



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](#)

博士學位論文

한라산 구상나무와 소나무의 시·공간분포에
영향을 미치는 환경요인 연구

Study on Environmental Factors Affecting the Temporal
and Spatial Distribution of *Abies koreana* and *Pinus*
densiflora in Mt. Hallasan

濟州大學校 大學院

農學科

金鍾甲

2022年 2月

한라산 구상나무와 소나무의 시·공간분포에 영향을 미치는 환경요인 연구

指導教授 金 桐 淳

金 鍾 甲

이 論文을 農學 博士學位 論文으로 提出함

2022年 2月

金鍾甲의 農學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長

전영철



委

員

김주성



委

員

고경곤



委

員

이광수



委

員

김등순



濟州大學校 大學院

2022年 2月



목 차

List of Tables	vi
List of Figures	ix
ABSTRACT	xiv
I 서언	1
II 연구사	4
Chapter I . 한라산 구상나무림 시·공간변화	6
1. 서론	6
2. 재료 및 방법	7
1) 조사지 개항	7
2) 구상나무림 분포면적 조사	8
3) 구상나무림의 시·공간분포 분석	9
3. 결과	11
1) 구상나무림 분포 및 수관밀도 변화	11
2) 구상나무림 해발고도별 변화	13
3) 구상나무림의 경사 및 방위별 변화	15
4) 구상나무림 주요 지역별 분포 변화	17
5) 주요 지역별 생육등급 단계 제시	23
4. 고찰	27

Chapter II. 한라산 소나무림 시·공간변화	30
1. 서론	30
2. 재료 및 방법	31
1) 조사지 개항	31
2) 소나무림 분포면적 조사	32
3) 소나무림의 시·공간분포 분석	33
3. 결과	33
1) 소나무림 분포 및 수관밀도 변화	33
2) 소나무림 해발고도별 변화	35
3) 소나무림의 경사 및 방위별 변화	38
4) 소나무림 주요 지역별 분포 변화	40
5) 주요 지역별 생육등급 단계 제시	46
4. 고찰	48
Chapter III. 한라산 침엽교목의 시·공간변화와 환경요인 관계 분석	50
1. 서론	50
2. 재료 및 방법	51
1) 한라산 침엽교목의 공간변화	51

2) 환경 요인 자료	51
(1) 비생물적 환경 요인	52
(2) 생물적 환경 요인	55
3) 환경 요인에 따른 침엽교목립 위협 및 확장지수	55
3. 결과	56
1) 한라산 침엽교목립 공간변화	56
(1) 한라산 침엽교목립 분포 및 수관밀도 변화	56
(2) 해발고도별 한라산 침엽교목립 변화	59
(3) 방위 및 경사별 한라산 침엽교목립 변화	62
2) 환경 요인 분석에 따른 침엽교목립 위협 및 확장지수 산정	64
(1) 비생물적 환경 요인	65
(2) 생물적 환경 요인	93
3) 한라산 침엽교목립 위협 및 확장 지수	105
4) 환경요인에 따른 침엽교목립의 위협 및 확장지수 평가	108
5) 환경요인에 따른 위협 및 확장지수 검증	111
4. 고찰	115
V. 종합고찰	119
VI. 적 요	124
VII. 인용문헌	127
감사의 글	141

List of Tables

Table 1. Criteria of crown density division in Korean fir forest	9
Table 2. Criteria of direction and azimuth range	10
Table 3. Criteria of percent and angle range for slope	10
Table 4. Spatial and temporal changes of Korean fir forest in Mt. Hallasan to 2006, 2015	13
Table 5. Comparison of distribution of Korean fir forest to elevation in Mt. Hallasan	15
Table 6. Comparison of th annual rings of Korean fir in the major regions of Mt. Hallasan	24
Table 7. The growth grads presented in the Korean fir forest of Mt. Hallasan	25
Table 8. Spatial and temporal changes of Korean red pine forest in Mt. Hallasan to 2006, 2015	35
Table 9. Changes of maximum altitude by distribution of Korean red pine forests in main regions of Mt. Hallasan to 2006, 2015 ..	38
Table 10. Growth grades presented in the Korean red pine forest of Mt. Hallasan	47
Table 11. List of automatic weather systems in Mt. Hallasan	52
Table 12. Spatial and temporal changes of coniferous tree in Mt. Hallasan to 2006, 2015	59

Table 13. Changes of coniferous forest to elevation in the Hallasan to 2006, 2015	.....	62
Table 14. Changes of coniferous trees forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015	.....	63
Table 15. Quarterly average precipitation and temperature in Eorimok, Seongpanak and Jeju area	.....	74
Table 16. Typhoons affected Jeju Island from 2000 to 2015	.....	76
Table 17. List of typhoons affected Jeju island from 2002 to 2014	.....	78
Table 18. Comparison of daily average VPD in major region in Mt. Hallasan	.....	82
Table 19. Soil characteristics analyzed from the coniferous forest in Mt. Hallasan	.....	89
Table 20. Soil characteristics analyzed from Korean fir forest at the sites of Mt. Hallasan in 2005, 2010 and 2015	.....	92
Table 21. Soil characteristics analyzed from Korean red pine forest at the sites of Mt. Hallasan in 2010 and 2015	...	92
Table 22. List of major disease in the coniferous forest of Mt. Hallasan	.....	94
Table 23. List of major pests in the coniferous forest in Mt. Hallasan	.....	98
Table 24. Comparison of distribution and undistribution area of Jeju Sasa in Hallasan National Park	.....	100

Table 25. Occupied area and ratio of Jeju Sasa on substratum vegetation according to coniferous type in Mt. Hallasan	.....	101
Table 26. Renewal rate of Korean fir between by Yeongsu and Jindallaeba region in Mt. Hallasan in 2009, 2014 and 2018	.....	104
Table 27. Threat level and index value of coniferous forest in Mt. Hallasan	.....	106
Table 28. Expansion level and index value of coniferous forest in Mt. Hallasan	.....	107
Table 29. Threats and extended range index values for 11 indexes	.....	108
Table 30. The threat and expansion index of Korean fir in the Mt. Hallasan	.....	109
Table 31. The threat and expansion index of Korean Red Pine in the Mt. Hallasan	.....	110
Table 32. Threats and extended range index values for 4 Indexes	.....	111
Table 33. The threat and expansion index of Korean fir at Jindallaeba area in Mt. Hallasan	.....	112
Table 34. The threat and expansion index of Korean fir at Bangaeoreum area in Mt. Hallasan	.....	113
Table 35. The threat and expansion index of Korean red pines at Sogbat area in Mt. Hallasan	.....	113
Table 36. The threat and expansion index of Korean red pines at Gaemideung in Mt. Hallasan	.....	114

List of Figures

Figure 1. Surveyed area of Korean fir in Mt. Hallasan.	8
Figure 2. Crown occupancy pattern of Korean fir to distinguish the crown density in grid.	9
Figure 3. Distribution area of Korean fir forest in Mt. Hallasan in 2015.	11
Figure 4. Distribution area of Korean fir forest in Mt. Hallasan in 2006.	12
Figure 5. Changes of Korean fir forest according to elevation in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	14
Figure 6. Changes of Korean fir forest according to slop in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	16
Figure 7. Changes of Korean fir forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	17
Figure 8. Boundary of main areas classified by slope and distribution situation of Korean fir forest in Mt. Hallasan.	18
Figure 9. Changes of the area of Korean fir forest in major regions of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	19
Figure 10. Changes of Korean fir forest in the Keundeurewat area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	20
Figure 11. Changes of Korean fir forest in the Jindallaebat area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	21

Figure 12. Changes of Korean fir forest in the Yeongsil area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 22
Figure 13. Changes of Korean fir forest in the Bangaeoreum area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 23
Figure 14. Surveyed area of Korean red pine in Mt. Hallasan.	..... 32
Figure 15. Distribution area of Korean red pine forest in Mt. Hallasan in 2015.	..... 34
Figure 16. Distribution area of Korean red pine forest in Mt. Hallasan in 2006.	..... 35
Figure 17. Changes of Korean red pine forest according to elevation in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 36
Figure 18. Changes of crown density of Korean red pine forest according to specific elevation(1,000m~1,400m) in Mt. Hallasan to 2005, 2015.	.. 37
Figure 19. Changes of Korean red pine forest according to slope in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 39
Figure 20. Changes of Korean red pine forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 39
Figure 21. Changes of Korean red pine forest crown density according to specific azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	.. 40
Figure 22. The classification of Korean red pine forest distribution area in Mt. Hallasan.	..... 41
Figure 23. Changes of distribution area of Korean red pine forest in main regions of in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 42

Figure 24. Changes of Korean red pine forest in the Sogbat area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 43
Figure 25. Changes of Korean red pine forest in the Ibseogoreum area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 44
Figure 26. Changes of Korean red pine forest in the Yeongsil area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 45
Figure 27. Changes of Korean red pine forest in the Gaemideung area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 46
Figure 28. Distribution area of coniferous tree in Mt. Hallasan in 2015.	.. 56
Figure 29. Changes of coniferous tree of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 57
Figure 30. Distribution area of coniferous tree in Mt. Hallasan in 2006.	... 58
Figure 31. Changes of coniferous tree according to elevation in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 60
Figure 32. Changes of Korean fir forests and Korean red pine forests to altitude of Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 61
Figure 33. Changes of coniferous trees forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 63
Figure 34. Changes of coniferous trees forest according to slop in Mt. Hallasan to 2006, 2015.	..... 64
Figure 35. Changes of precipitation and average temperature from 2000 to 2015 in Jeju area(Gosan, Seogwipo, Seongsan, Jeju).	..... 66

Figure 36. Changes of quarterly precipitation and average temperature from 2000 to 2015 in Jeju.	67
Figure 37. Changes of average annual temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Seongpanak in Mt. Hallasan.	68
Figure 38. Changes of monthly average temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Seongpanak in Mt. Hallasan.	69
Figure 39. Changes of quarterly precipitation and average temperature from 2000 to 2015 at the Seongpanak in Mt. Hallasan.	70
Figure 40. Changes of average temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan..	71
Figure 41. Changes of monthly average temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan.	72
Figure 42. Changes of quarterly average temperature and average precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan.	73
Figure 43. The path of typhoons affected Jeju island.	77
Figure 44. Change of annual growth of Korean fir from 2000 to 2015 in major region of Mt. Hallasan(Source: Kim et al., 2020).	77
Figure 45. Changes of the standard deviation value to average precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan.	80
Figure 46. Vapor pressure deficit at the Seongpanak in Mt. Hallasan.	83
Figure 47. Vapor pressure deficit at the Jindallaebat in Mt. Hallasan.	84

Figure 48. Vapor pressure deficit at the Witseoreum in Mt. Hallasan.	85
Figure 49. Average insolation in the Korean fir forest of Mt. Hallasan in 2006.	87
Figure 50. Average insolation in the Korean fir forest of Mt. Hallasan in 2015.	88
Figure 51. Distribution and undistributed areas of Jeju Sasa in Hallasan National Park.	99
Figure 52. Distribution of Jeju Sasa and coniferous trees in Mt. Hallasan in 2006 and 2015.	102

ABSTRACT

A grid-based area calculation method was developed using orthoimages of the temporal and spatial changes of Korean Fir (*Abies koreana* E. H. Wilson) and Korean red pine (*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.), evergreen coniferous species, within the Hallasan National Park in 2006 and 2015 to investigate changes in crown density. The factors were then classified into abiotic and biotic factors, and the effects on coniferous forests were measured and classified in terms of time by expressing the degree of threat and expansion as exponential values.

As for the distribution and crown density of the Korean fir in Hallasan National Park, the total area of the coniferous species in 2015 was 626.0 ha, which declined by 15.2 % or approximately 112.3 ha compared to 738.3 ha in 2006. It showed the widest distribution in the section from 1,510 m to 1,700 m and 11°~25° of slop range area in 2015. Crown density was decreased in all density grades.

The total area of the Korean red pine forest in Hallasan National Park was 1,259.9 ha, which increased by 4.1 % or 51.4 ha compared to 1,208.5 ha in 2006. According to the elevation, it showed the widest distribution in the section from 1,010 m to 1,400 m in 2015 with 1,003.0 ha, 79.6 % of the total area. In the case of crown density, high density areas decreased significantly, while the areas of the medium and small densities increased.

As for the temporal and spatial changes of coniferous trees in Hallasan National Park, the total area of which the distribution density accounts for more than 11 % was 1,886 ha in 2015. The small density occupied the highest ratio with 47.8 % of the total area and the total area of coniferous trees in 2006 was 1,946.7 ha, 60.8 ha increase from that of 2015.

The spatial change of coniferous trees in Hallasan National Park was analyzed by collecting and analyzing data from 11 environmental factors; 6 abiotic factors including temperature, precipitation, typhoon, Vapor pressure deficit, insolation, soil and 5 biological environmental factors including disease, pest, Jeju Sasa, wild animals, renewal rate from 2000 to 2015.

The average temperature in the forest area remained fairly steady, but the amount of precipitation gradually increased. The precipitation in Spring, the first and second quarters, steadily increased. It is estimated that the four typhoons that occurred in 2012 deteriorated the growth conditions resulting from strong winds and soil loss due to concentrated rainfall. The daily average vapor pressure differential (VPD) of Seongpanak, Jindallaebat, and Witseoreum is 2.61 hPa, suggesting that the sub-alpine region of the mountain is affected by the marine climate.

In Hallasan National Park, Jeju Sasa is distributed in 146 km², which is 95 % of the total area, 153 km². The distribution of Jeju Sasa in the lower layers of the coniferous forest of Mt. Hallasan was 95.6 % in 2006 and 96.4 % in 2015, which indicates that the management of Jeju Sasa seems urgent as its high density causes root competition and prevents the secondary growth forest.

In order to maintain the forest, it is necessary to generate more seedlings than dead trees. Although Korean red pines dominate the upper layers of Yeongsil pine forest, no young pines have been reported.

11 elements, abiotic and biotic environmental factors that affect the area of the community, have been identified. The degree of threat and expansion was classified into temporary, short-term, and long-term factors in the temporal concept with index values allocated and greater significance or weight was assigned to key elements that influence the degree of likelihood of risk, expansion or reduction in size. This is because it is subject to error or controversy to determine a single factor as the cause of the decline and expansion of the coniferous forest in Mt. Hallasan. When investigating the

expansion and decline of forests, a numerical method was developed and applied based on major environmental factors.

In terms of the threat and expansion index range, it was analyzed that the Korean fir forest is in the short-term threat range while the Korean red pine forest is in the short-term expansion range.

These expansion or threat index evaluations are expected to be an effective approach for finding the characteristics of coniferous expansion and threat factors under the condition that biological factors are monitored along with the continuous measurement of reliable environmental factor in the target area.

I 서언

제주도의 식물은 대륙으로부터 남하한 식물군, 중국과 일본에 걸쳐서 분포하는 식물군, 열대·아열대 기원의 식물군, 타이완 그리고 일본에서 분화한 식물군 등 다양한 요소를 반영하는 식물들로 구성되면서 면적에 비하여 많은 종이 분포하게 된 것을 볼 수 있다(Im, 1992).

제주도의 식물은 한라산을 중심으로 식생대의 수직분포가 뚜렷하며 방위에 따라서 다소 차이가 있지만 대체로 600m까지는 난대 상록활엽수림대, 해발 600m~1,400m는 온대 낙엽활엽수림대, 해발 1,400m~1,950m는 아한대 또는 아고산대 식생으로 구분된다(Yim et al., 1990).

제주도의 산림면적은 87,334ha인데, 이는 우리나라의 산림면적 6,286,438ha의 1.4%에 해당된다. 제주도 산림의 평균 임목축적은 149.53m³/ha로 전국 평균인 165.18m³/ha보다 적다. 제주도 내 침엽수의 면적은 21,603ha로 우리나라 침엽수 면적 2,319,832ha중 0.9% 정도를 차지하며, 제주도 산림의 24%를 차지하지만 전국 평균인 36.9%보다는 매우 낮은 상황이다(Korea Forest Service, 2021).

제주도에 분포하는 침엽수 중 한라산국립공원에 자생하거나 식재된 침엽수는 3과 9종이다. 자생수종은 구상나무(*Abies koreana* E. H. Wilson), 주목(*Taxus cuspidata* Siebold & Zucc.), 눈향나무(*Juniperus chinensis* var. *sargentii* A. Henry), 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.), 비자나무(*Torreya nucifera* (L.) Siebold & Zucc.), 곰솔(*Pinus thunbergii* Parl.)이며, 식재수종으로는 삼나무(*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don), 일본잎갈나무(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière), 편백(*Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl.)이다. 식재수종 중 일본잎갈나무는 1960년대 국유림지역(제주시 애월읍 광령리 산 183-2번지) 1100도로변에 식재되었다(Jeju Special Self-Governing Province, 2006).

구상나무는 우리나라를 대표하는 침엽수 중에 하나로 잎이 성계의 가시와 흡사하다는 데 기인하여 제주방언인 ‘쿠살나무’에서 유래한 것으로 추정하고 있다(Kim et al., 2007). 구상나무에 대한 현대식 명칭에 대한 최초의 기록은 1937년에 출판된 조선식물향명집이다(Jeong et al., 1937).

구상나무는 1915년 나카이(中井)의 지리산 식물조사보고서와 제주도 식물조사보고서에 분비나무(*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.)로 기록되었으나, 1920년 윌슨(E. H. Wilson)에 의하여 새로운 종임을 발견하고 당시 수집한 기준표본(No. 9486a)으로 구상나무라고 분류하였다(Kim et al., 2007).

구상나무는 한라산을 포함하여 가야산, 금원산, 덕유산, 백운산, 속리산, 영축산, 지리산 등 고산 및 아고산대에 한정되어 분포하는 우리나라 특산식물로(Korea National Arboretum, 2014) 기후변화에 취약한 종으로 평가되고 있다(Kong et al., 2014). 또한 최근 기후변화로 개체군이 줄어들고 있어 세계자연보전연맹(IUCN)에서 멸종위기종(endangered species)으로 지정되었다(Kim and Choi, 2012).

구상나무 고사에 따른 쇠퇴 원인 규명에 관한 연구가 활발히 이루어졌는데, 수분 스트레스와 풍해에 의한 물리적 피해 등 여러 가지 원인이 제시되어 왔다(Kim and Choo, 2000; Kong, 1998, 2006; Lim et al., 2006; Kim et al., 2007; Song et al., 2010). 지난 40여 년 동안 구상나무와 관련된 다방면의 연구가 진행되어 왔으며, 쇠퇴와 고사에 대한 원인으로 다양하게 제시되었으나, 명확하게 규명되지 않고 있다. 더욱이 구상나무 개체군동태에 대한 임분구조 등의 연구가 한 산지 또는 특정 지역에 국한되어 있어 전반적인 구상나무의 생육환경과 종 구성에 대한 상호관계에 관한 데이터가 미흡한 실정이다(Koo and Kim, 2020).

소나무는 우리나라의 국민성을 대표할 뿐만 아니라, 일상생활이나 문화와 역사적 관점에서 매우 중요한 요소로 인식되고 있다(Heo, 2004; Lee, 2006). 소나무류는 북미대륙에 65여 종 이상, 그리고 유라시아 대륙에 40여 종이 분포하고 있다. 위도상으로 열대의 수마트라섬이나 아열대의 바하마와 쿠바에서도 몇몇 종이 생육하지만, 북위 36도 부근에서 가장 많은 40여 종의 소나무류가 생육한다. 중국에 22종, 일본에 6종, 한반도에는 소나무, 곰솔, 잣나무(*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.), 섬잣나무(*Pinus parviflora* Siebold & Zucc.), 눈잣나무(*Pinus pumila* (Pall.) Regel), 만주곰솔(*Pinus tabulaeformis* var. *mukdensis* (Uyeki ex Nakai) Uyeki)) 등 6종이 자생하고 있으며 몇몇 소나무류는 이들 세 나라에 공통으로 자생한다(Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do, 2015).

우리나라 산림지역에 분포하는 대표적인 수종으로 전체 산림의 25% 정도를 차지하는 소나무는 현재 지속적으로 감소하는 추세에 있다(Korea Forest Service,

2014). 이는 소나무재선충, 솔잎혹파리 등의 병해충과 산불피해로 인한 분포면적의 감소, 기후변화에 기인한 자연 천이 과정 중에 참나무류 등 낙엽활엽수종의 세력 확대에 의한 쇠퇴(Kwon, 2003), 또한 산림토양 내 비옥도가 높아질 경우 낙엽활엽수림으로 천이가 진행되면서 결국 소나무림은 국소적인 분포를 할 수밖에 없는데 기인할 수 있다(Seo et al., 2013).

