보고서. 국립공원연구원, 원주.
- 국립생물자원관. 2012. 한국의 멸종위기 야생동·식물 적색자료집 관속식물. 국립생물자원관, 인천.
- 국립수목원. 2017. 국가표준식물목록(개정판). 산림청.
- 국립환경과학원. 2013. 국가장기생태연구 1차 사업 종합보고서: 기후변화, 환경교란과 한반도 생태계 장기연구. 국립환경과학원. 인천
- 권재환, 신민경, 권혜진, 송호경. 2013. 지리산국립공원의 산림식생에 관한 연구. 한국환경복원기술학회지 16(5): 93-118.
- 기상정보개방포털. 2023. 성삼재 방재기상관측(AWS) 자료. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAwsRltnList.do?pgmNo=56> (2023.05.26).
- 김은숙, 이지선, 박고은, 임종환. 2019. 아고산 침엽수림 분포 면적의 20년간 변화 분석. 한국산림과학회지 108(1): 10-20.
- 김은식. 1994. 환경변화와 고산지대 수목성장 쇠퇴현상과의 상관성 해석. 한국과학재단. 대전.

- 김진석, 김태영. 2018. 한국의 나무. 돌베개, 파주.
- 김진원, 전자영, 박홍철. 2021. 국립공원 주요 아고산대 상록침엽수(구상나무, 분비나무) 고사현황 조사: 설악, 덕유, 지리산국립공원을 대상으로. 국립공원연구지 12(2): 79-84.
- 김현욱, 김백조, 남형구, 정종혁, 심재관. 2020. 우리나라 강풍의 기후학적 시공간 변화 특성. 대기 30(1): 47-57.
- 박병주, 김지동, 이준우, 조승완, 허태임, 이동혁, 변준기. 2021. 구상나무림의 종조성과 환경인자간 상관관계. 한국자원식물학회지 34(2): 144-155.
- 박원규, 서정욱. 1999. 지리산 천왕봉지역 구상나무의 연륜기구학적 해석. 한국제4기학회지 13(1): 25-33.
- 박홍철. 2019. 국립공원 주요 아고산대 상록침엽수 분포실태 조사 - 설악, 오대, 태백, 소백, 덕유, 지리산국립공원을 대상으로 -. 국립공원연구지 12(2): 224-231.
- 서정욱, 김요정, 최은비, 박준희, 김재훈. 한라산 영실지역 구상나무 고사연도와 시계열적 생육쇠퇴도 조사. 한국환경복원기술학회지 22(3): 1-14.
- 서정욱, 정현민, 이광희, 박홍철. 지리산국립공원 임결령 구상나무 고사목의 고사연도 분석. 국립공원연구지 10(2): 219-223.
- 엄규백. 1962. 송백류의 분포를 중심으로 하는 한라산의 수직분포대. 식물학회지 5(2): 17-20.
- 오구균, 지용기, 박석곤. 2000. 지리산국립공원 구상나무개체군 동태 -지리산국립공원 동부지역을 중심으로-. 한국환경생태학회지 13(4): 330-339.
- 오순자, 고정균, 김응식, 오문유, 고석찬. 2001. 한라산 구상나무 잎의 엽록소형광의 일변화와 계절적 변화. 한국환경생물학회지 19(1): 43-48.
- 임종환, 김은숙, 박고은, 김용석, 장근창, 한진규, 정성철, 임효인, 이보라, 송우경, 조남현, 윤석희. 2019. 전국 멸종위기 고산 침엽수림 현황과 보전 방안. 국립산림과학원. 서울.

- 장진성, 김휘, 길희영. 2012. 한반도 수목 필드 가이드. 디자인포스트, 파주.
- 장진성, 김휘, 전정일. 2022. 수목학. 디자인포스트, 파주.
- 정길상, 진선덕, 한아름 등. 2018. 제2차 국가장기생태연구. 국립생태원.
- 차중환. 1969. 한라산 식물의 수직분포. 식물학회지 12(4): 19-29.
- Adams, H.S., Stephenson, S.L., Blasing, T.J. and Duvick, D.N. 1985. Growth-trend declines of spruce and fir in Mid-appalachian subalpine forests. *Environmental and Experimental Botany* 25(4): 315-325.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M. and Gonzalez, P. 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.
- Bauman, D., Fortunel, C., Delhaye, G. et al. 2022. Tropical tree mortality has increased with rising atmospheric water stress. *Nature* 608: 528-533.
- Buongiorno, J. and Michie, B.R. 1980. A Matrix Model of Uneven-Aged Forest Management. *Forest Science* 26(4): 609-625.
- Clinton, B.D. and Baker, C.R. 2000. Catastrophic windthrow in the southern Appalachians: characteristics of pits and mounds and initial vegetation responses. *Forest Ecology and Management* 126: 51-60.
- Dai, L., Qi, L., Wang, Q. et al. 2011. Changes in forest structure and composition on Changbai Mountain in Northeast China. *Annals of Forest Science* 68:889-897.
- Diggle, P. 1985. A Kernel Method for Smoothing Point Process Data. *Journal of the Royal Statistical Society* 34(2): 138-147.
- Forzieri, G., Girardello, M., Ceccherini, G., Spinoni, J., Feyen, F., Hartmann, H., Beck, P.S.A., Camps-Valls, G., Chirici, G., Mauri, A. and Cescatti, A. 2021. Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communication* 12: 1081.