제주도에서 소나무는 대부분 한라산국립공원 내에 분포하는데 이들 소나무림의 분포는 대부분 낙엽활엽수림과 경계를 이루고 있어 오랫동안 소나무림 확산이 일어나지 않고 있다. 그러나 소나무림 경계 지역이 제주조릿대(*Sasa quepaertensis* Nakai), 시로미(*Empetrum nigrum* L. subsp. *asiaticum* (Nakai ex H. Itô) Kuvaev), 눈향나무 등이 우점하고 있는 초지나 관목림이 형성된 아고산대 지역은 소나무림 확산 가능성이 매우 높을 것으로 추정되며, 소나무의 치수가 높은 밀도로 발견되고 있다(Lee, 2013).

본 연구는 원격 탐사자료를 이용하여 한라산의 대표적인 침엽수인 구상나무와 소나무의 분포 및 시·공간변화를 알아보고 환경적인 요인에 대한 분석을 통해 침엽수림의 위협과 확장에 환경요인의 관계를 지수값으로 표현하여 침엽수림의 변화의 예측모델링을 시간적으로 제시하고자 하였다.

II 연구사

한라산 구상나무림의 분포에 대한 연구는 2003년 항공사진분석을 통해 한라산 사면에 따라 다소 차이는 있으나 해발 약 1,300m부터 정상까지 분포하고 있으며, 그 면적은 603.3ha라고 보고하였다(Kim, 2006). 그리고 해발 1,500m에서 1,800m 사이에 전체면적의 87.4%에 해당하는 526.9ha가 형성되었고, 방위 별로는 동쪽과 북쪽 사면에 걸친 지역에 집중되어 있다고 하였다. Song(2011)은 2009년 2월에 촬영된 항공사진을 이용하여 한라산 구상나무림은 해발 1,300m 구간에서부터 정상까지 분포하고 있으며, 면적이 1.0ha 미만의 소규모 집단을 제외하면 전체면적은 803.6ha 이상인 것으로 보고하였다. 더불어 동사면은 해발고도 1,300m, 서사면과 남사면은 1,400m, 북사면은 1,500m부터 구상나무림이 분포하며, 20° 미만의 경사도에 전체의 약 70%가 분포한다고 제시하였다. 그리고 Kim과 Lee(2013)는 1988년과 2002년 Landsat 위성을 사용하여 분석한 결과에 따르면 1998년에는 175ha, 2002년에는 117ha가 조사되었다고 보고한 바가 있다. 이처럼 한라산 구상나무림의 면적은 산출 방법 등에 따라 많은 차이를 보이고 있다.

한편, 한라산 구상나무는 광범위하게 성장 쇠퇴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이들 성장 쇠퇴는 태풍, 가뭄이 주요 원인으로 제시되었을 뿐만 아니라 지속적인 기온상승도 영향을 주는 것으로 보고되었다(Kang, 1984; Kim, 1994; Koo et al., 2001; Song et al., 2016). 특히 겨울 기온의 상승이 성장 쇠퇴에 영향을 주는데, 이는 겨울 기온이 상승하는 경우 상록수는 광합성을 할 수 있는 조건이 충족되거나 광합성에 필요한 수분공급이 부족하여 수분 수지의 불균형이 발생하고 성장에 악영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Koo et al., 2001). 그리고 고산지대에 자라는 식물은 낮은 온도, 가뭄, 강한 바람, 서리 등 극한 환경에 노출되어 있어, 이들 환경적 요인에 의해 영향을 많이 받는다고 볼 수 있다(Wildi and Lutz, 1996).

더욱이 구상나무와 같은 과거 빙하기에 존재했던 식생은 산간 지역에서 수직적 기온상승에 민감하게 반응하여 고사하거나 군락 지역에 타 수종 특히, 아고산대 전이지역에 분포하는 신갈나무(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) 군락 같은 식생

의 이입이 일어나고 있는 상황이다(Cho, 2014).

한라산 소나무림 면적은 Sin(1981)이 항공사진을 분석하여 소나무 군락을 추출하고, 이를 고도와 방위별로 12개 지역으로 나누어 조사하여 소나무림 분포 형태로 표현하였다. 이를 통해 나타난 사면별 분포와 해발고도를 보면 동사면은 1,050m~1,150m, 남사면이 650m~1,400m, 서북 서사면이 700m~1,450m, 북사면이 750m~1,350m로 보고하였다. 이들 분포는 정상에서 평면 거리로 동사면이 5.5km, 남북사면이 5.0km, 서사면이 7.0km로 나타났다고 제시하였다. 그리고 Song et al.(2012)은 2009년 2월과 9월에 촬영된 항공사진 분석을 통해 백록담을 중심으로 지역별로 지형적인 특징과 지리적 격리로 인해 독립된 소나무 군락을 형성하고 있고, 해발 가장 낮은 약 640m 아흔아홉골 지역부터 1,500m 개미등까지 분포하고 있으며, 그 면적은 1,324ha라고 보고하였다. 또한 해발고도 1,000m에서 1,400m 사이에 전체면적의 82.7%에 해당하는 1,095ha가 형성되었고, 지역별로는 성판악 일대 148.7ha, 개미등 일대 213.4ha, 1100도로 일대 111.3ha, 영실 일대 314.9ha, 돈내코 일대 472.7ha, 아흔아홉골 일대 63.3ha가 분포한다고 하였다.

제주특별자치도(2017)는 5차 임상도를 바탕으로 한라산국립공원 구역 내 소나무 임상도를 구획하여 산출한 결과, 면적은 461.8ha라고 보고하였다. 이들 소나무 면적을 고도별로 보면 해발고도 1,000m까지는 고도와 임상의 면적(39.9ha)에 상관관계가 없는 것으로 보이나 해발 1,000m 이상의 고도에서는 분포면적(421.8ha)이 넓어지는 현상이 나타난다고 분석하였다.

한편, 한라산 소나무림 대부분이 낙엽활엽수림과 경계를 이루고 있어 면적 확대가 이루어지지 않고 있으며(Song et al., 2012), 기후변화 등의 원인으로 상록활엽수의 확산으로 소나무림은 점점 그 세력이 약해질 것으로 예상하였다(Lee et al., 2018). 또한 기온상승에 따른 수분결핍이 증가하여 결국 생장과 생리 반응에 영향을 주는 가뭄과 연관된 기후환경이 소나무림의 감소를 가져올 것으로 예상하고 있다(Lee et al., 2004; Kim et al., 2014). 이에 반해 한라산 소나무림은 서사면 사제비동산과 남사면 평계대피소 지역의 초지대와 관목림 지역에서 급속히 확산하고 있으며, 기온상승으로 한라산 고지대 지역에 소나무림이 확산할 수 있는 공간이 확보된다면 확산 가능성이 매우 높다고 하였다(Song et al., 2012).

Chapter I . 한라산 구상나무림 공간변화

1. 서론

구상나무(*Abies koreana* E. H. Wilson)는 1920년에 우리나라의 특산식물로 보고된 종으로 현재는 지리산(1,050m~1,900m), 한라산(1,000m~1,950m), 덕유산(1,350m~1,590m) 그리고 가야산(1,350m~1,420m) 등 국립공원의 정상부나 산 능선의 암석 지대에서 대부분 서식하고 있는 것으로 확인되었다(Korea National Park Service, 2014). 하지만 한라산을 제외한 대부분의 자생지에는 소규모 면적의 숲이거나 소수의 개체만이 드물게 분포한다. 이에 비해 한라산에는 광대한 면적의 순림이 형성되어 있으며, 세계에서 유일한 구상나무림이 분포하고 있다(Kong, 2006; Kim et al., 2007; Song, 2011).

구상나무의 품종에는 구과가 녹갈색인 구상나무(*Abies koreana* Wils. for. *koreana*), 구과 및 포가 초록색인 푸른구상나무(*Abies koreana* Wils. for. *chlorocarpa* T. Lee), 구과 및 포가 자주빛 또는 갈색구인 붉은구상나무(*Abies koreana* Wils. for. *rubrocarpa* T. Lee), 구과 및 포가 검은 자주빛인 검구상나무(*Abies koreana* Wils. for. *nigrocarpa* Hatus)로 구분한다(Lee, 1970).

구상나무에 관한 생태학적 연구는 지난 40년간 진화생태연구(Evolutionary Ecology), 생리생태연구(Physiological Ecology), 개체군생태연구(Population Ecology), 경관생태연구(Landscape Ecology) 등 다양한 분야에서 수행되었으며, 많은 연구자가 각 분야에서 구상나무 서식지 및 개체 수 감소, 고사목 증가, 생육쇠퇴에 대한 현상을 분석하고 이에 대한 원인을 규명하고자 하였다(Koo et al., 2020).

Koo et al.(2001)은 과거 기후 요소와 연륜 성장량을 비교하여 구상나무의 쇠퇴와의 연관성을 밝혔으며, Kong(1984)은 한라산에서 발생하는 기온 분포의 차이와 몇 가지 고산식물의 분포와의 연관성을 밝혀 한라산 고산식물의 미래를 논하기도 하였다.

1990년 이후부터 다양한 통계적 기법과 분포 예측 모델링, 지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS), 원격탐사(Remote Sensing, RS) 분석 등을 활용하여 구상나무 분포를 예측하고 서식지 환경 특성을 규명함으로써 서식지 감소 및 감소 원인을 찾는 연구들이 활발히 수행되고 있다(Park, 1990; Koo et al. 2001; Kim and Lee., 2013; Park et al., 2015; Koo et al., 2016; Kim et al., 2017; Ahn et al., 2019; Koo et al., 2020).

그러나 한라산 구상나무림의 공간분포에 대해 특정한 시점에서의 면적이나 분포특성은 제시되고 있으나 동일한 방법을 통한 시공간적인 변화에 대한 연구접근은 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구는 2006년과 2015년을 기준으로 10년 동안의 한라산에 분포하는 구상나무림의 정확한 면적변화를 조사하고, 분포지역의 해발고도, 방위, 경사 등의 특성을 알아보고자 수관밀도에 따라 4개 등급으로 구분하여 비교 분석하였다. 이는 구상나무림의 변화조사를 통해 시·공간적 변화 원인을 파악하고, 향후 구상나무 보전연구의 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

1) 조사지 개황

한라산 구상나무(*Abies koreana* E. H. Wilson, Korean fir)는 해발 1,300m부터 정상 화구벽까지 분포하고 있어 백록담을 중심으로 구분되어 있는 등산로를 따라 구상나무 수관밀도를 분석하였다. 즉, 동쪽으로 성관악등산로를 중심으로 진달래밭과 왕관릉을 포함하는 지역으로, 서쪽으로는 영실등산로를 중심으로 윗세오름, 만세동산과 선작지왓을 포함하는 지역으로, 북쪽으로는 어리목등산로를 중심으로 큰두레왓, 장구목, 백록담과 삼각봉을 포함하는 지역으로, 남쪽으로는 남벽등산로를 중심으로 방애오름, 옷방애오름, 알방애오름을 포함하여 지역으로 구분하여 분석하였다(Figure 1).

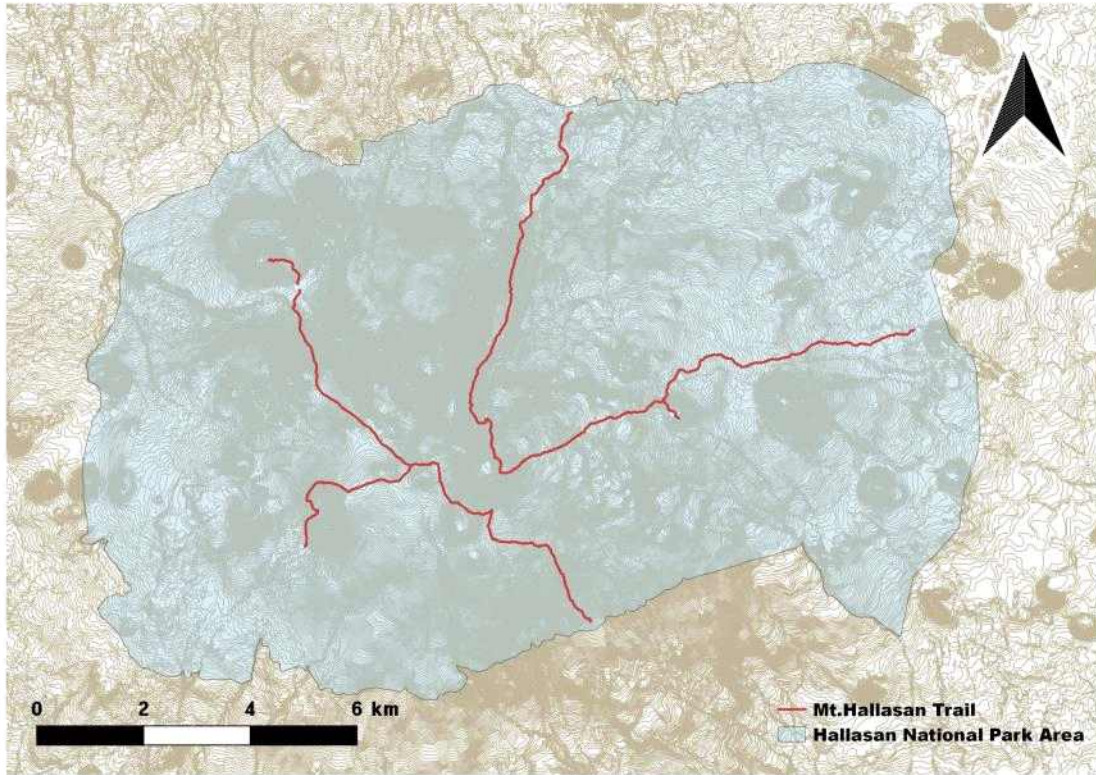


Figure 1. Surveyed area of Korean fir in Mt. Hallasan.

2) 구상나무림 분포면적 조사

한라산 구상나무림 분포면적은 국토지리정보원에서 제공받은 2006년 4월에 촬영된 30cm급 정사영상과 2015년 11월에 촬영된 25cm급 정사영상을 이용하여 구상나무의 수관밀도분포를 확인하였다. 또한 다른 수목과 구분이 불확실한 지역은 2015년 10월부터 2016년 11월까지 현지조사를 통해 보강하였다.

구상나무림의 면적 및 수관점유 밀도 분석은 Kim et al.(2017)이 제시한 격자기반 면적산출 방법을 적용하였다. 격자기반 면적산출방법은 AUTO CAD Map 3D 2010 프로그램을 이용하여 정사영상 레이어(layer)에 15m×15m의 크기로 격자로 나눈 레이어를 추가하고, 격자 내에 영상으로 구분되는 구상나무 수관의 점유밀도를 구분하여 색상코드로 부여한 후 ArcGIS 프로그램을 이용하여 분석하였다. 이는 구상나무림의 경계구역을 명확하게 제시하고 격자별 수관점유밀도와 울폐정도에 따라 4개 등급으로 구분하여 표현한 것이다(Korea Forest Research Institute, 2011; Figure 2, Table 1). 단, 수관밀도가 10% 이하에 해당되는 지역은 구상나무림의 면적에서 제

외시켰다.

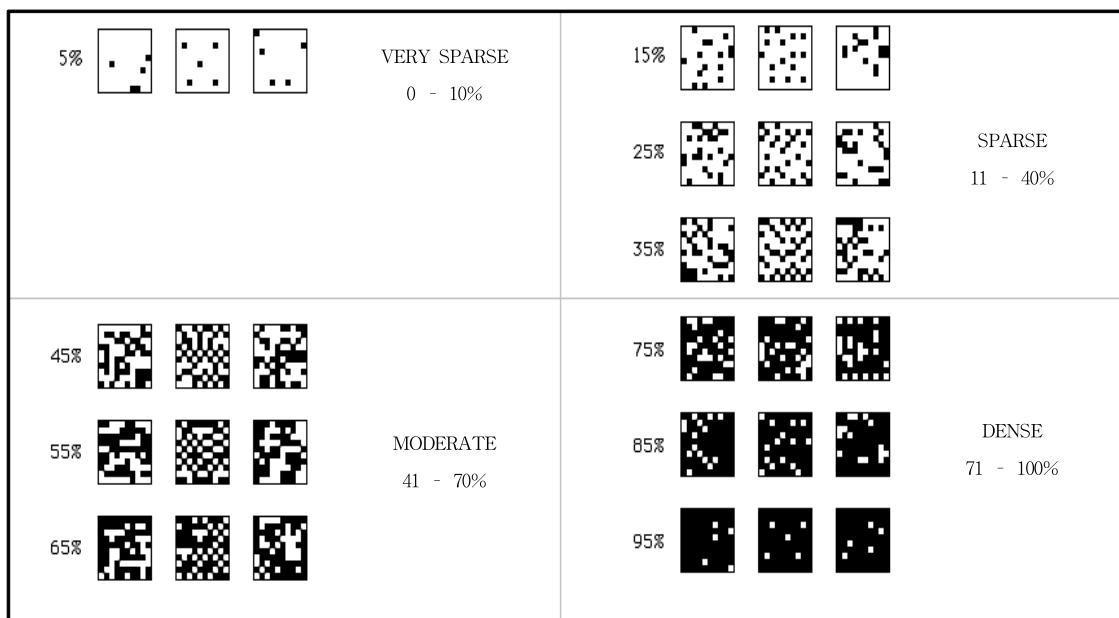


Figure 2. Crown occupancy pattern of Korean fir to distinguish the crown density in grid.

3) 구상나무림의 시·공간분포 분석

한라산 구상나무림의 10년 동안의 공간분포 특성변화를 알아보기 위해 2006년과 2015년의 항공정사영상을 AUTO CAD Map 프로그램을 이용하여 구상나무 분포가 확인된 지역의 수관밀도별 색상코드를 부여한 후 ArcGIS을 이용하여 분석하였다 (Table 1).

Table 1. Criteria of crown density division in Korean fir forest

Crown density of Korean fir	Division	Color coding
0~10%	Very sparse	None
11~40%	Sparse	Yellow
41~70%	Moderate	Orange
71~100%	Dense	Red

분포면적 변화는 해발고도, 방위 및 사면을 중심으로 하였으며, 한라산 주요 4개 지역으로 구분하여 분석하였다. 해발고도에 따른 분포는 해발고도 10m 단위로 조사한 후 해발고도 100m 단위로 구분하여 제시하였고, 방위 분석은 전체방위를 45°로 나누어 8개 방위로 구분하여 시·공간변화를 분석하였다(Table 2). 또한 경사도는 ArcGIS로 분석된 9단계를 수정하여 각도와 백분율을 5단계로 구분하여 실시하였다 (Table 3).

Table 2. Criteria of direction and azimuth range

Direction	Azimuth range
Flat	No slope
North	0 ~ 22.5°
Northeast	22.6 ~ 67.5°
East	67.6 ~ 112.5°
Southeast	112.6 ~ 157.5°
South	157.6 ~ 202.5°
Southwest	202.6 ~ 247.5°
West	247.6 ~ 292.5°
Northwest	292.6 ~ 337.5°
North	337.6 ~ 360.0°

Table 3. Criteria of percent and angle range for slope

Percent range	Degree range
0 ~ 9%	5°
11 ~ 18%	6 ~ 10°
19 ~ 47%	11 ~ 25°
48 ~ 100%	26 ~ 45°
Over 100%	Over 45°

3. 결과

1) 한라산 구상나무림 분포 및 수관밀도 변화

2015년 항공정사영상을 이용하여 한라산 일대 구상나무 분포도를 작성하여 분석한 결과, 구상나무의 수관분포 밀도가 11% 이상을 차지하는 전체 면적은 해발 1,310m 이상 지역에 626.0ha로 나타났다(Figure 3, Table 4).

이중 수관분포 면적이 15m×15m 격자에 11%~40% 범위에 포함되는 소밀도 등급 면적은 전체 면적의 50.5%에 해당되는 316.2ha로 가장 높은 비율을 차지하였다. 수관밀도가 41%~70%에 해당되는 중밀도 면적은 253.1ha도 전체 분포면적의 40.4%로 나타났다. 71% 이상의 수관밀도를 지닌 조밀도 면적은 전체 면적의 9.1%인 56.7ha로 분석되었다.

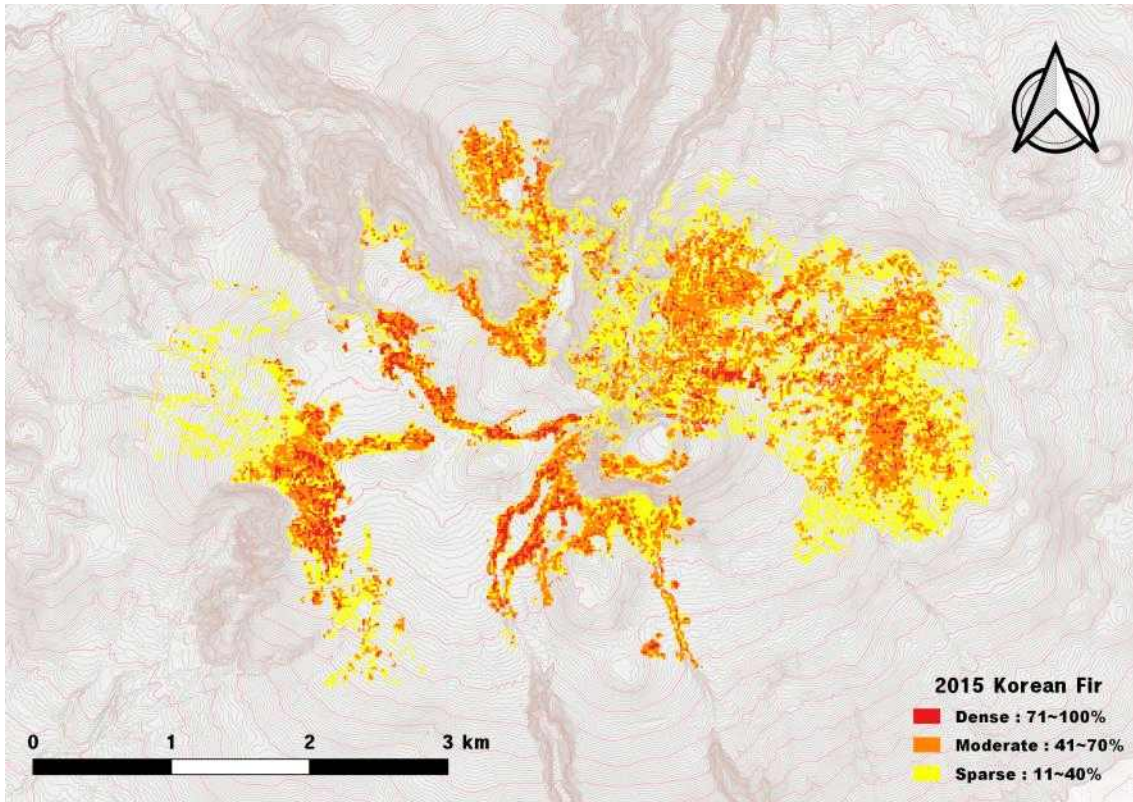


Figure 3. Distribution area of Korean fir forest in Mt. Hallasan in 2015.

이에 비해 2006년도에는 구상나무림이 해발 1,290m 이상 지역에 수관밀도 11% 이상을 차지하는 전체면적은 738.3ha가 분포하는 것으로 분석되었다(Figure 4).

이를 구상나무림의 수관분포 밀도를 기준으로 등급별로 보면 소밀도 면적은 전체 면적의 45.3%인 334.3ha로 가장 높은 비율을 차지하였고, 중밀도 면적은 44.2%에 해당되는 326.0ha, 수관밀도 등급이 조밀도인 면적은 78.0ha로 전체면적의 10.6% 분포를 나타냈다.

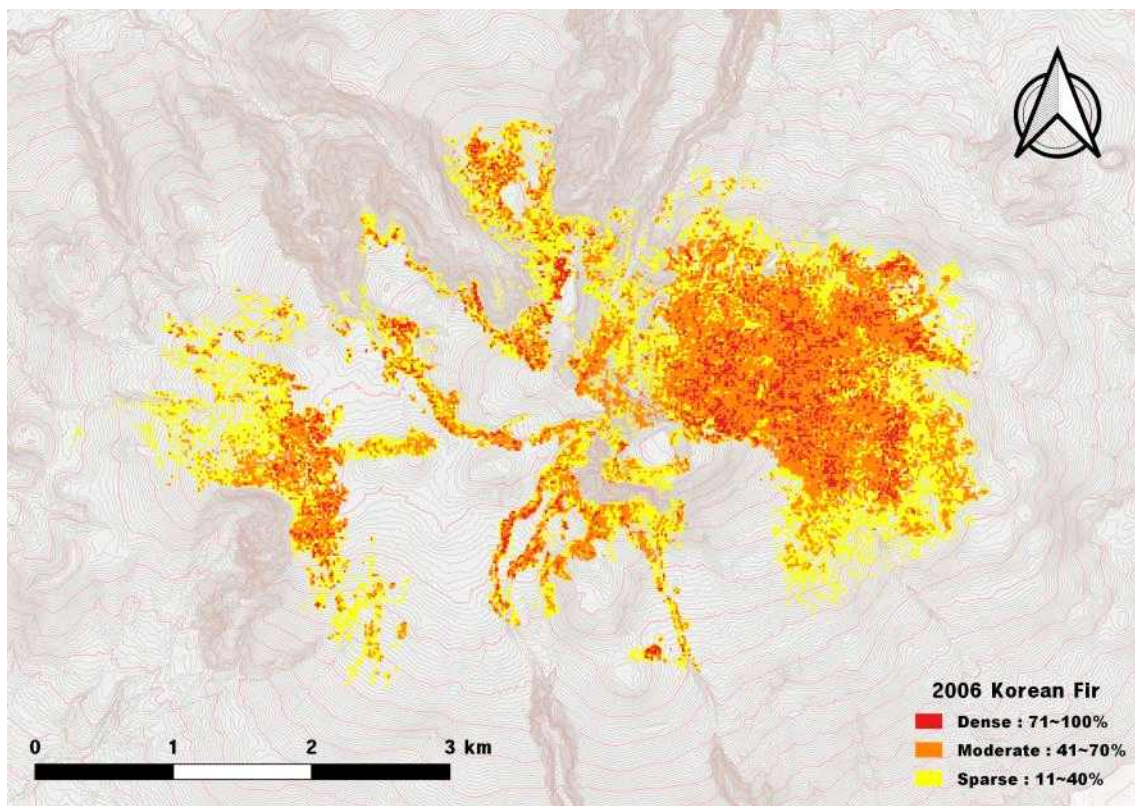


Figure 4. Distribution area of Korean fir forest in Mt. Hallasan in 2006.

전체적으로 한라산 구상나무림은 정상을 중심으로 동사면과 북사면에 가장 넓은 분포 지역을 가지면서 서사면, 남사면 순으로 분포면적이 감소하는 경향을 보였다. 이는 한라산의 사면에 따라 일조량과 수분보유능력의 차이에서 구상나무림의 발달과 연관이 높다는 보고(Kim, 2006)와 유사한 경향을 보여준다. 즉, 일조량이 적은 지역이거나 수분이 충분히 유지되는 지역에 구상나무림의 형성이 더욱 발달하는 것으로 보인다.

구상나무림의 수관밀도에 따른 면적변화를 보면, 수관밀도 11% 이상 되는 전체적인 면적은 2015년이 2006년에 비해 15.2%에 해당되는 112.3ha가 감소된 것으로 나타났다(Table 4). 특히, 중밀도에서 10년 동안 가장 넓은 면적인 72.9ha의 감소를 보였고, 상대적인 변화율은 고밀도에서 27.3%에 해당되는 21.3ha가 감소되어 가장 높게 나타났다. 또한 저밀도에서 5.4%에 해당되는 18.1ha가 감소된 것으로 분석되었다.

Table 4. Spatial and temporal changes of Korean fir forest in Mt. Hallasan to 2006, 2015

Crown density	Area(ha)		Area change(ha)	Change ratio(%)
	2006	2015		
Sparse	334.3	316.2	-18.1	-5.4
Moderate	326.0	253.1	-72.9	-22.4
Dense	78.0	56.7	-21.3	-27.3
Total	738.3	626.0	-112.3	-15.2

2) 구상나무림 해발고도별 변화

한라산 해발고도에 따른 구상나무림 분포면적은 2015년에는 해발 1,510m~1,600m 구간에 전체 면적의 40.1%인 251.3ha로 가장 넓었으며, 이 구간을 중심으로 해발 1,500m 이하 지역의 면적은 8.7%에 해당되는 54.4ha인 반면에 해발 1,610m 이상에서는 51.2%인 320.3ha가 분포하는 것으로 조사되었다(Figure 5). 특히, 해발 1,510m~1,700m 사이에 구상나무가 전체의 74.6%인 466.9ha가 분포하는 것으로 나타났다.

2006년에도 2015년과 유사한 해발고도별 분포경향을 보였는데, 해발 1,510m~1,600m 구간이 전체 면적의 39%인 287.8ha로 가장 넓었다. 이 구간을 중심으로 해발 1,500m 이하 지역의 면적 비율이 10.2%에 해당되는 75.2ha인 반면에 해발 1,610m 이상은 50.8%인 375.3ha가 분포하는 것으로 나타났다.

한라산 외 구상나무 자생지인 지리산과 속리산의 구상나무는 지형적인 특성과 위도 차에 의해서 자생지 평균 해발고도는 1,266m(804m±1,825m)였으며 지리산 구상

나무 자생지 평균 해발고도는 1,319m이며 속리산은 967m였다(Kim and Oh, 2016).

이와 같이 한라산의 구상나무림은 육지부의 다른 지역보다 다소 높은 위치에 집중적으로 분포하는 특성을 보이고 있다.

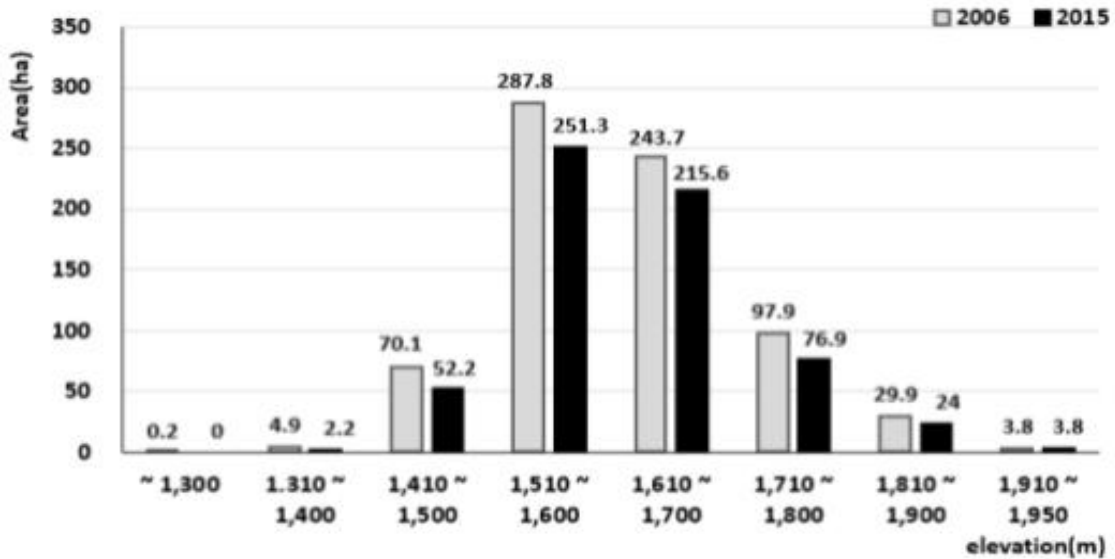


Figure 5. Changes of Korean fir forest according to elevation in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

한라산 구상나무림이 분포하는 해발 1,300m 이상 아고산대 지역에서 해발 고도별 구상나무림이 점유하는 면적을 알아보기 위해, 구상나무림 면적과 한라산 해발고도별 면적으로 상대분포율(Relative Distribution Rate)을 분석하였다(Table 5).

2006년은 해발 1,710m~1,800m 구간의 면적대비 구상나무림이 차지하는 비율이 53.21%로 가장 높았으며, 다음으로 해발 1,810m~1,900m 구간이 46.00%, 해발 1,610m~1,700m 구간이 45.47% 순으로 조사되었다. 이에 반해 해발 1,310m~1,400m 구간은 0.59%로 매우 낮게 나타났다. 해발고도에 따라 해발 1,310m부터 해발 1,800m까지는 면적대비 구상나무림의 상대분포율이 높아지다가 해발 1,810m 이상부터는 감소하는 경향을 보였다.

2015년에는 2006년과 동일한 경향을 보였는데, 해발 1,710m~1,800m 구간이 41.79%로 가장 높았으며 다음단계로 해발 1,610m~1,700m 구간이 40.22%로 조사되었다.

2015년에도 2006년과 유사하게 해발 1,510m부터 해발 1,900m까지가 구상나무림의

면적에 대한 상대적 분포비율이 높게 나타나는 경향을 보였지만, 10년 동안의 상대적인 감소율은 다소 차이를 보였다. 즉, 해발 1,710m~1,800m 구간이 상대적분포율이 11.42%, 해발 1,810m~1,900m 구간이 9.08%, 해발 1,510m~1,600m 구간이 5.46%, 해발 1,610m~1,700m 구간이 5.25%로 순으로 높게 감소되었다. 이는 10년 동안 구상나무림의 점유비율이 높은 곳에서 많은 변화가 이루어졌다는 것을 의미한다. 또한 10년 동안 한라산 해발 1,810m~1,900m 구간의 구상나무림 점유비율이 많이 낮아지면서, 구상나무림의 상대적인 점유비율이 높은 해발고도가 2006년에 해발 1,610m~1,900m 구간에서 2015년에는 해발 1,510m~1,800m 구간으로 변화되는 경향도 나타났다. 다만 2006년과 2015년의 상대적인 분포비율의 상대적인 감소는 해발이 낮은 1,310m~1,400m에서 가장 높게 나타나는 특성도 보였다.

Table 5. Comparison of distribution of Korean fir forest to elevation in Mt. Hallasan

Elevation(m)	Year	1,310	1,410	1,510	1,610	1,710	1,810	1,910	Total
		~ 1,400	~ 1,500	~ 1,600	~ 1,700	~ 1,800	~ 1,900	~ 1,950	
Area(km ²)	2006	0.051	0.701	2.878	2.437	0.979	0.299	0.038	7.383
	2015	0.022	0.522	2.513	2.156	0.769	0.240	0.038	6.260
RDR(%)	2006	0.59	10.75	43.08	45.47	53.21	46.00	27.14	24.70
	2015	0.25	8.01	37.62	40.22	41.79	36.92	27.14	20.94
Ht. Hallasan Area(km ²)		8.70	6.52	6.68	5.36	1.84	0.65	0.14	29.89

3) 구상나무림의 경사 및 방위별 변화

한라산 구상나무림은 11°~25° 경사 구간에서 많이 자생하고 있으며, 경사에 따른 10년간의 구상나무림 분포 변화는 10° 이하에서는 분포면적이 123.1ha 확대된 반면 11° 이상의 지역에서는 235.4ha가 감소한 것으로 분석되었다(Figure 6). 특히 0°~5° 경사지역의 면적이 2006년 보다 109.2ha가 증가하였고, 11°~25° 경사 사이 구상나무 서식지는 165.8ha가 감소하였다.

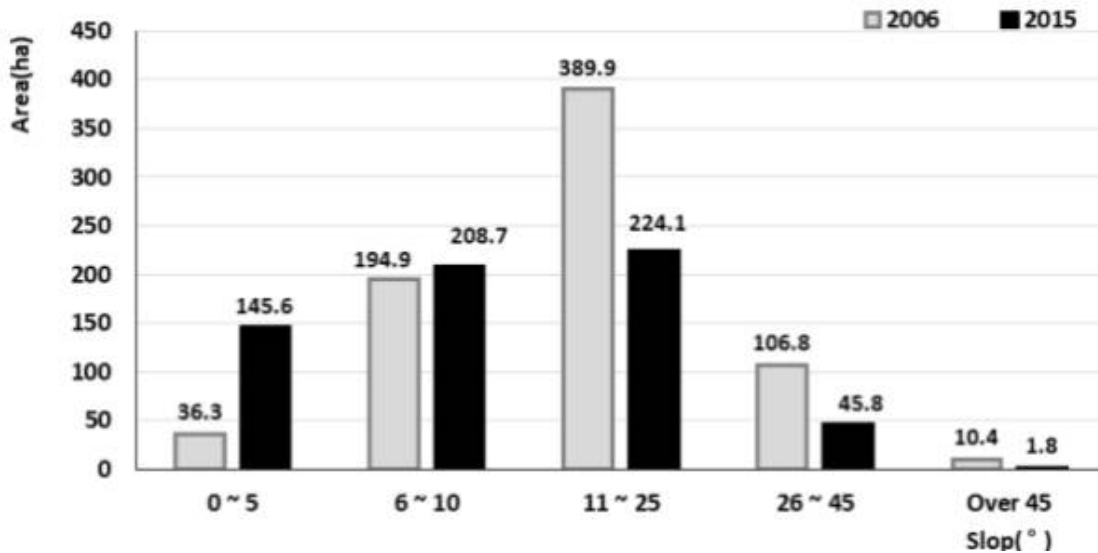


Figure 6. Changes of Korean fir forest according to slop in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

한라산의 구상나무림은 방위별로 볼 때 동쪽을 중심으로 북동과 남동사면에 주로 분포하고 있으며, 지리산은 남동사면, 속리산은 동쪽사면에 분포한다는 보고(Kim and Oh, 2016)와 유사한 특성을 보이고 있다.

한라산 구상나무의 전체적인 분포특성은 2015년에 북동과 남동방향에 전체 면적의 46.7%를 차지하여 가장 넓게 분포하였고, 서쪽을 중심으로 남서와 북서방향으로 25.5%로 상대적으로 낮은 분포 비율을 보이는 것으로 분석되었다(Figure 7).

2006년의 경우는 북동과 남동방향에 48.0%가 분포하고, 북쪽을 중심으로 북동과 북서가 37.6%가 분포하는 것으로 분석되었다. 10년 동안 방위에 따른 감소면적에 차이를 보였는데, 남동쪽의 변화가 23.4ha가 감소하였으며, 동쪽을 중심으로 남동과 북동의 면적은 55.5%인 62.3ha가 줄어든 것으로 나타났다. 반면 남서쪽을 중심으로 하는 남쪽과 서쪽은 전체 변동면적의 17.7%인 19.9ha가 감소한 것으로 분석되었다.

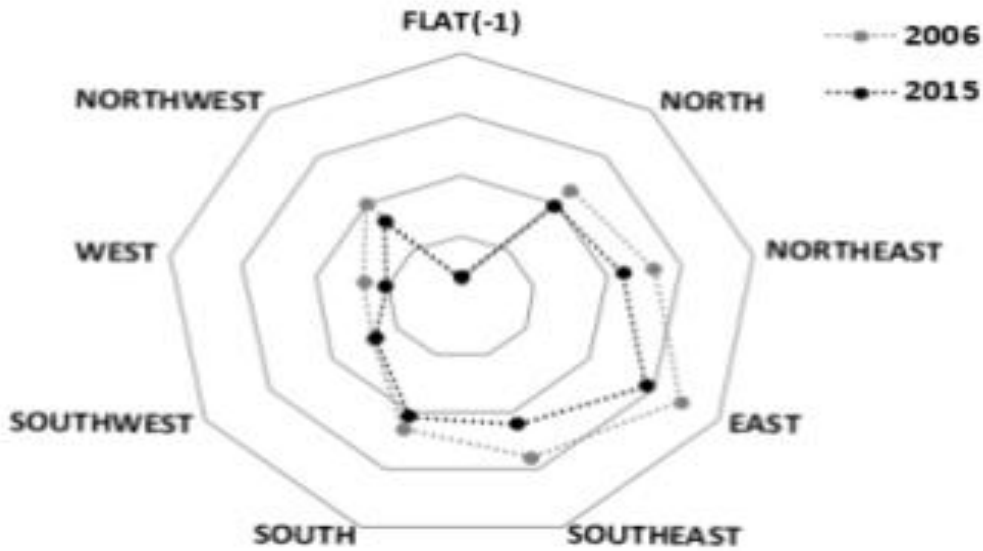


Figure 7. Changes of Korean fir forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

4) 구상나무림 주요 지역별 분포변화

2006년 이후 10년 동안 한라산 구상나무림의 주요 분포지역별 변화를 알아보기 위해 분포상황 및 사면을 기준으로 크게 4개의 지역으로 나누어 분석하였다(Figure 8). 즉, 동쪽으로 성판악등산로를 중심으로 진달래밭과 왕관릉을 포함하는 진달래밭 지역으로, 서쪽으로는 영실등산로를 중심으로 윗세오름, 만세동산과 선작지왓을 포함하는 영실 지역으로, 북쪽으로는 어리목등산로를 중심으로 큰두레왓, 장구목, 백록담과 삼각봉을 포함하는 큰두레왓 지역으로, 남쪽으로는 남벽등산로를 중심으로 방애오름, 옷방애오름과 알방애오름을 포함하여 방애오름 지역으로 구분하였다.



Figure 8. Boundary of main areas classified by slope and distribution situation of Korean fir forest in Mt. Hallasan.