- Hernández, L. Cañellas, I., Torres, I and Montes, F. 2014. Assessing changes in species distribution from sequential large-scale forest inventories. *Annals of Forest Sciences* 71: 161-171.
- Hong, J.K., Lim, J., Lee, B.Y. and Kwak, M. Isolation and characterization of novel microsatellites for *Abies koreana* and *A. nephrolepis* (Pinaceae). *Genetics and Molecular Research* 15(2): gmr.15027542.
- IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jang, C., Kim, Y., Ji, S., Ko, E., Yang, J., Jang, C., Eom, J., Yoon, C., Chang, C., Lee, C., Kim, K. and Oh, B. 2007. The Floristic Study of Chirisan National Park in Korea. *Journal of Plant Biology* 37(2): 155-196.
- Jang, W., and Park, P.S. 2010. Stand Structure and Maintenance of *Picea jezoensis* in a Northern Temperate Forest, South Korea. *Journal of Plant Biology* 53(3): 180-189.
- Jeon, M., Lee, K., Choung, Y. 2015. Gap formation and susceptible *Abies* trees to windthrow in the forests of Odaesan National Park. *Journal of Ecology and Environment* 38(2): 175-183.
- Kharuk, V.I., Im, S.T., Petrov, I.A., Dvinskaya, M.L., Fedotova, E.V. and Ranson, K.J. 2017. Fir decline and mortality in the southern Siberian Mountains. *Regional Environmental Change* 17(3): 803-812.
- Kim, Y.S., Chang, C.S., Kim, C.S. and Gardnet, M. 2011. *Abies koreana*, The IUCN Red List of threatened species, version 2014.3. <www.iucnredlist.org> (2023.05.25).
- Kimmins, J.P. 2004. *Forest Ecology: A foundation for Sustainable Forest management and environmental Ethics in Forestry*. Prentice Hall,

New Jersey. USA.

- Koo, K.A., Kong, W., Park, S.U., Lee, J.H., Kim, J., Jung, H. 2017. Sensitivity of Korean fir (*Abies koreana* Wils.), a threatened climate relict species, to increasing temperature at an island subalpine area. *Ecological Modelling* 353: 5–16.
- Kullman, L. 2002. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of Ecology* 90(1): 68–77.
- Lee, B., Park, J., Lee, H., Kim, T.K., Cho, S., Yoon, J., and Kim, H.S. 2020. Changes of Tree Species Composition and Distribution Patterns in Mts. Jiri and Baegun, Republic of Korea over 15 Years. *Forests* 11(2): 186.
- Mathys, A.S., Coops, N.C. and Waring, R.H. An ecoregion assessment of projected tree species vulnerabilities in western North America through the 21st century. *Global Change Biology* 23(2): 920–932.
- Mechinev, T., Apostolova, I., Koleva, E. 2000. Influence of warming on timberline rising: a case study on *Pinus peuce* Griseb in Bulgaria. *Phytocoenologia* 30: 431–438.
- Nishinura, T.B. 2005. Tree characteristics related to stem breakage of *Picea glehnii* and *Abies sachalinensis*. *Forest Ecology and Management* 215: 295–306.
- Parmesan, C. and Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37–42.
- Seo, J., Choi, E., Park, J., Kim, Y., Lim, H. 2021. The Role of Aging and Wind in Inducing Death and/or Growth Reduction in Korean Fir (*Abies koreana* Wilson) on Mt. Halla, Korea. *Atmosphere* 12: 1135.
- Sheil, D., Burslem, D.F.R.P., Alder, D. 1995. The Interpretation and Misinterpretation of Mortality Rate Measures. *Journal of Ecology* 32(2): 331–333.
- Splechtna, B.E., Dobrys, J., Klinka, K. 2000. Tree-ring characteristics of

- subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt) in relation to elevation and climatic fluctuations. *Annals of Forest Science* 57: 89–100.
- Stoyan, D. and Stoyan, H. 1994. *Fractals, random shapes and point fields: methods of geometrical statistics*. Wiley, Chichester.
- Tanaka, N., Nakao, K., Tsuyama, I., Higa, M., Nakazono, E. and Matsui, T. 2012. Predicting the impact of climate change on potential habitats of fir(*Abies*) species in japan and on the East Asian continent. *Procedia Environmental Sciences* 13: 455–466.
- Veblen, T.T, Kulakowski, D., Eisenhart, K.S., Baker, W.L. 2001. Subalpine forest dmanage from a severe windstorm in northern Colorado. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 2089–2097.
- Vozmishcheva, A.S., Bondarchuk, S.N., Gromyko, M.N., Kislov, D.E., Pimenova, E.A., Salo, M.A., Korznikov, K.A., 2019. Strong Disturbance Impact of Tropical Cyclone Lionrock (2016) on Korean Pine-Broadleaved Forest in the Middle Sikhote-Alin Mountain Range, Russian Far East. *Forests* 10: 1017.
- Walther, G.R. 2010. Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365: 2019–2024.
- Wiegand, T., and Moloney, K.A. 2004. Rings, circles and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos* 104: 209–229.
- Wiegand, T. Gunatilleke, S., and Gunatilleke, N. 2007. Species Associations in a Heterogeneous Sri Lankan Dipterocarp Forest. *The American Naturalist* 170(4): E77–E95.
- Wiegand, T. and Moloney, K.A. 2014. *A handbook of spatial point pattern analysis in ecology*. Chapman and Hall/CRC Press, Bova Raton. FL. USA.
- Woo, S.Y., Lim, J.H and Lee, D.K. 2008. Effects of Temperature on Photosynthetic Rates in Korean Fir (*Abies koreana*) between Healthy

and Dieback Population. *Journal of Integrative Plant Biology* 50(2): 190-193.

Zhang, Y., Drobyshev, I., Gao, L., Zhao, X., Bergeron, Y. 2014. Disturbance and regeneration dynamics of a mixed Korean pine dominated forest on Changbai Mountain, North-Eastern China. *Dendrochronologia* 32: 21-31.

Abstract

Dynamics of *Abies koreana*
population in Imgeollyeong area
on Mt. Jirisan

Kwang Hyun Nam

Forest Environmental Science, Department of
Agriculture, Forestry and Bioresources

The Graduate School

Seoul National University

This study was conducted to understand the population dynamics of Korean fir (*Abies koreana*), an endemic coniferous species in Korea. In this study, a 1-ha permanent plot was installed in the Imgeollyeong area in Jirisan National Park and the stand structure were investigated from 2005–2023. Meteorological data were also collected during this period.

The mean elevation of the study site was 1,294 m with predominant aspect being northwest. The study area consisted of valley and slopes. Forty woody species were found in the study site, with *A. koreana* showing the highest importance value (IV). The DBH distribution and height distribution within the study site exhibited an reversed J-shaped

pattern, with *A. koreana* showing the widest distribution range. The spatial distribution of *A. koreana* was found to be influenced by the topography, with higher densities observed on the slopes than in the valley.

Over the study period, the population density of *A. koreana* decreased from 459 stems/ha to 317 stems/ha, and its IV declined from 28.89% to 25.07%. A significant decrease in *A. koreana* density was observed in the 2.5–25 cm DBH class.

The annual mortality rate of *A. koreana* varied across different inventory periods, and the highest annual mortality rate of 4.93% was observed between the 2nd inventory (2009–2013) and the 3rd inventory (2015–2017). Growth models for *A. koreana* population were developed for each period and indicated a decreasing trend in the population size of *A. koreana*.

The health status of *A. koreana* showed a decrease in the proportion of standing alive (AS) individuals and an increase in the proportion of dead standing (DS) individuals. Over 70% of the dead individuals were broken (DB) or fallen individuals (DF) between the 2nd and 4th inventory (2021–2023).

The meteorological data in the Imgeollyeong area from 2003 to 2022 showed the frequency of strong winds exceeding 14m/s was the highest in the period of 2010–2013. Typhoons which damaged the Korean Peninsula severely occurred during this period as well.

This study investigated a long-term monitoring results in the Imgeollyeong area on Mt. Jirisan that was conducted to understand the population dynamics of *A. koreana* over the past 18 years and presented the specific decline status of the population. Furthermore, the study suggested the possibility of wind disturbance as a potential cause of mortality based on the occurrence patterns of strong winds

and typhoons. This study is expected to contribute to the conservation of *A. koreana* on Mt. Jirisan.

Keywords : *Abies koreana*, Jirisan National Park, wind disturbance, long-term ecological monitoring

Student Number : 2021-26279