이들 4개 지역을 분석한 결과, 성판악등산로를 중심으로 하는 진달래밭 일대가 2006년에 비해 전체 감소면적 117.9ha중에 71.7%인 84.6ha가 감소한 것으로 나타났다(Figure 9). 또한 영실등산로 일대는 21.5%인 25.3ha, 어리목등산로를 중심으로 하는 큰두레왓 일대는 6.8%인 8.0ha 순으로 줄어든 것으로 조사되었다. 이에 반해 남벽등산로를 중심으로 하는 방애오름 일대는 5.6ha가 증가한 것이 특징적이었다.

이는 2006년에 대비 진달래밭 일대와 영실 일대가 각각 21.3%, 19.7%가 상대적인 감소율을 보여 유사하였고, 큰두레왓 일대가 5.7%의 상대적인 감소율을 보인 것이다. 이에 반해 방애오름 일대는 7.9%가 상대적인 증가율을 보인 것으로 분석되었다.

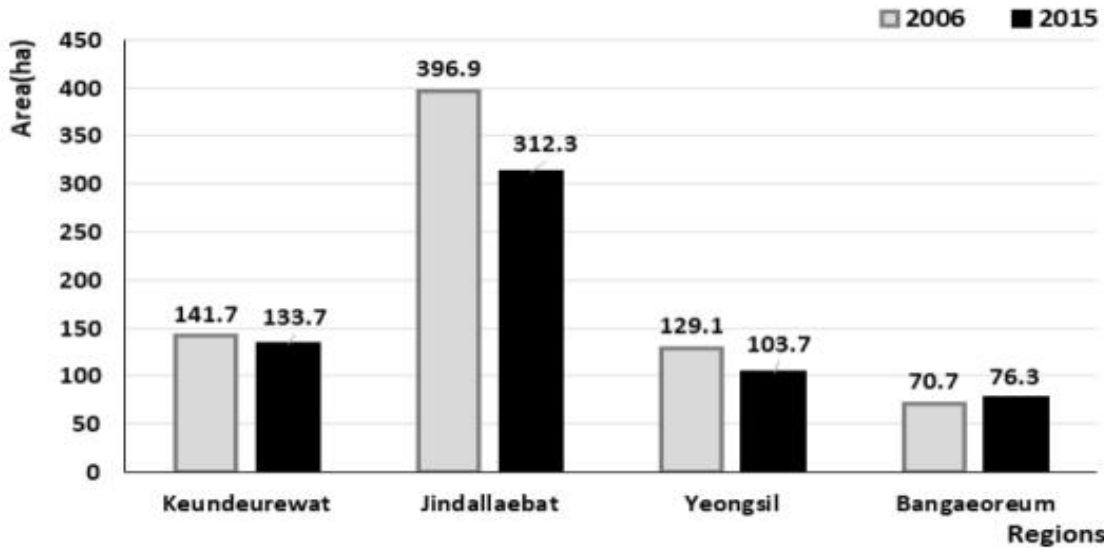


Figure 9. Changes of the area of Korean fir forest in major regions of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(1) 큰두레왓 지역

큰두레왓 일대 구상나무림은 2006년에 141.7ha였으며, 2015년에는 8.0ha가 감소한 133.7ha로 조사되었다(Figure 10). 수관 밀도분포 변화를 보면 소밀도 면적이 14.2ha가 감소하였으며, 중밀도와 조밀도의 면적은 각각 3.4ha, 2.8ha가 증가하였다. 이는 소밀도의 일부지역은 밀도제외 면적으로 이동하였지만, 일부에서는 소밀도에서 중밀도 면적으로, 중밀도에서 조밀도 면적으로 구상나무 개체 수의 증가 및 성장에 따른 수관 확장으로 수관 분포밀도가 상승한 것으로 판단된다. 그리고 소나무 및 활엽수 경쟁에 밀려 전체적인 면적은 감소하고 있는 경향도 나타났다.

경사별 변화는 0°~10° 경사구간에서 2006년 분포면적에 비하여 증가한 반면 11°~45°에서는 감소한 것으로 분석되었다. 큰두레왓 지역의 구상나무림의 해발고도 1,410m에서부터 정상까지 분포하며 해발 1,510m~1,700m 구간에서 주로 생육하고 있었다. 2006년에 비해 해발고도별 소규모로 감소하는 경향을 보였으며, 특히 해발 1,410m~1,500m 구간에서 3.3ha가 감소하였다.

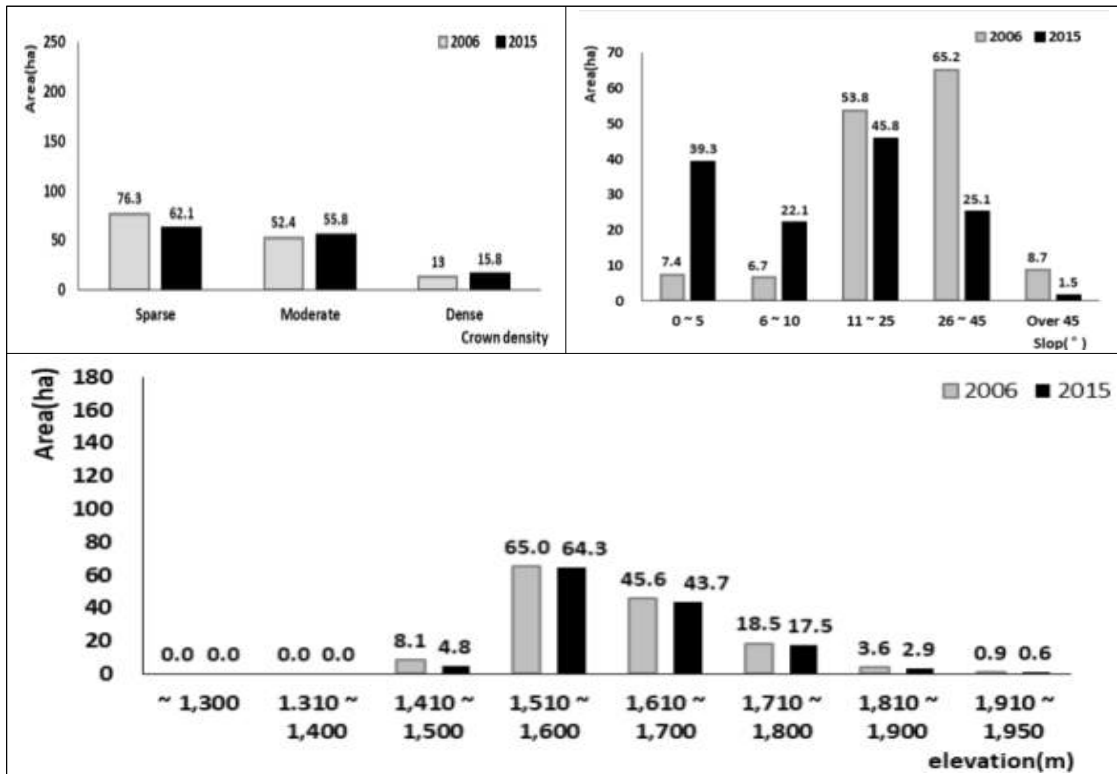


Figure 10. Changes of Korean fir forest in the Keundeurewat area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(2) 진달래밭 지역

진달래밭 일대 구상나무림은 2006년 396.9ha였으며, 2015년에는 312.3ha로 10년 사이에 84.6ha가 감소하였다(Figure 11). 구상나무림 수관밀도 분포변화는 중밀도의 면적이 79.7ha, 조밀도의 면적이 33.2ha가 감소하였으며, 상대적으로 소밀도의 면적은 28.2ha가 증가한 것으로 분석되었다. 증가한 소밀도의 면적은 상위단계의 등급 하락으로 증가한 것으로 보인다. 진달래밭 일대의 수관밀도 변화는 다른 지역의 수관밀도 변화와는 다르게 단계별 하락보다는 조밀도에서 중밀도나 소밀도의 면적으로 변화되거나, 중밀도에서 소밀도로 하락하였으며, 일부는 조밀도에서 면적체의 밀도까지 하락의 폭이 크게 발생된 것이 특징적이었다. 또한 경사별 변화는 11°~25°에서 120.0ha가 감소하였으며 0°~5°범위에서는 40.5ha가 증가한 것으로 분석되었다. 진달래밭 지역의 구상나무는 해발고도 1,510m~1,800m에서 대부분 분포하며 2006년보다 동일한 해발고도에서 면적이 감소하였다.

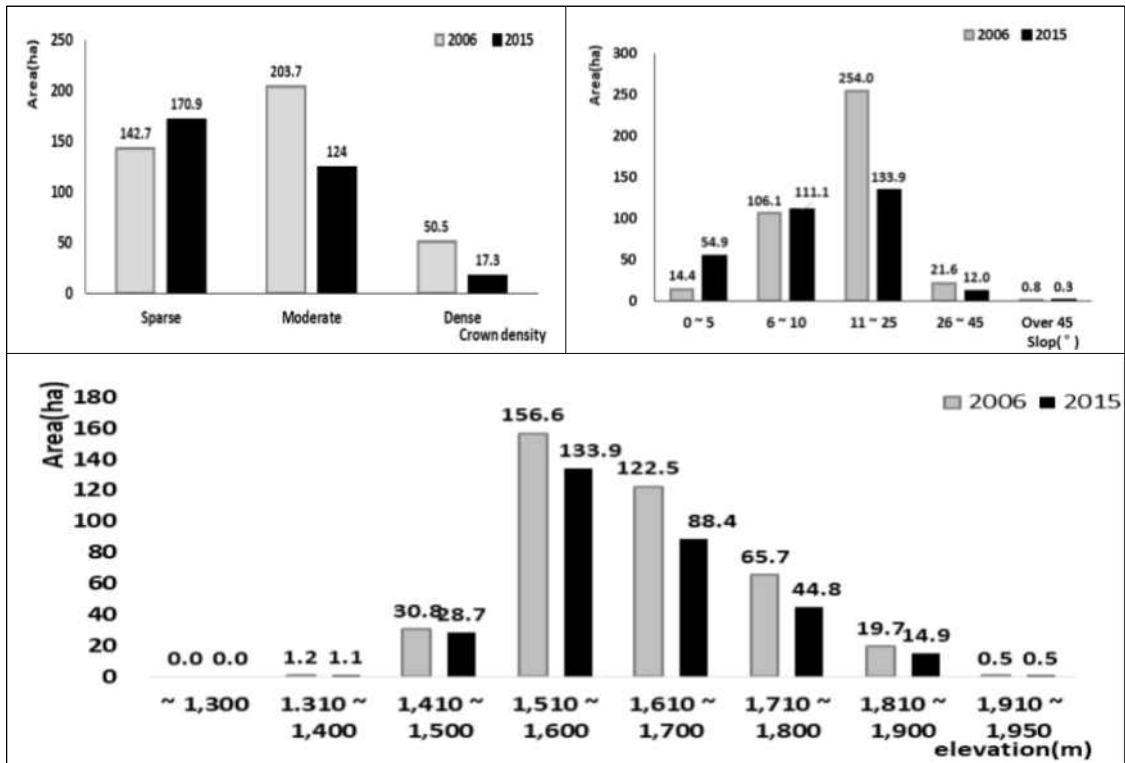


Figure 11. Changes of Korean fir forest in the Jindallaebat area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(3) 영실 지역

영실 일대 구상나무림의 2006년 분포면적은 129.1ha로 조사되었으며 2015년에는 25.4ha가 감소한 103.7ha였다(Figure 12). 영실 지역의 분포 밀도변화는 소밀도의 면적이 20.7ha로 감소하였으며, 조밀도의 면적은 3.7ha가 증가하였다. 이들 지역에서는 해발 1,500m 이하의 중밀도 등급에서는 소밀도에서 면적제외 밀도등급으로 변화되었으며, 해발 1,500m 이상의 중밀도 등급에서 수관 확장 및 성장 등으로 조밀도로 등급 변화가 있음을 볼 수 있었다. 특히 영실지역의 구상나무림은 2015년 수관밀도 변화를 보면 2006년에 비해 해발 1,500m 이하 지역에서 소밀도의 면적이 대부분 면적제외 밀도로 등급이 하락한 것이 특이할 만하다.

경사별 변화는 대부분 구상나무 면적이 감소한 것으로 분석되었으나, 0°~10° 경사지인 선작지왓 일대의 평탄한 지역에서 증가하였고, 반면에 11°~25° 경사지역에서는 감소하였다. 영실지역 구상나무림은 해발고도 1,510m~1,700m에서 분포하고

있으며 해발고도별 변화를 보면 영실등산로 서쪽편으로 구상나무림의 자생지가 해발 1,500m 이상으로 확장하였다.

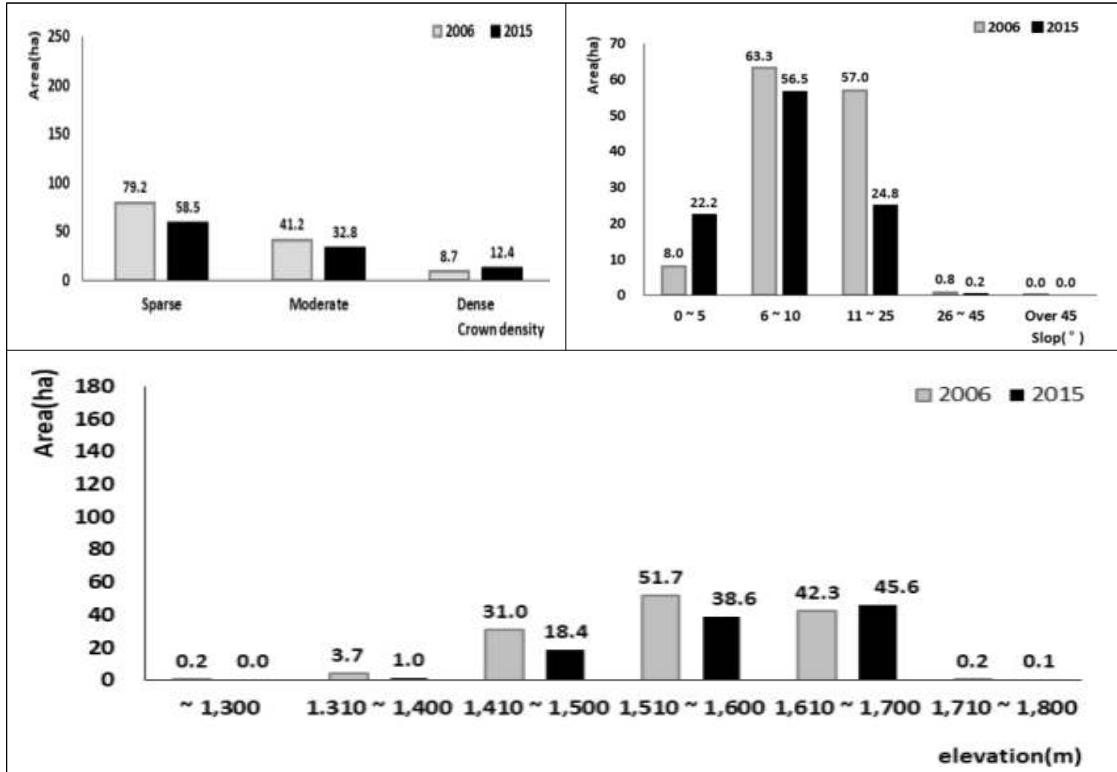


Figure 12. Changes of Korean fir forest in the Yeongsil area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(4) 방애오름 지역

방애오름 일대 구상나무림은 2006년 70.7ha에서 76.3ha로 증가한 지역이다(Figure 13). 이는 한라산 구상나무의 생육상태와 어린 나무의 발생은 지역별로 많은 차이를 보이는데, 방애오름 일대는 어린나무의 발생빈도가 일정하게 증가하고, 지속적인 숲의 성장과 확장이 이루어지고 있기 때문인 것으로 보인다(Koh et al., 1996).

수관밀도 변화는 소밀도의 면적이 11.6ha가 감소하였으나, 이는 단계별 상승으로 인한 감소로 면적제의 밀도급에서 소밀도의 구상나무림으로 5.6ha로 발달한 것으로 분석할 수 있다. 반면 새롭게 수관제의 등급에서 소밀도 등급으로의 상승이 이루어지지 않고 있는 것으로 분석되었다. 그리고 수관밀도 등급 중밀도의 면적은 11.9ha,

조밀도의 면적은 11.1ha가 증가하여 지난 2006년의 면적보다 약 2배 정도 증가한 것으로 나타났다. 이처럼 한라산의 대부분 지역에서 면적이 감소가 된 것으로 나타났으나, 방애오름 일대 구상나무림은 유일하게 증가하는 경향을 보였다.

경사별 변화는 대부분 구상나무 면적이 감소한 것으로 분석되었으나, 0°~5° 경사 지역에서는 2006년의 면적에 비해 22.3ha가 증가하였다. 이는 한라산 구상나무림의 경사지 분포특성을 볼 때 완경사지에서 면적이 늘어나고 있다는 특징을 반영하고 있다. 방애오름 일대 구상나무림은 해발고도 1,510m~1,800m에서 분포하고 있으며 해발 1,610m~1,800m 사이 고도에서는 분포면적이 증가하고 있는 것으로 나타났다.

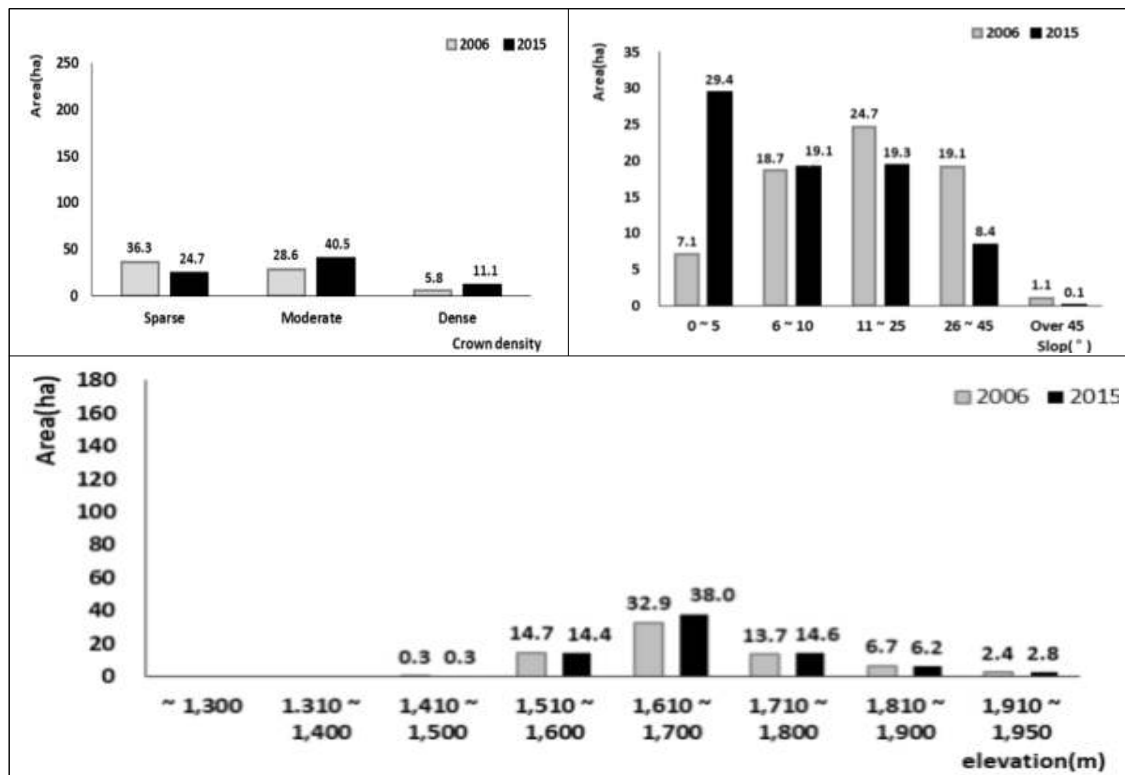


Figure 13. Changes of Korean fir forest in the Bangaoreum area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(5) 주요 지역별 생육등급 단계 제시

구상나무의 생물학적 한계 수명에 대해 Seo et al.(2021)은 2017년부터 3년간 해발 1,600m~1,700m에서 고사목과 생육목 120개체의 연륜연대학의 방법으로 분석한

결과를 바탕으로 구상나무의 한계수명을 150년으로 판단하였다.

Kim et al.(2020a)은 2018년 한라산 자생지 전역을 대상으로 1년 이내에 서서죽은 개체를 대상으로 근원부 원판을 채취하여 연륜 측정장치를 사용하여 4개 방향에서 1/100mm단위로 측정하여 구상나무의 평균수명을 82년으로, 최고 수명 158년, 최저 수명 35년의 결과를 보고하였다.

지역별 구상나무 고사목 연륜 측정 결과 자료(Kim et al., 2020a)를 바탕으로 구상나무 평균 연령을 4개 지역별로 재 구성하고 구상나무림 수관밀도별 특성 변화를 반영하여 구상나무 생육등급을 5단계로 구분하여 분석하였다(Table 6).

그 결과, 2006년 이후 10년 동안 가장 넓은 면적의 구상나무림이 감소된 진달래밭 일대가 평균 93년으로 가장 높은 수령을 보였고, 영실 일대와 큰두레왓 일대 순으로 수령이 낮아졌다. 이에 반해 구상나무림의 면적이 증가한 방애오름 일대는 평균 60년으로 상대적으로 가장 낮은 수령을 보였다.

Table 6. Comparison of th annual rings of Korean fir in the major regions of Mt. Hallasan*

Main regions	Height (m)	DBH (cm)	Annual rings			Number of samples	Elevation (m)
			Mean	Max.	Min.		
Jindallaebat	4.8	17.4	93	148	46	46	1,757
Yeongsil	4.4	16.7	80	158	42	19	1,624
Bangaeoreum	3.7	12.5	60	83	37	20	1,712
Keundeurewat	5.0	19.6	75	93	35	15	1,627
Mean	4.4	16.6		82			1,703

*Source: Kim et al., 2020

전체적으로 각 지역별 구상나무 밀도등급의 변화와 수령을 고려하여, 5단계의 생육등급으로 구분하여 제시하였다(Table 7).

개척기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 60년 이하로 조밀한 수관밀도까지는 형성되지 않았지만 중밀도 및 소밀도급 수관밀도는 꾸준히 증가하고

있으며, 면적 제외밀도에서 소밀도, 중밀도 등급으로 계속해서 상승이 이루어지고 있는 단계로 구분할 수 있다. 이 시기에서는 기존 군락에서 떨어진 곳에 새롭게 자라는 개체 수준의 구상나무인 개척목이 발달하여 주변에 새로운 군락을 형성하고, 생육상황이 양호하여 수관 확장을 통한 분포면적이 확대되어 지고 있다. 한라산 방애오름 일대 백록샘 근처의 일부지역에 분포하는 구상나무림이 해당된다.

Table 7. The growth grads presented in the Korean fir forest of Mt. Hallasan

Growth grade	Characteristics by crown density	Annual rings	Korean fir forest regions
Pioneer	Moderate ↑ Sparse ↑	60years ↓	Some areas around Bangaeoreum
Introduction	Dense ↑ < Sparse ↓ < Moderate ↑	60~70	Bangaeoreum
Growth	Dense ↑ < Sparse ↑ ≤ Moderate ↑	71~80	Keundeurewat
Maturity	Dense ↑ < Moderate ↓ ≤ Sparse ↓	81~90	Yeongsil
Decline	Dense ↓ < Moderate ↓ < Sparse ↑	91years ↑	Top~Jindallaebat

도입기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 60년~70년 사이로 수관 밀도 등급별로 증가하며 중밀도가 가장 넓게 분포하고 있어 밀도등급 상승이 이루어지고 있는 단계로 구분할 수 있다. 이 시기는 구상나무의 생육상황이 양호하며 임연부에 어린나무들의 생육이 활발하다. 방애오름 일대 구상나무림이 해당된다.

성장기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 71년~80년 사이로 수관 밀도 등급별로 증가하며 중밀도와 소밀도 면적이 차이가 거의 없으며 소밀도가 중밀도로 상승이 활발하게 이루어지는 단계로 구분하였다. 큰두레왓 일대 구상나무림이 해당된다.

성숙기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 81년~90년 사이로 수관 밀도 등급별로 보면 소밀도는 감소하는 반면 중밀도와 조밀도는 증가하는 경향이 있지만, 전체적인 면적 감소가 이루어지는 단계로 구분된다. 영실등산로 일대 구상나무림이 해당된다.

쇠퇴기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 91년 이상으로 소밀도 면적만 증가하고 다른 수관밀도의 등급하락으로 인한 면적이 감소하며, 전체적인 면적감소가 이루어지는 단계와 기상이벤트 등의 원인에 의한 급격한 면적감소가 발생한 것으로 구분된다. 한라산 백록담 아래부터, 성관악, 왕관릉 등 진달래밭 일대 구상나무림이 해당된다.

4. 고찰

원격탐사자료를 이용하여 식물군락에 대한 자료를 제공하는 대표적인 임상도는 산림자원이 어디에 어떻게 얼마나 분포하고 있는지를 보여주는 산림지도로 다양한 산림정보를 제공하여 산림정책 수립에 필요한 기초자료로 활용되고 있다(Kim et al., 2009). 하지만 임상도에서 제공되는 정보는 면적과 임령, 밀도 등으로 한정적이다. 특히, 특정 수종에 대한 시계열적 분포 면적 변화와 일정규모 이하의 군락에 대해서는 표현되지 않는 한계점을 가지고 있었다. 또한 기존 식물군락에 대한 연구는 항공사진과 정사영상을 이용하여 일부 수종의 면적에 대한 정보만을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 격자기반 면적산출법을 개발하여 기준이 되는 정사영상 촬영 시점에서 수종의 면적, 격자별 수관점유 면적과 밀도 변화를 동시에 확인할 수 있으며, 정확도와 신뢰성을 더욱 높였다. 불명확한 라인으로 구역을 정하고 면적을 산출하는 기존의 방식에서 벗어나 격자를 기반으로 한 점유면적 산출방식으로 적용하였다. 또한 시계열 분포 면적 분석을 위해서 공간 및 밀도별 변화를 확인 할 수 있고 시각적으로 변화를 확인 할 수 있다. 지금까지는 식물군락의 면적산출은 항공사진이나 위성사진을 이용하여 육안으로 군락의 경계를 구분하거나, 영상 RGB432 조합을 이용하여 경계를 추출해왔다(Kim, 2006; Song et al., 2010; Song, 2011). 그러나 이러한 방법은 식생이 혼생하거나 작은 규모의 군락지역, 개체가 산발적으로 분포하거나 대규모의 군락 내 일정규모 이하의 개체가 분포하지 않는 지역 및 산림습원, 암반지역 등의 경계 라인을 설정하는 데에서 분포면적의 산출에 오차를 유발하였다(Kim et al., 2017). 더욱이 기후변화 등의 원인으로 자생지가 파편화 되는 변화를 제시하기에는 한계점을 가지고 있었다.

2006년 항공정사영상을 이용하여 격자기반 면적산출법을 적용하여 분석한 결과 구상나무림은 738.3ha가 분포하며, 2015년에 626.0ha로 조사되었다. 이와 같은 결과는 기존의 항공사진 및 Landsat 위성자료 등을 이용하여 라인에 의해 산출된 한라산 구상나무림의 면적과는 차이를 보였다(Kim, 2006; Song, 2011; Kim and Lee, 2013). 이는 항공사진의 촬영시기 및 계절 등으로 구상나무림의 분석시점에 따른 차

이도 다소 발생될 수 있으며, 면적을 산출하는 방법, 구상나무와 소나무, 삼나무, 주목, 곰솔 등 수종의 구분, 항공사진으로 판독이 애매한 지역에 대한 현지 확인 미흡 등과 같은 다양한 원인에 따라 많은 차이를 가져온 것으로 보인다.

구상나무림은 10년 동안 112.3ha가 감소하였으며, 밀도별 감소도 발생하였다. 특히, 소밀도 등급의 면적변화가 중밀도에 비하여 상대적으로 낮게 나타나는 것은 소밀도에서 수관밀도 10% 이하인 면적 제외 밀도등급으로 변동이 112.3ha가 발생된 것이기 때문이다. 이는 조밀도에서 중밀도, 소밀도급으로 단계적인 변화뿐만 아니라 집중적인 고사목 발생에 따른 단계를 넘어서는 급격한 밀도등급의 변화까지 포함된 것으로 판단된다.

한라산 구상나무림은 해발 1,910m 이상 지역인 정상 일대를 제외하고는 해발고도에 관계없이 2015년 구상나무림 면적이 2006년보다 전체 해발고도에서 감소한 것으로 분석되었다. 구상나무림 점유면적이 가장 넓은 해발 1,510m~1,600m 구간이 전체 감소면적의 32.5%에 해당되는 36.5ha로 가장 변화가 심하게 발생한 것으로 나타났다. 이 구간을 중심으로 해발고도가 1,500m 이하의 면적 감소는 전체 감소면적의 18.5%에 해당되는 20.8ha인 반면에 해발 1,610m 이상에서의 감소는 49.0%인 55.0ha로 조사되었다. 기후변화의 원인으로 평균온도 상승에 의해서 구상나무를 포함한 아고산식물의 해발고도가 낮은 지역부터 면적이 감소한다는 RCP(Representative Concentration Pathway) 시나리오와 다른 결과를 보여주고 있다. 또한 구상나무 분포 중심의 해발고도에서 면적변화는 기후변화의 원인보다는 더 강한 이벤트에 의한 것으로 판단할 수 있을 것이다.

한라산 구상나무림은 11°~25° 경사 구간에서 가장 많이 자생하고 있는 것으로 조사되었다. 이는 지리산과 속리산의 자생지의 전체적인 평균 경사인 19.59°(1.51° ± 45.65°)의 범위에 포함되었으나, 지리산이 평균 18.40°, 속리산이 평균 26.23°와 비교할 때 한라산이 다소 낮은 경사에 자생하고 있는 것으로 보인다(Kim et al., 2016).

2015년 한라산 구상나무림은 0°~5° 경사지역의 면적이 2006년 보다 109.2ha가 증가하였고, 11°~25° 경사 사이 구상나무 서식지는 165.8ha가 감소하였다. 이는 한라산 구상나무의 고사원인으로 수분과다가 원인으로 경사가 완만할수록 고사율이 높다는 결과(Ahn et al. 2019; Ahn and Yun. 2020)와는 상반되는 것이다.

한라산 구상나무림의 방위별 분포특성은 동사면과 북사면에 대부분 존재하고 일

조량이 적고 수분이 충분히 유지되는 조건의 지역에 분포하며 구상나무림의 형성이 수분조건과 연관성이 높다는 연구와 유사한 경향을 보인다(Kim, 2006). 또한 한라산 토양조건이 점토로의 풍화작용이 매우 적으며, 대부분 굵은 입자여서 투수속도가 매우 빠를 수 있는 조건을 갖고 있어 수분조건과 사면의 방향이 구상나무림의 형성에 연관성을 가지는 것으로 판단할 수 있다(Hyun, 2006). 그러나 구상나무의 생육환경이 양호한 곳으로 알려진 동쪽사면을 중심으로 지난 10년 동안 대규모의 고사목이 발생되고 구상나무림이 감소된 것은 태풍 등 강한 외부적인 요인에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다.

Kim et al.(2020)은 구상나무의 평균수명을 82년으로, 최고 수명이 158년, 최저 수명이 35년의 결과를 보고하였고, Seo et al.(2021)은 구상나무의 한계수명을 150년으로 제시하고 낮은 한계수명을 감소의 원인으로 판단하였다. 이를 근거로 본 연구에서는 구상나무림 평균수령을 지역별 구상나무 고사목 연륜 측정 결과 자료(Kim et al., 2020)를 바탕으로 4개 지역별로 재 구성하고 군락별 생육등급을 제시하였다. 즉, 수령과 함께 밀도변화를 고려하여 개척기, 도입기, 성장기, 성숙기, 쇠퇴기 등 5단계의 생육단계로 구분하였다.

구상나무 현지 내 복원 및 하층식생 제주조릿대 제거 후 천연하중 유도 등의 인위적 개입이 필요한 시기가 도래 한다면 생육등급별 자료와 경사, 방위, 해발고도 등을 종합적으로 판단하여 후보지역 선정에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

앞에서 언급된 다양한 원인으로 구상나무 자생지의 생육기반 변화가 부정적 영향을 주었으며, 뿐만 아니라 구상나무의 한계수명 등 생리적 원인에 의한 상호작용에 의해서 생육쇠퇴 및 고사의 원인으로 추정되어 충분한 연구가 요구된다(Kim et al., 2019; Seo et al., 2019; Koo and Kim, 2020)고 하였다.

Chapter II. 한라산 소나무림 시·공간변화

1. 서론

소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.)는 육송, 적송이라고 불리고, 다양한 생태형을 가진다(Lim, 1895). 소나무는 한반도를 비롯하여 중국의 산둥반도, 압록강 연안지역 및 일본의 북해도 이남지역에 분포한다. 한반도에서는 제주도부터 함경북도 연성군 증산까지 분포하고 있으며 동쪽으로는 울릉도, 서쪽으로는 백령도의 섬들까지 분포하고 있다. 수직적 분포는 완도가 해발 200m, 한라산이 해발 1,300m~1,800m, 금강산이 해발 100m~180m, 백두산이 해발 300m~900m 사이에 위치한다(Korea Forest Research Institute, 2012).

소나무는 우리 민족의 삶, 역사, 문화와 더불어 청림, 인내, 절개, 의지 등을 상징하며 전통사찰 및 문화재 등의 건축재료 및 주요한 경관요소로서 문화경관을 형성해 왔다. 우리나라 소나무림은 조선시대 초기부터 벌채를 금하는 송목금벌(松木禁伐)정책에 따라 지속적으로 보전되어 왔을 정도로 역사·문화적으로 중요한 요소이다(Jeon, 1993; Lee, 2013).

소나무는 생육이 가능한 범위가 타 수종에 비해 상대적으로 넓어 다른 수종의 교목성 목본식물이 생육하기 어려운 산림의 능선, 암석지와 같은 사면상의 특수입지, 배수가 잘되는 건조한 퇴적지 등에서 우점종으로 위치를 차지하였다(Hallasan National Park Office, 1998). 소나무림은 생장초기와 후기에는 소나무의 흉고직경과 수고생장이 느리지만 중기에는 생장속도가 대단히 빠르다(Lee and Kim, 1989).

Ma(1999)는 우리나라에서 소나무가 점차 사라질 것이라고 예상하였는데 그 이유로 첫째, 우리나라 산림 토양의 비옥도가 높아지고 있으며 둘째, 현존 소나무림의 임상에 대부분 참나무류가 침입되고 있고 시간이 지날수록 침입 조건이 좋아지고 있으며, 제벌(除伐)과 간벌(間伐) 등을 통해 참나무류의 활력도가 높아질 것이므로 차세대에는 다시 소나무림이 복구되기 어려울 것이라고 했다. 셋째, 병충해에 의한

피해 때문에 소나무 인공조림을 계속 기피할 것이며 소나무 인공조림을 하고자 할 경우 토질 조건이 좋아질수록 소나무림 조성 비용이 증가할 것이다. 넷째, 소나무가 혼효되어 있는 천연림을 자연 그대로 방임시키고 있기 때문에 경쟁력이 약한 소나무가 활엽수 등에 의해 피압을 받아 쇠퇴할 것이라고 보고하였다.

Kim et al.(1982)는 한라산의 소나무는 수고 11m~18m, 흉고직경이 26cm~54cm이었으며, 우점도의 값은 65%~80%이었으며, 소나무림의 분포는 해발 650m~1,450m였으며 서북사면에 가장 많이 분포한다고 보고하였다.

기후변화 등의 원인으로 한라산의 식생 분포가 변화하고 있지만, 종 단위의 분포 면적을 산출하는 연구가 미진한 실정이다. 특히, 한라산국립공원을 중심으로 분포하는 온대성 침엽수의 대표 수종인 소나무의 시공간적 변화는 기후변화에 대한 중요한 지표가 될 것이다. 또한 특정수종의 분포의 변화는 분석방법에 따라 많은 차이를 보이고 있을 뿐만 아니라 변화의 원인에 대해서도 다양한 의견이 제시되고 있는 상황이다.

따라서 본 연구는 2006년과 2015년을 기준으로 한라산국립공원에 분포하는 소나무림의 10년간 면적변화를 조사하고, 분포지역의 해발고도, 경사와 방위 및 주요지역의 분포특성을 알아보고자 비교분석하였다. 이를 통해 소나무림의 밀도 변화와 생육특성을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

1) 조사지 개황

본 연구는 한라산 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc. Korean red pine)의 분포범위를 기초로 하여 한라산국립공원 지역(153.3km²)을 대상으로 실시하였다(Figure 14). 한라산국립공원은 백록담을 중심으로 동쪽으로는 성판악등산로는 속밭과 진달래밭을 포함하는 지역으로, 남쪽으로는 입석오름을 중심으로 모세왓과 평계대피소를 포함하는 지역으로, 북쪽으로는 만세동산, 사제비동산, 죽은두레왓과 개미등을 포함하는 지역으로, 서쪽으로는 1100도로, 영실과 불레오름을 포함하는 지역으

로 구분하였다.

한라산국립공원 경계 외 지역은 제외하였으며, 국립공원 지역 내에 있는 소나무류인 곰솔(*Pinus thunbergii* Parl.)도 대상에 포함하지 않았다.

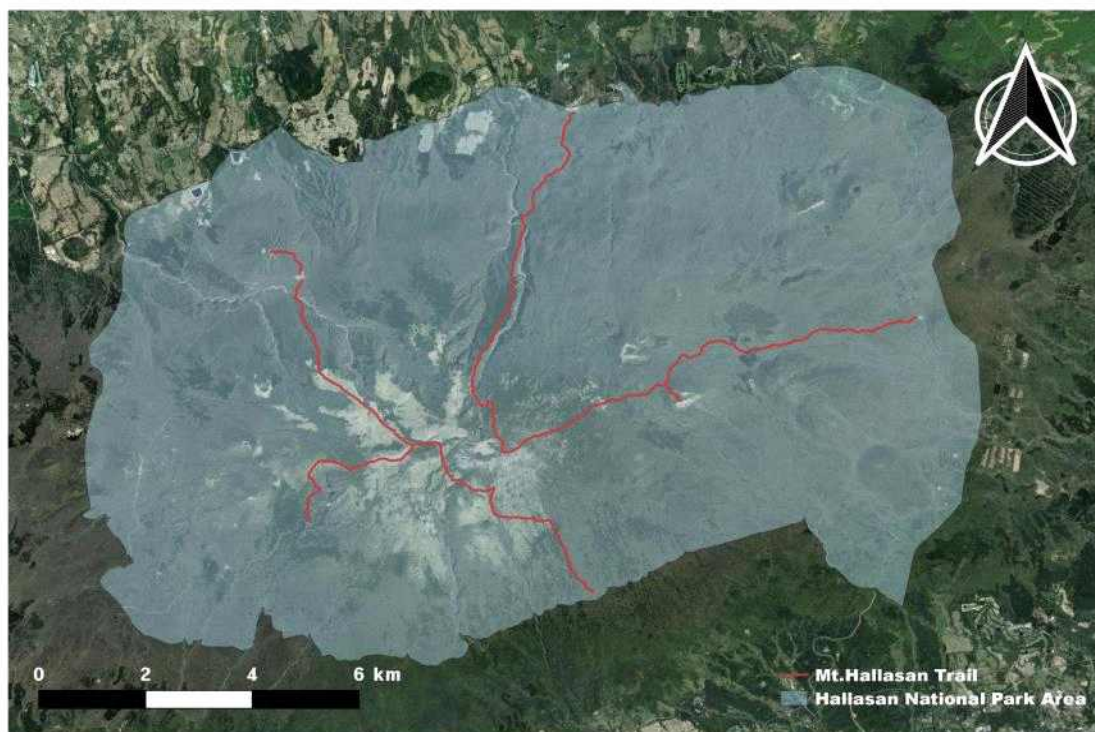


Figure 14. Surveyed area of Korean red pine in Mt. Hallasan.

2) 소나무림 분포면적 조사

한라산국립공원 내 소나무림의 분포 면적은 국토지리정보원에서 제공받은 2006년 4월에 촬영된 30cm급 정사영상과 2015년 11월에 촬영된 25cm급 정사영상을 이용하여 소나무의 경계를 확인하였다. 또한 다른 수목과 구분이 불확실한 지역은 2018년 10월부터 2019년 3월까지 군락의 경계를 현장에서 확인하였다(Kim et al., 2019).

소나무림의 면적 및 수관점유 밀도 분석은 Kim et al.(2017)이 제시한 격자 기반 면적산출 방법을 적용하였으며 Chapter I 구상나무림 분포 면적조사와 동일한 방법으로 조사하였다.

3) 소나무림의 시·공간분포 분석

한라산국립공원 내 소나무림이 2006년 이후 10년 동안의 공간분포 특성 변화를 알아보기 위해 시기별 정사영상 자료를 두고 AUTO CAD Map 프로그램을 이용하여 격자를 생성하여 분석하였다. 소나무림 분포가 확인된 지역의 격자 내 수관점유 밀도를 4단계로 구분, 색상 코드를 부여한 후 ArcGIS을 이용하여 해발고도, 경사, 방위, 지역으로 구분하여 Chapter I 시·공간 분석 방법과 같은 방법으로 실시하였다.

3. 결과

1) 소나무림 분포 및 수관밀도 변화

2015년 정사영상을 이용하여 한라산국립공원 내 소나무림 분포도를 작성한 결과, 15m×15m 격자에 수관점유 면적이 11% 이상을 차지하는 소나무림의 전체면적은 1,259.5ha로 나타났다(Figure 15, Table 8). 이중 수관밀도가 11%~40% 범위에 포함되는 소밀도 면적은 전체면적의 46.5%에 해당하는 585.4ha로 분석되었으며, 상대적으로 가장 높은 비율로 분포하였다. 수관밀도가 41%~70%에 해당되는 중밀도 면적은 34.6%인 436.2ha, 71% 이상의 수관밀도를 지닌 조밀도 면적은 18.9%인 238.3ha로 분석되었다.

2006년도에는 소나무림이 해발 700m 이상 지역에 1,208.5ha가 분포하는 것으로 분석되었다(Figure 16, Table 8). 수관점유밀도별 면적을 보면, 소밀도 면적은 전체 면적의 43.5%인 525.6ha로 가장 높은 비율을 차지하였고, 중밀도 면적이 31.2%인 377.2ha, 조밀도 면적이 25.3%인 305.6ha 순으로 나타났다.

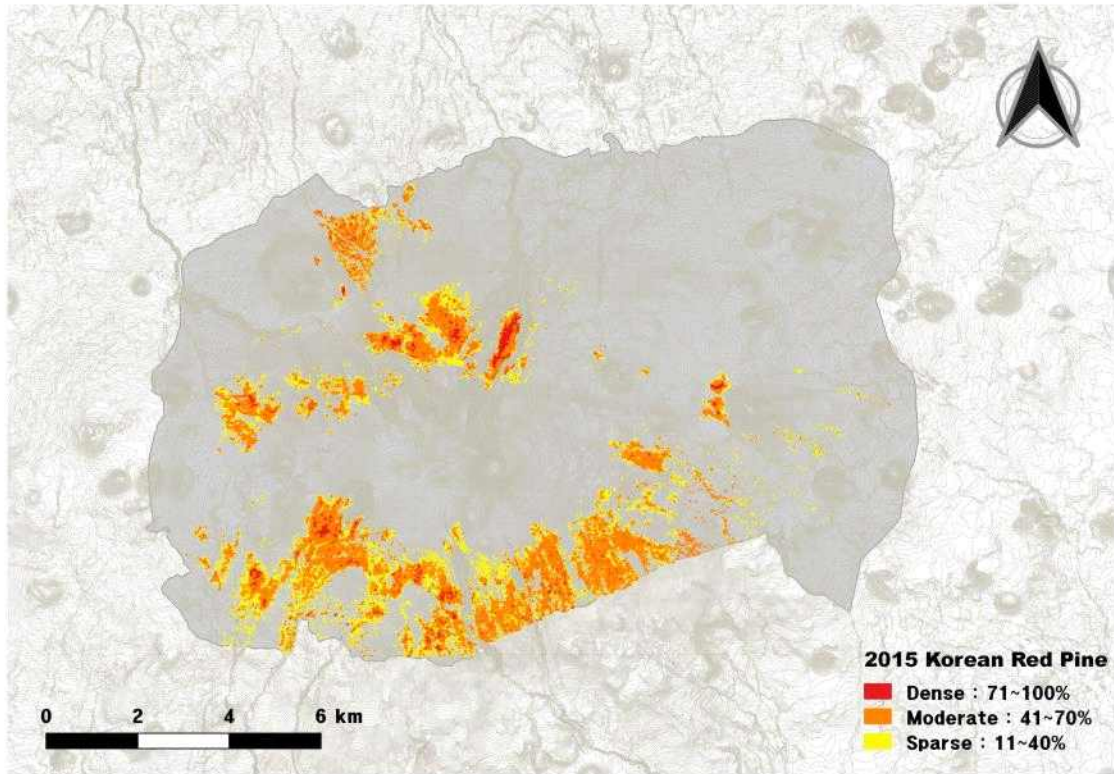


Figure 15. Distribution area of Korean red pine forest in Mt. Hallasan in 2015.

소나무림의 면적에 대한 수관점유 밀도에 따른 변동비율을 보면, 중밀도의 면적이 10년 동안 59.0ha가 증가하였고, 소밀도의 면적도 59.8ha가 증가한 것으로 나타났다. 반면 조밀도는 67.3ha가 감소한 것으로 조사되었다. 이는 2006년에 비해 10년 동안 소나무림이 상대적으로 소밀도에서 11.4%, 중밀도에서 15.6%의 증가율을 보인 반면 조밀도는 22.0%가 감소된 것이다. 이러한 밀도의 변화는 조밀도 면적감소가 중밀도와 소밀도의 면적 증가에 단계적 영향을 미쳤을 뿐만 아니라 11% 이상의 밀도를 갖는 소나무림이 새롭게 발달하였기 때문으로 판단된다.

전체적으로 소나무림의 분포면적 증가는 한라산 정상을 중심으로 남사면 및 남동·서사면에 집중적으로 발생한 것으로 나타났다. 주요 지역별로는 성관악등산로 속밭 지역을 제외한 대부분 지역에서 면적이 증가한 것으로 조사되었다.

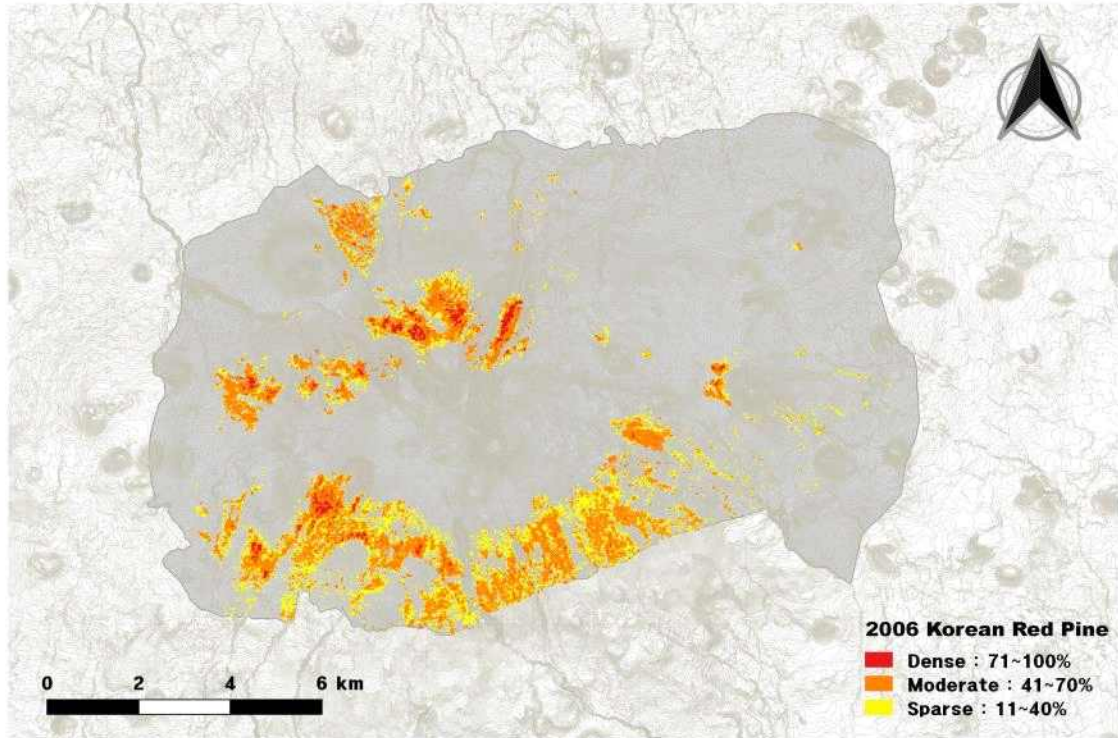


Figure 16. Distribution area of Korean red pine forest in Mt. Hallasan in 2006.

Table 8. Spatial and temporal changes of Korean red pine forest in Mt. Hallasan to 2006, 2015

Crown density	Area by year(ha)		Area change(ha)	Change ratio(%)
	2006	2015		
Sparse	525.6	585.4	59.8	11.4
Moderate	377.2	436.2	59.0	15.6
Dense	305.6	238.3	- 67.3	-22.0
Total	1,208.4	1,259.9	51.4	4.3

2) 소나무림 해발고도별 변화

한라산국립공원 내 해발고도에 따른 소나무림 분포면적은 2015년에는 해발 1,010m~1,400m 구간에 전체면적의 79.6%인 1,003.0ha로 가장 넓었으며, 이 구간을

중심으로 해발 1,000m 이하 지역의 면적 비율은 14.6%인 반면에 해발 1,410m 이상의 면적 비율은 5.8%가 분포하는 것으로 조사되었다(Figure 17).

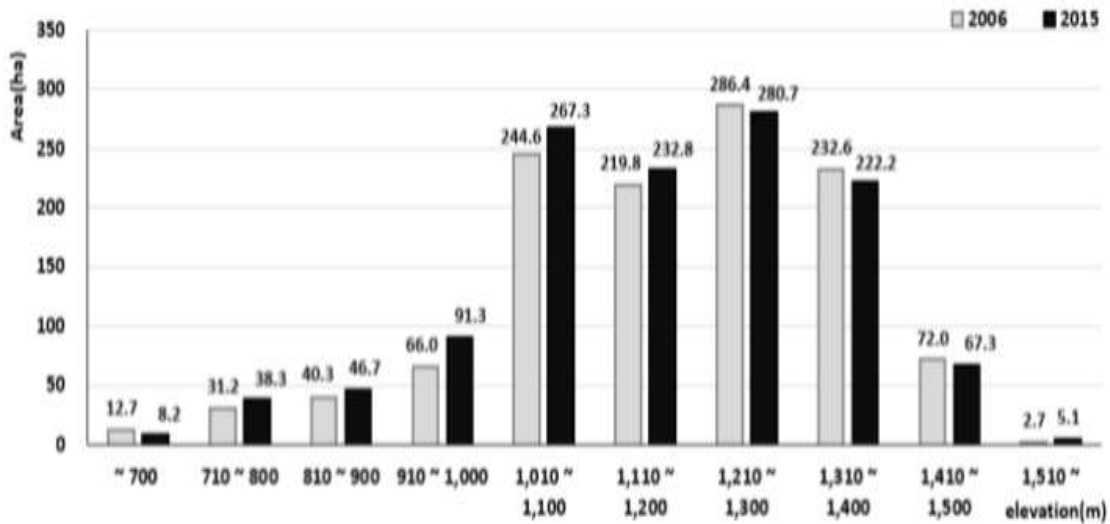


Figure 17. Changes of Korean red pine forest according to elevation in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

2006년에도 2015년과 유사한 해발고도별 소나무림의 분포 경향을 보였는데, 해발 1,010m~1,400m 구간이 전체면적의 81.4%인 983.4ha로 가장 넓었으며, 이 구간을 중심으로 해발 1,000m 이하 지역의 면적 비율이 12.4%인 반면에 해발 1,410m 이상은 6.2%로 나타났다.

소나무림의 주요 분포지역인 해발 1,000m에서 해발 1,400m 구간에서 2006년 이후 10년 동안의 해발고도별 변화는 1,000m~1,100m 구간이 22.6ha가 증가하여 가장 높은 증가를 보였고 해발 1,110m~1,200m 구간에서도 13.0ha의 증가를 보였다(Figure 18). 이에 반해 해발 1,210m~1,300m 구간은 5.7ha가 감소되어 가장 높은 감소를 보였고, 해발 1,310m~1,400m 구간에서도 0.3ha가 감소된 것으로 나타났다. 그러나 이들 구간의 밀도등급별의 변화는 다소 다른 특성으로 보이기도 하였는데, 해발 1,000m~1,100m 구간에서는 조밀도와 소밀도의 면적은 증가하는 반면 중밀도의 면적은 유지되는 것으로 나타났다. 이에 반해 해발 1,110m~1,400m의 모든 구간에서는 조밀도의 면적은 대부분 감소한 반면 중밀도와 소밀도의 면적은 증가되는 경향을 보였다.

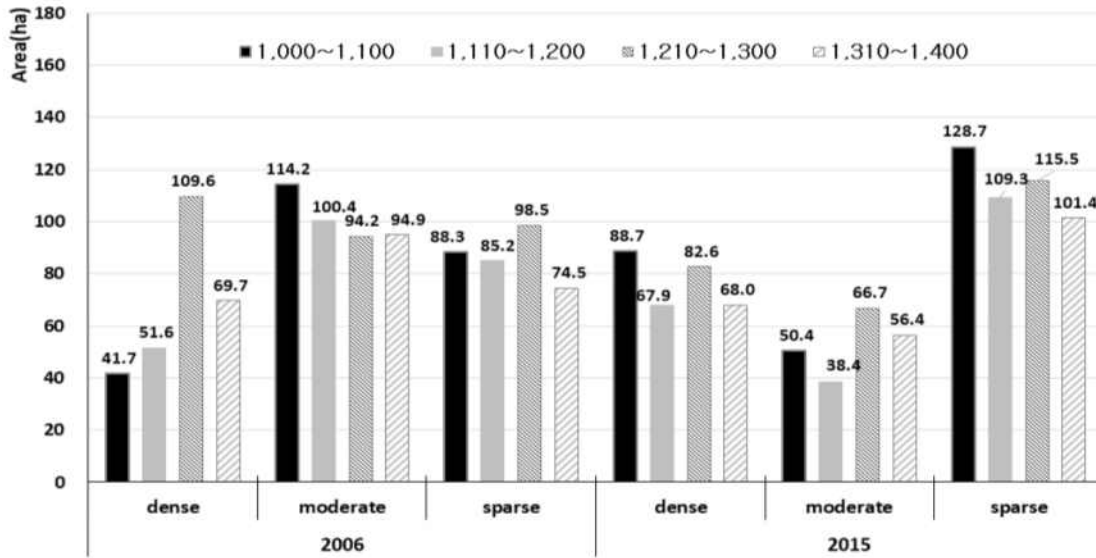


Figure 18. Changes of crown density of Korean red pine forest according to specific elevation(1,000m~1,400m) in Mt. Hallasan to 2005, 2015.

이러한 차이는 이들 대부분 소나무림이 서어나무(*Carpinus laxiflora* (Siebold & Zucc.) Blume) 등의 낙엽활엽수와 혼효된 형태로 숲이 발달하면서 천이 과정을 통해 밀도변화가 초래되거나 소나무림 주연부의 초지나 관목림 등의 식생 구조 특성에 따라 낮은 밀도의 새로운 소나무림이 발생된 것으로 추측된다.

또한 지역별로 가장 높은 해발고도의 변화를 보면 죽은드레를 중심으로 하는 개미등 지역이 약 30m가 상승하였고 영실과 입석오름 지역도 각 20m, 10m 상승한 반면 속밭 지역은 10m 하강 한 것으로 조사되었다(Table 9). 이는 소나무림 전체가 낙엽활엽수에 둘러싸인 속밭 지역을 제외하고는 고도가 높은 지역으로 확산된 것으로, 최근 한라산 고지대의 초지와 관목림 지역으로 소나무림의 분포면적 확산과 함께 가장 높이 분포하는 위치의 해발고도 상승을 제시한 결과(Song et al., 2012)와 유사하다. 이러한 소나무림의 고지대로의 확산은 기온상승 등 기후변화와 함께 더욱 빠르게 진행될 것으로 예측된다.

Table 9. Changes of maximum altitude by distribution of Korean red pine forests in main regions of Mt. Hallasan to 2006, 2015

Region	Maximum altitude(m)		Variation(m)
	2015	2006	
Sogbat Area	1,510	1,520	-10
Ibseogoleum Area	1,550	1,540	10
Yenogsil Area	1,550	1,530	20
Gaemideung Area	1,560	1,530	30

3) 소나무림의 경사 및 방위별 변화

한라산국립공원 내 소나무림의 경사별 분포는 2015년을 기준으로 지표면 경사 11°~25° 범위에서 가장 높은 비율의 분포를 보였고, 45° 이상의 급경사에서가 가장 낮은 분포 비율을 차지하였다(Figure 19). 전체 소나무림의 87.5%는 지표면 경사 25° 이하의 지역에 분포하고 있는 것으로 조사되었으며, 경사가 26° 이상 지역에는 12.6%가 분포하는 것으로 나타났다.

2006년에도 2015년과 유사한 비율의 경사별 소나무림 분포비율을 보였으며, 경사 25° 이하 지역에 80.8%가 분포하는 것으로 분석되었다. 최근 10년 동안 경사에 따른 소나무림의 분포 변화는 특징적으로 증가하거나 감소되는 경향은 나타나지 않았고, 2006년보다 경사와 관계없이 증가한 것으로 조사되었다.

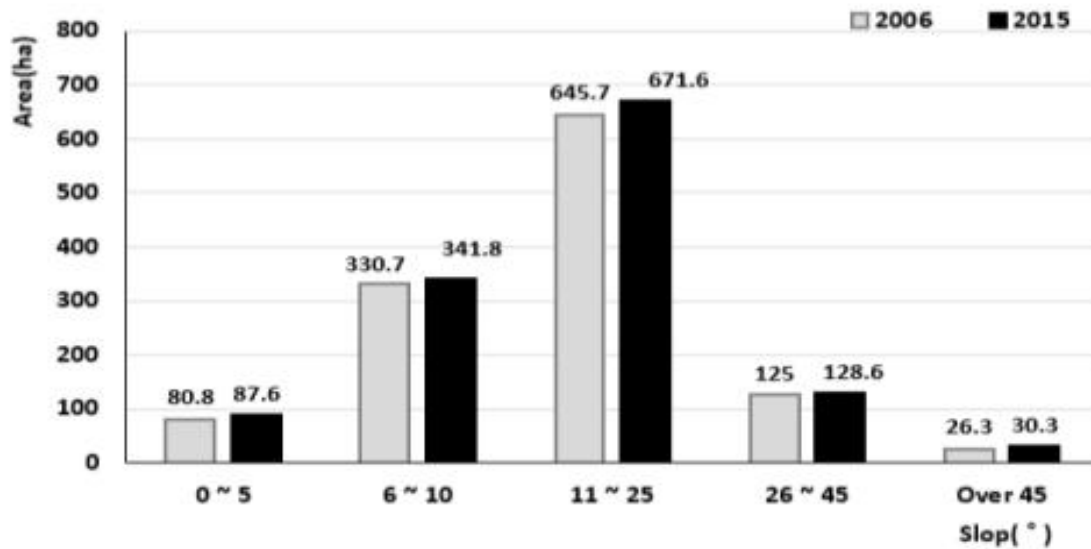


Figure 19. Changes of Korean red pine forest according to slope in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

한라산국립공원 내 소나무림의 방위별 전체적인 분포 특성은 2015년에 남쪽을 중심으로 남서, 남동방향에 가장 넓은 56.4%가 분포하였으며, 반면 북쪽을 중심으로 북서와 북동방향에는 24.5%로 상대적으로 낮은 분포 비율을 보이는 것으로 나타났다(Figure 20).

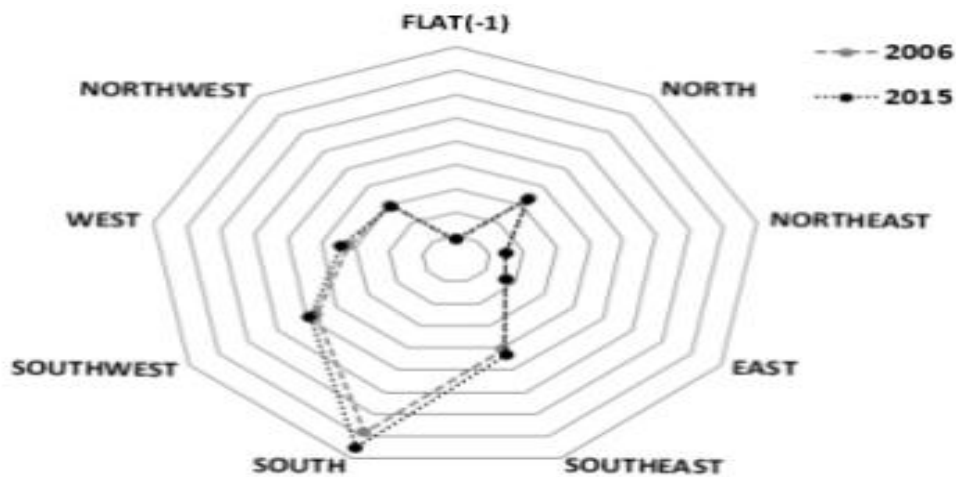


Figure 20. Changes of Korean red pine forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

2006년에도 남쪽을 중심으로 남서, 남동방향에 54.9%가 분포하고, 북쪽을 중심으로 북동과 북서에 26.2%가 분포하는 것으로 분석되었다. 이처럼 2015년과 2006년에 큰 변화를 보이지는 않았지만, 방위에 따른 감소 면적은 차이를 보였다. 2006년 이후 10년 동안 소나무림은 남쪽방향 변화가 27.8ha가 증가하였으며, 북쪽을 중심으로 북동과 북서의 면적은 7.6ha가 줄어든 것으로 나타났다. 북쪽을 중심으로 북동과 북서 방위의 수관 밀도등급을 보면 조밀도 등급 면적은 줄어들고, 중밀도와 소밀도 등급 면적이 늘어난 것으로 조사되었다(Figure 21).

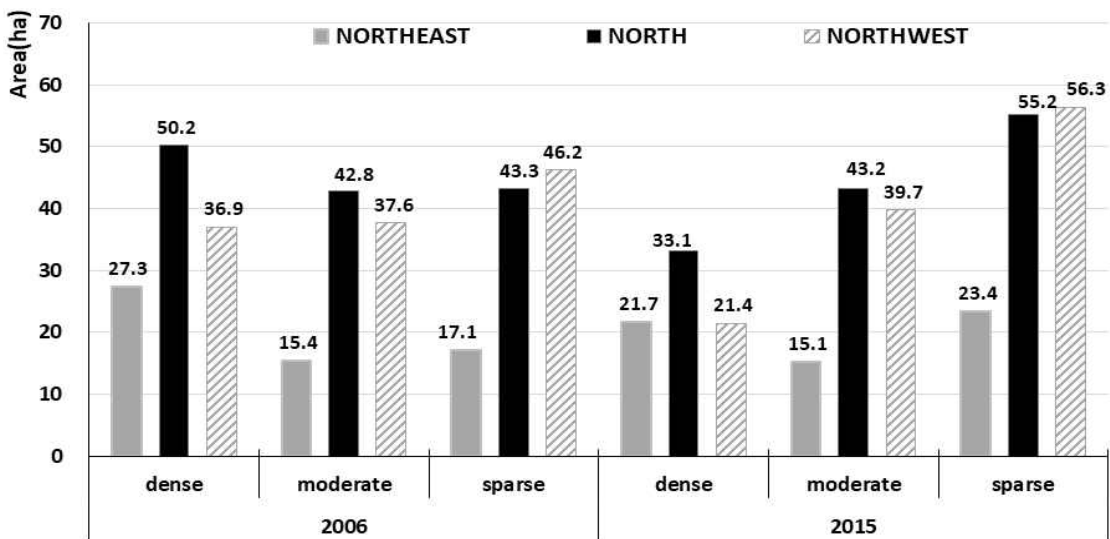


Figure 21. Changes of Korean red pine forest crown density according to specific azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

4) 소나무림 주요 지역별 분포변화

한라산 소나무림의 주요 분포지역의 변화를 알아보기 위해 분포상황 및 사면을 기준으로 크게 4개의 지역으로 나누었다(Figure 22). 즉, 동쪽으로는 성관악등산로를 중심으로 속밭과 진달래밭을 포함하는 속밭 지역으로, 남쪽으로는 입석오름을 중심으로 모세왓과 평계대피소를 포함하는 입석오름 지역으로, 북쪽으로는 만세동산, 사제비동산, 죽은두레왓과 개미등을 포함하는 개미등 지역으로, 서쪽으로는 1100도로, 영실과 불레오름을 포함하는 영실 지역으로 구분하였다.



Figure 22. The classification of Korean red pine forest distribution area in Mt. Hallasan.

한라산국립공원 내에 2006년 이후 10년 동안의 소나무림의 지역별 분포 변화를 보면, 2015년에 영실 지역은 2006년에 비해 전체 증가 면적인 51.4ha 중에 49.6%인 25.5ha가 증가하였다(Figure 23). 그리고 산벌음계곡 우측을 포함하는 입석오름 지역은 39.7%인 20.4ha, 죽은드레왓과 개미등을 포함하는 개미등 지역은 14.4%인 7.4ha 순으로 증가한 것으로 조사되었다. 이에 반해 성관악등산로 북측을 포함하는 속밭 지역은 1.9ha가 감소한 것이 특징적이었다.

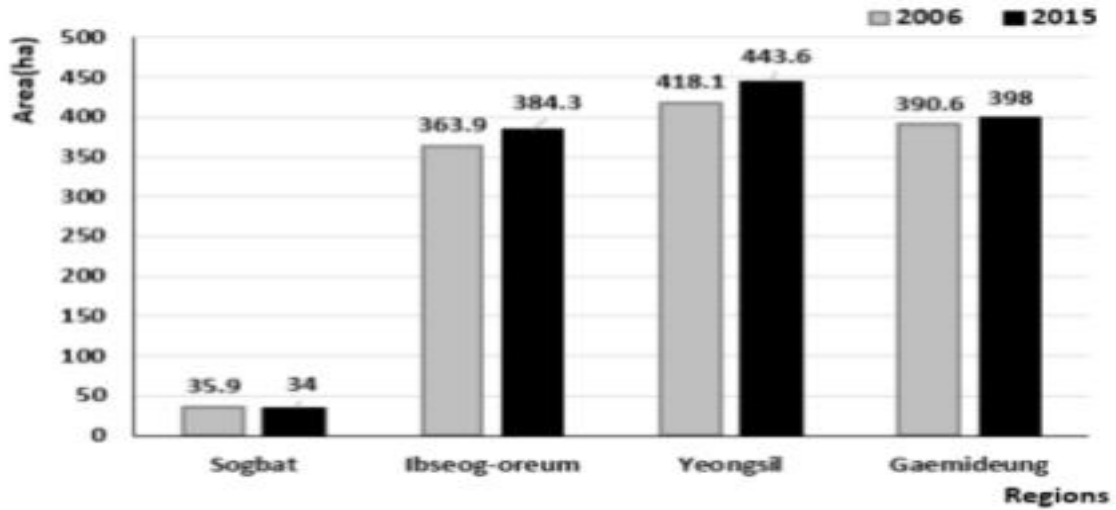


Figure 23. Changes of distribution area of Korean red pine forest in main regions of in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(1) 속밭 지역

2006년과 2015년을 기준으로 10년 동안 성판악등산로 속밭 지역 소나무림의 수관 밀도 변화는 소밀도 면적이 8.6ha가 감소하지만 중밀도와 조밀도의 면적은 각각 0.1ha, 6.5ha가 증가하였다(Figure 24). 이는 소밀도의 일부 지역은 면적 제외 밀도로 변화하였지만, 소밀도에서 중밀도 등급으로 변화되거나 중밀도에서 조밀도에 해당하는 수관밀도로 변화된 면적은 상승하였다.

이들 지역의 소나무림은 경사 5° 이하 지역에서 가장 높은 분포 비율을 보였고, 6°~10° 범위와 11°~25° 범위 경사지역에서는 유사한 비율의 분포경향을 보이다가 25° 이상 지역에서는 감소되는 경향을 보였다. 또한 해발고도에 따라서는 해발 1,010m부터 1,400m까지가 주요 분포지역으로 나타났으며, 전 방위에 걸쳐 분포하고 있었다.

지난 10년 동안 이 지역에 분포하는 소나무림은 경사 5° 이하 지역에서는 일부 면적이 증가하였으나 6° 이상 지역에서는 대부분 감소된 것으로 나타났다. 그리고 해발고도 1,010m~1,200m 구간에서 2.8ha가 증가한 반면 대부분의 다른 해발고도에서는 감소한 것으로 분석되었다.

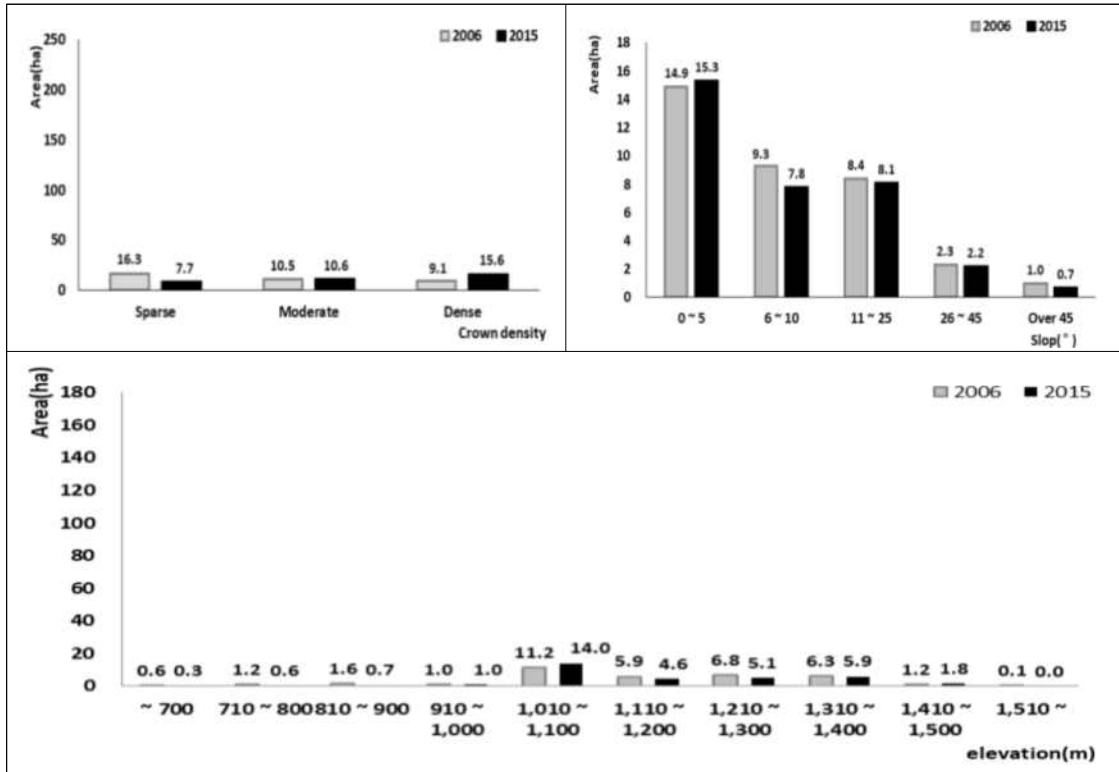


Figure 24. Changes of Korean red pine forest in the Sogbat area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(2) 입석오름 지역

입석오름 지역 소나무림 수관밀도 분포 변화는 10년 동안 중밀도 면적이 31.5ha, 조밀도 면적이 5.6ha가 증가하였으며, 상대적으로 소밀도 면적은 16.7ha가 감소한 것으로 분석되었다(Figure 25). 증가한 중밀도 등급면적은 소밀도 등급에 해당하는 지역의 개체수 증가와 생장에 따른 수관 확장 등으로 인한 상위단계로 진입한 것으로 보인다. 또한 면적제외 밀도에서 새롭게 소밀도 등급으로 변화가 이루어진 곳이다.

이들 지역의 소나무림은 해발 1,200m까지 점차 증가한 후 감소되는 경향을 보이는데, 2006년 이후 10년 동안 해발고도는 910m~1,200m 구간에서 26.8ha가 증가하였다. 또한 소나무림의 대부분은 11°~25° 범위에 분포하는 경향을 보였고, 이 경사 구간에서 15.9ha가 증가한 것으로 나타났다. 그리고 방위별로 보면 2015년에는 남쪽과 남동방향에 83%가 분포하며 21.2ha가 증가된 분석되었다.

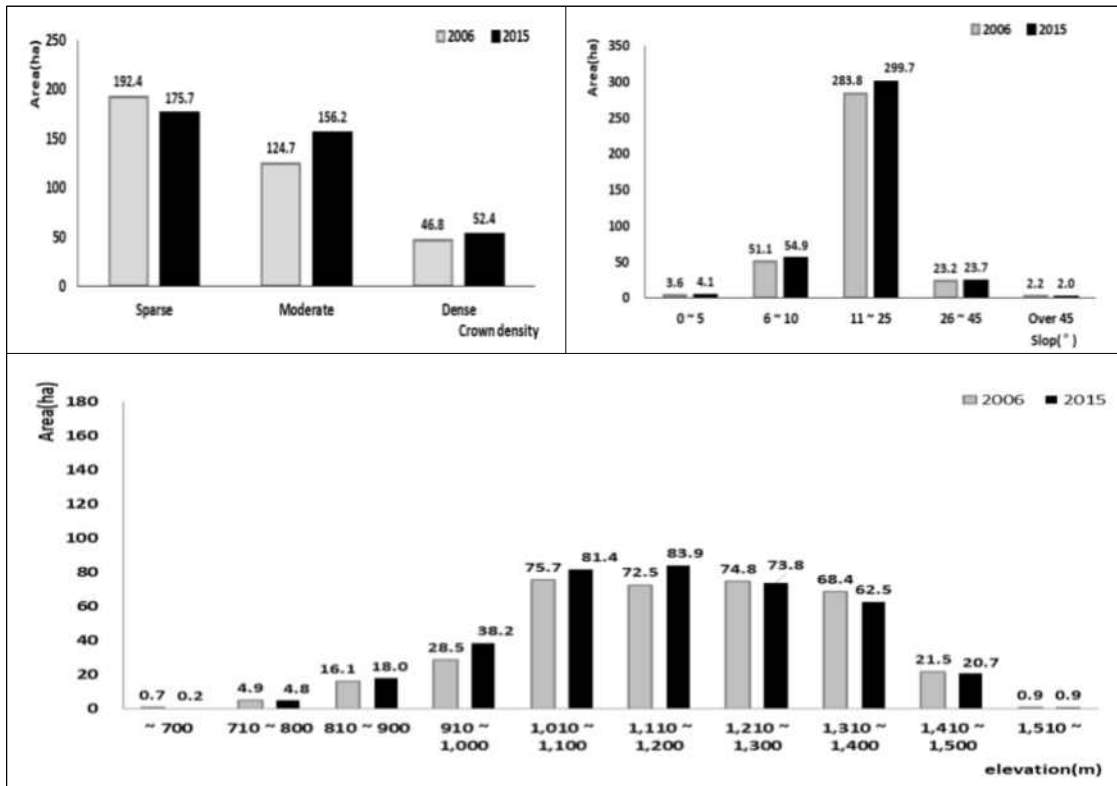


Figure 25. Changes of Korean red pine forest in the Ibseogoreum area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(3) 영실 지역

영실 지역 소나무림 분포 변화는 10년 동안 소밀도 면적이 35.7ha로 증가한 반면 조밀도 면적은 30.9ha가 감소하였다(Figure 26). 특히, 조밀도에 해당하는 수관밀도 등급이 중밀도나 소밀도로 등급하락 폭이 크게 발생하였지만 일부 면적제외 밀도에서 수관밀도가 높은 등급으로 진입도 가장 활발하게 이루어져 면적이 증가한 지역이다.

이들 지역의 해발고도별 소나무림은 해발 1,010m~1,400m 구간이 주요 분포지역인데, 이중 해발 1,010m~1,300m 구간에서 16.3ha가 증가하였다. 경사에 따라서는 모든 경사 구간에서 다소 증가된 것으로 나타나, 경사 구간에 따른 차이는 나타나지 않았다. 그리고 방위는 남쪽과 남서방향에 66%가 분포하며 16.7ha가 증가한 것으로 분석되었다.

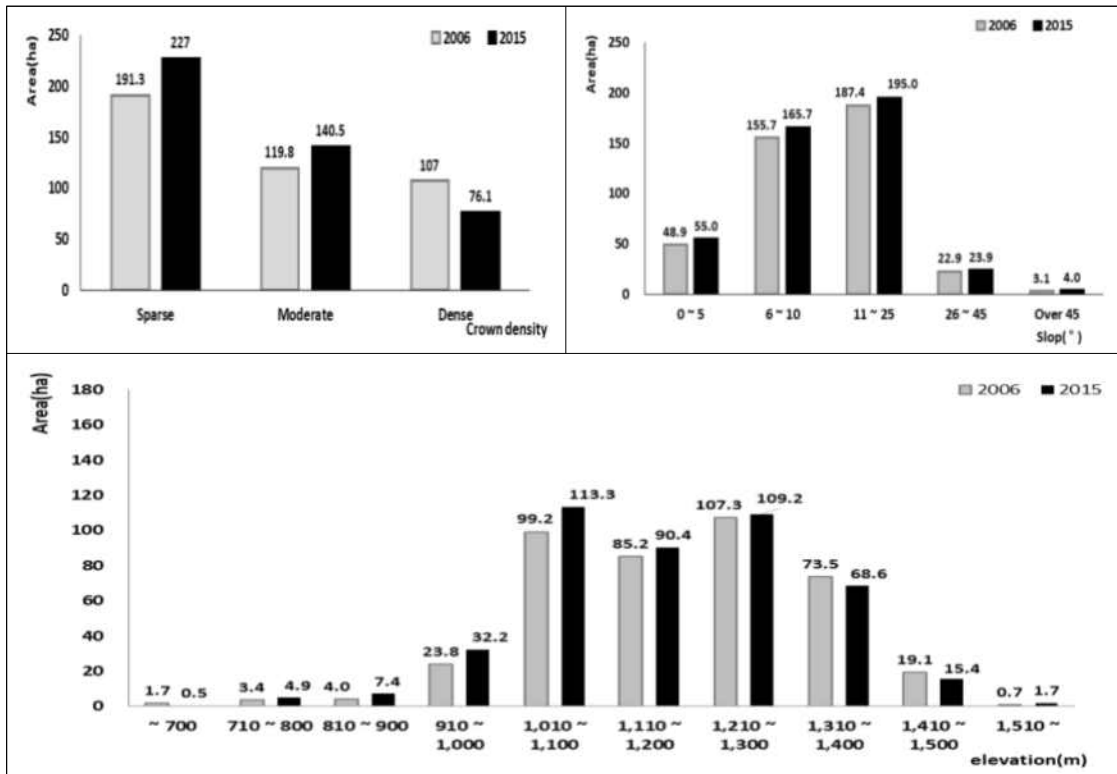


Figure 26. Changes of Korean red pine forest in the Yeongsil area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(4) 개미등 지역

개미등 지역 소나무 수관밀도의 10년 동안 변화는 조밀도 등급 면적이 40.6ha로 가장 많이 감소한 반면 소밀도는 41.6ha 증가하였다(Figure 27). 이는 영실 지역과 유사한 결과를 보이지만, 면적제외 밀도에서 소밀도 등급으로 변화가 활발하지 않는 것이 특징적이라 할 수 있다. 면적제외 밀도급에서 수관밀도 등급 소나무림으로 7.4ha가 확대된 것으로 분석할 수 있다.

해발고도별 소나무림은 해발 710m~1,000m 구간에서 15.6ha가 증가하였고, 1,010m 이상 지역에서는 감소되는 경향을 보였다. 소나무림의 변화는 경사별로는 차이가 없는 것으로 나타났다. 방위별로는 북쪽을 중심으로 북서와 북동지역에 대부분 분포하지만 면적은 감소한 반면 다른 방위에서는 증가한 것으로 분석되었다.

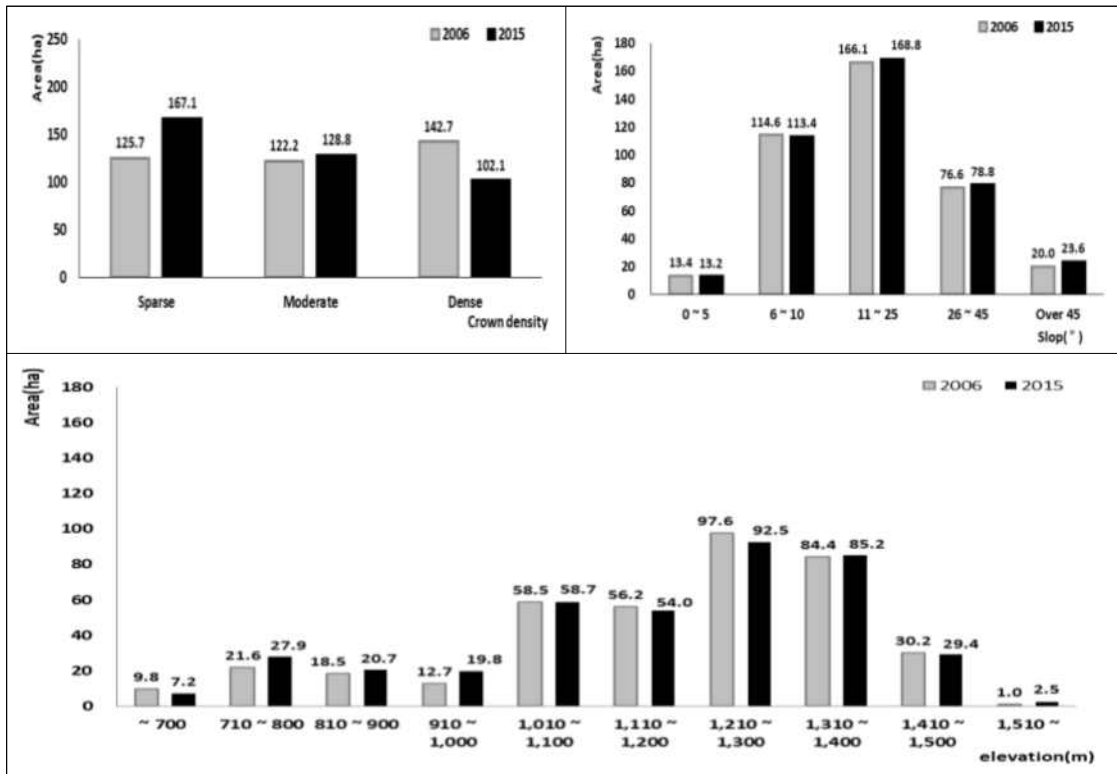


Figure 27. Changes of Korean red pine forest in the Gaemideung area of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

(5) 주요 지역별 생육등급 단계 제시

한라산 주요 지역별 소나무림 수관밀도 변화에 따른 생육등급을 5단계로 구분하여 제시하였다(Table 10).

개척기에 해당하는 소나무 군락은 중밀도와 소밀도 등급이 꾸준히 증가하고 있고, 치수들의 발생이 관찰되고 있어 향후 소밀도 등급으로 진입을 할 수 있는 성장이 이루어지는 지역이다. 개미등과 입석오름 지역인 남벽에서 평귀대피소 근처의 일부 지역이 해당이 된다.

도입기에 해당하는 등급은 계속해서 수관밀도 등급의 상승이 이루어지고 있으며, 면적제외 밀도 등급에서 소밀도 등급으로 증가가 두드러지는 단계로 구분할 수 있다. 개미등 지역의 소나무림이 해당이 된다.

성장기에 해당하는 등급은 새롭게 소밀도 등급으로의 진입은 줄어들고 중밀도에서 조밀도 등급이 증가하는 단계로 수관의 확장이 두드러지는 단계로 구분할 수 있

다. 입석오름을 중심으로 하는 지역의 소나무림이 해당이 된다.

성숙기에 해당하는 등급은 조밀도로의 등급 상승이 계속적으로 이루어지며 상대적으로 소밀도와 중밀도 등급의 면적이 감소되는 경향이 있는 단계로 중밀도와 소밀도 면적이 비슷한 특징을 가지고 있다. 속밭 지역 소나무림이 해당된다.

쇠퇴기에 해당하는 소나무림의 등급은 조밀도와 중밀도 등급의 수관 감소가 일어나 소밀도 등급이 증가하거나 면적제외 밀도로 하락하여 전체적인 소나무림의 감소가 이루어지는 단계로 구분할 수 있다. 영실 지역 소나무림이 해당된다.

Table 10. Growth grades presented in the Korean red pine forest of Mt. Hallasan

Growth grade	Characteristics by crown density	Korean red pine forest regions
Pioneer	Moderate ↑ Sparse ↑	Some areas around Gaemideung, Ibseogoreum
Introduction	Dense ↓ < Moderate ↑ < Sparse ↑	Gaemideung
Growth	Dense ↑ < Sparse ↑ ≤ Moderate ↑	Ibseogoreum
Maturity	Dense ↑ < Moderate ↓ ≤ Sparse ↓	Sogbat
Decline	Dense ↓ < Moderate ↓ < Sparse ↑	Yeongsil

4. 고찰

한라산국립공원 내 소나무림은 2006년과 2015년의 분포 결과를 보면, 2006년에 1,208.ha에서 2015년에는 1,259.5ha로 나타나 10년 동안 11% 이상 수관밀도를 갖는 소나무림이 51.4ha가 증가한 것으로 분석되었다. 이 결과는 기존에 발표된 한라산 소나무림 면적과는 많은 차이를 보였다(Song et al., 2012; Jeju Special Self-Governing Province, 2017). 이는 소나무의 수관밀도 10% 이하 지역을 분포면적에서 제외하는 등의 면적산출 방법의 차이나 곰솔림, 삼나무림 등 수종 판별의 오류, 기존 소나무림 면적분석 시 현지 확인 미흡 등에 따라 발생한 것으로 보인다.

한라산국립공원 내 소나무림은 남쪽을 중심으로 남동과 남서에 가장 넓은 분포를 보였으며, 이 지역을 중심으로 분포면적이 증가한 것으로 나타났다. 이는 한라산의 사면에 따라 식생구조의 차이와 함께 일조량과 수분 보유능력이 차이에서 소나무림의 발달과 연관이 높은 것으로 보인다. 더욱이 소나무림은 일조량이 많고, 토양수분이 적은 건조한 지역에서 양호한 성장을 하는 것으로 알려져 있다(Youn, 2003).

한라산 소나무림은 해발 1,010m~1,400m 구간이 가장 많이 분포하는 구간이다. 이 결과는 한라산 소나무림의 분포 중심 해발고도가 1,200m에 있다는 의견(Song et al., 2012; Kim et al., 1982)과 일치한다. 반면, 한반도에서 소나무림은 해발 1,250m 이하에 분포하고(Kong, 2004), 육지부 소나무림은 해발고도 200m~300m 사이에 가장 높은 출현 빈도를 보인다는 보고(Lee et al., 2006)와 비교할 때 한라산의 소나무림의 분포양상은 육지부와 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

이는 한라산의 해발고도별 식생 구조가 해발 600m부터 1,450m까지 낙엽활엽수림대가 분포하며(Uhm, 1962), 이들 지역에서 해발 1,000m~1,400m 구간은 소나무가 우점하는 온대 침엽수림대로 제시한 보고(Song et al., 2012)로 볼 때 한라산 소나무림은 해발고도 1,000m~1,400m의 일정 지역에 주로 분포하는 특성을 가졌다고 할 수 있다.

한라산의 주요 지역별로 보면, 속밭을 제외하고는 가장 높이 분포하는 해발고도가 상승한 것으로 조사가 되었다. 하지만, 온대 침엽수인 소나무의 생육 특성상 한라산 국립공원 아래지역으로 분포변화가 있었을 것으로도 보이지만, 한라산국립공원 지

역으로 한정 조사하여 향후 추가 조사를 통해 소나무림의 면적 확장이 고도가 높은 곳으로의 변화와 낮은 지역으로의 확장성의 방향에 연구가 필요한 것으로 판단이 된다.

한라산 소나무림은 경사 20° 이하 지역에 80%가 분포하며, 2006년 이후 10년 동안의 면적 증가는 경사와 상관을 보이지는 않았다. 반면, 강원도, 경기도 지역 소나무는 경사 15°~45° 범위에 분포하며, 그 중에서도 30°~45°에서 많이 분포한다는 보고(Kim et al., 2008)와는 다소 차이를 보였다.

한라산 방위별로 보면 남쪽을 중심으로 남서와 남동방향에 주로 분포하였다. 소나무림은 모든 방위에서 분포하나 일반적으로 남향이나 서향보다는 북향이나 동향에서 생장이 양호하다는 보고(Korea Forest Research Institute, 1999)와는 차이가 있었다. 이는 한라산 소나무림은 해양성 기후와 섬이라는 지역적인 요인(Kang, 2006)으로 육지와는 다른 양상을 보이면서 분포하는 것으로 보인다. 그리고 소나무 분포에 미치는 영향력을 비교한 Kim et al.(2008)의 결과를 보면 경사보다 방위가 소나무 공간분포에 미치는 영향력이 큰 것으로 분석되었지만 한라산에서는 그 차이를 확인할 수는 없었다.

Kim et al.(2015)은 소나무림의 확장 및 축소에 미치는 기후변수와 연령대별 영향력을 분석하였는데, 30년생 이상에서는 기온보다는 강수량에 의한 영향이 주로 나타났다. 기온변화보다 강수량이 소나무림의 분포에 더 영향을 주고, 소나무의 지리적인 분포 변화는 평균적인 기후 특성보다 건조한 시기의 강수량과 최고 한기의 기온과 같이 기후의 극한성에 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 기온 상승에 따른 수분결핍이 증가하여 결국 생장과 생리반응에 영향을 주는 가뭄과 연관된 기후환경이 소나무림의 감소를 초래할 것으로 전망한 기존 연구 (Lee et al., 2004; Seo et al., 2013; Kim et al., 2014; Kim et al., 2015)와는 상반되게 한라산 소나무림은 평균 30년 이상이며, 해양성 기후의 영향으로 기온과 강수량은 증가하고 있어 분포면적이 확장하는데 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

Chapter III. 한라산 침엽교목의 시·공간변화와 환경과의 관계 연구

1. 서론

한라산은 종급원(species pool)인 한반도로부터 멀리 떨어져 있는 관계로 많은 고유종이 자라며, 세계 식물구계에 의하면 전북식물구계(Haloartic floristic kingdom)의 동아시아식물구계구(East asiatic floristic region)에 속한다(Yoshioka, 1983; Yamazaki, 1973). 해안에서 섬 중앙의 한라산 정상에 이르기까지 환경구배에 따라 저지대의 난대성식물에서부터 고지대의 고산식물에 이르기까지 식물의 수직분포대가 나타나며, 이로 인해 많은 종류의 식물이 분포한다.

한라산을 중심으로 하는 제주도의 식물대는 해발 고도에 따라 해안식물대, 초지대, 상록활엽수림대, 낙엽활엽수림대, 침엽수림대, 관목림대로 크게 구분하며, 일반적으로 600m 이하지역에는 초지대나 난대 상록활엽수림대로 구실잣밤나무(*Castanopsis sieboldii* (Makino) Hatus.) 등이 분포 한다(Koh, 2013). 해발 600m~1,500m 이하는 온대활엽수림대로 서어나무류, 참나무류, 단풍나무류 등이 식생 천이 과정의 극상을 보여주고 있다.

한라산의 아한대(아고산대)는 1,500m 이상의 대부분을 차지하는 지역이다. 이 지역은 주로 침엽수림과 관목림으로 되어 있는데, 침엽수는 구상나무이며 일부 주목이 혼생하고 있다. 관목림은 털진달래(*Rhododendron mucronulatum* Turcz. var. *ciliatum* Nakai)-산철쭉(*Rhododendron yedoense* Maxim. f. *poukhanense* (H. Lév.) Sugim. ex T. Yamaz.)군락, 눈향나무-진달래군집, 시로미(*Empetrum nigrum* L. subsp. *asiaticum* (Nakai ex H. Itô) Kuvaev)-산겨이삭(*Agrostis clavata* Trin.)군집으로 구성되어 있다(Jejudo Hallasan Eco-Culture Research Institute, 2006).

한라산의 대표적인 침엽교목인 구상나무와 소나무는 대부분 한라산국립공원 내에 분포한다. 그러나 이들 침엽교목의 분포는 자연적인 천이와 기후변화에 따른 영향으로 많은 변화가 발생되고 있는 것으로 알려져 있다.

Koo et al.(2020)은 구상나무의 쇠퇴 및 서식지 감소의 주된 요인은 기후변화에 따른 온도상승과 봄철 강수량 등 강수량 감소에 따른 수분수지 불균형에 의한 수분 스트레스인 것으로 추정하였다. 이외에 태풍, 수분 과다, 토양환경 변화 등 다른 요인들도 제기되고 있어서 구상나무의 쇠퇴와 고사에 대한 원인은 아직 분명하게 규명되지 못하고 있다. 구상나무를 비롯하여 식물 군락의 쇠퇴 및 확장에는 한 가지 요인보다는 다양한 환경적 요인들의 영향으로 유발될 수가 있을 것이다.

따라서 본 연구는 한라산국립공원 내 침엽교목의 분포특성 및 변화현상을 분석하고, 이들 변화에 미치는 다양한 환경과의 관계를 규명하고 변화에 영향을 미치는 환경요인을 지수로 표현하고 시간적 개념으로 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

1) 한라산 침엽교목의 공간변화

한라산 침엽교목인 구상나무와 소나무의 공간변화를 조사하기 위해 국토지리정보원에서 제공받은 2006년 4월 촬영된 30cm급 정사영상과 2015년 11월에 촬영된 25cm급 정사영상을 이용하여, 대상지역을 한라산국립공원지역으로 한정하였다. Kim et al.(2017)이 제시한 격자기반 면적산출 방법을 적용하여 수관의 점유밀도와 울폐도에 따라 4개 등급으로 면적을 산출하였다. 또한 해발고도와 방위, 경사도에 따라 침엽교목이 자생하고 있는 면적변화를 조사하였다.

2) 환경 요인 자료

환경 요인분석을 위해서 2000년부터 2015년까지 문헌자료 및 보고회, 신문자료 등을 수집하여 한라산국립공원 내 침엽교목의 공간변화에 영향을 분석하였다. 이들 기간은 침엽교목의 공간분석에 따른 기간인 2006년과 2015년을 고려하여 설정하였다.

구상나무와 소나무의 공간변화에 영향을 미치는 환경요인 선정을 위한 중요도에 대한 질의는 5단계 리커트 척도형으로 관련 전문가(70명) 집단 설문을 실시하여 11가지 환경요인을 선정하였다. 설문응답자료의 내적 일관성에 대한 검증을 위해 측

정항목의 중요도에 대한 Cronbach's alpha 계수를 산정한 결과 전체 계수값이 0.743으로 유의성 기준에 적합하였다. 선정된 환경요인 값은 평균 3.93(표준편차 ± 0.391)이었다. 환경 요인 11개 중에 비생물적 요인으로 대기온도, 강수량, 태풍, 수증기압 포차(VPD), 일사량, 토양 등 6종류를 조사하였으며, 생물적 요인으로 병해, 충해, 제주조릿대, 야생동물, 갱신율 등 5종류에 대한 자료를 조사하였다.

(1) 비생물적 환경 요인

① 대기온도, 강수량

한라산국립공원 주변의 자동기상관측소는 2000년대에 접어들어 해발고도 200m 이하 해안지역을 중심으로 증가하였으나, 한라산 해발고도 200m~600m의 중산간 및 해발고도 600m 이상의 산간 지역에는 상대적으로 관측된 자료가 제한적이다(Choi, 2016). 따라서 한라산국립공원 내 7개소의 기상청 자동기상관측시스템(Automatic Weather System, AWS)에서 얻은 2000년부터 2015년까지의 자료를 이용하였으며(Table 11), 이중에 강수량 및 온도에 대한 결측값 비율이 낮은 성판악과 어리목 지점의 관측값을 사용하였다.

Table 11. List of automatic weather systems in Mt. Hallasan

Installation place	Elevation	Observation start date	Geolocation	Remark
Witseoreum	1,668	2002.12.16	N 33.3667, E 126.5167	Witseoreum Shelter
Jindallaebat	1,489	2002.12.16	N 33.3698, E 126.5557	Jindallaebat Shelter
Yeongsil	1,260	2015.12.01	N 33.3483, E 126.4964	Yeongsil Rest Area
Sajebi	1,434	2015.12.01	N 33.3760, E 126.4980	Sajebioreum
Samgakbong	1,528	2015.12.01	N 33.3769, E 126.5305	Samgakbong Shelter
Seongpanak	757	1998.05.14	N 33.3851, E 126.6194	Seongpanak Visitor Information Center
Eorimok	967	1992.11.30	N 33.3930, E 126.4959	Eorimok Visitor Information Center

② 태풍

2000년부터 2015년 사이에 발생하여 제주지역에 영향을 준 태풍으로 기상청 날씨누리(<https://www.weather.go.kr>)에서 과거태풍 및 태풍발생통계 정보를 활용하여 분석하였다. 한라산에 영향을 미친 시점을 강수량과 풍속의 변화된 시점부터 종점까지의 강수량과 풍속값을 대상으로 어리목, 성판악에 설치된 AWS에서 1시간 단위로 관측된 값을 사용하였다.

③ 수증기압포차(VPD)

수증기압포차(Vapor pressure deficit, VPD)는 대기 온도(T)와 상대습도(RH)를 이용하여 산출한다(Murray, 1967). 일반적으로 온도가 동일할 때 대기의 수증기압과 식물체 자체의 수증기압의 차이로 증산속도를 결정할 수 있어 시설원예에서 온실의 습도도절을 위해 사용하고 있는 개념으로 미기상 요인이 식물 군락분포에 미치는 영향을 이해하기 위해 사용되고 있다(Lee and Choi, 2013).

$$VPD = ae[bT/(T+c)](1-RH)$$

여기서, a는 0.611kPa, b는 17.502, c는 240.97로 계산하였다(Murray, 1967).

수증기압포차 값 분석을 위해서는 상대습도값이 필수적으로 관측값이 제공되는 윗세오름, 진달래밭, 어리목 등 3개 지점의 AWS에서 측정된 2011년~2015년까지의 자료를 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmmn>)에서 제공받아 가공하여 분석하였다.

④ 일사량

일사량은 2017년 한라산 천연보호구역 기초 학술조사에 따른 일사량 분석 자료를 사용하였으며, 고정밀 항공라이다 측량으로 획득된 지형자료에 ESRI사의 ArcGIS10.5에서 제공하는 일사량 분석기능을 적용하여 맑은날 기상을 기본 조건으로 일사량을 분석하였다.

특정 시간대에 태양의 복사량은 지형 자료에 따른 태양의 입사각과 방향각을 중심으로 계산되며, 그 외에도 지구 복사에너지 등을 함께 계산하여 합하였다. 일사량

자료를 QGIS 3.10 프로그램을 이용하여 구상나무 분포 레이어와 래스터 분석(구역통계)을 통해 구상나무림 분포지 일사량 값을 분석하였다. 소나무림 분포지역은 일사량 분석 자료가 없어 생략하였다.

⑤ 토양

한라산 침엽교목림의 토양 화학적 성질을 분석하기 위해 구상나무림이 분포하는 윗세오름과 성판악 지역의 2005년, 2010년, 2015년도 토양 분석 결과를 사용하였다(Kwon, 2006; Koh et al., 2010; Lee et al., 2011). 소나무림이 분포하는 영실, 속밭, 1100도로 지역의 2010년과 2015년도의 토양분석결과를 사용하였다(Kwon, 2006; Koh et al., 2010).

토양의 이화학적 성질은 농촌진흥청 분석법(Rural Development Administration, 2000)에 준하여 분석하였다. 채취한 시료를 풍건시킨 후 2mm 체에 통과된 토양시료를 사용하였다. 토양 pH는 토양과 증류수의 비를 1 : 5로 하여 pH meter로 측정하였고, 전기전도도는 pH를 측정하고 남은 여액을 EC meter를 이용하여 측정하였다. 유기물함량은 Walkley와 Black법, 유효인산은 Lancaster법, 전질소함량은 Kjeldahl 법으로 측정하였다. 치환성양이온 K, Ca, Mg 및 Na는 1N ammonium acetate(pH 7.0)용액 50ml를 가하여 30분간 진탕한 다음 여과하여 얻어진 여액을 원자흡광분광광도계(AAS)를 이용하여 측정하였다.

양이온치환용량은 1N NH₄OAc(pH 7.0)로 포화하고 80% ethyl alcohol로 세척한 후 토양을 Kjeldahl 증류장치에 의해 NH₄⁺ 함량을 정량하여 산출하였다.

X-선 회절분석(X-Ray Diffractometer, XRD)은 토양시료를 체분석과 침강법을 이용하여 2 μ m 이하의 점토를 분리시킨 후 실시하였다. Philips사의 X'Pert-MPD System을 사용하였으며, CuK α 선과 Ni-filter에 의한 X-선을 이용하였다. 분리된 점토분에 한하여 포함된 점토광물은 에틸렌글리콜(ethylene glyco) 처리 및 가열처리 등을 통하여 식별하였다. 또한 X-선 형광분석(X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)은 Shimadzu사의 XRF-1700을 사용하였으며, 분석항목은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, TiO₂, MgO, P₂O₅, MnO 및 LOI 등으로 총 11개 성분이다.

(2) 생물적 환경 요인

2000년대 이후부터 보고된 문헌자료 등으로 한라산국립공원 내 서식하면서 침엽수를 기주식물(먹이)로 하는 병이나 해충, 야생동물 리스트를 만들어 대상 병해충 및 종에 대해 관련 자료를 분석하여 위협 및 확장요소를 판단하였다. 제주조릿대 (*Sasa quelpaertensis* Nakai, Jeju Sasa)는 2018년 제주특별자치도 세계유산본부에서 발표된 제주조릿대 관리방안연구 결과 자료를 활용하여 한라산국립공원 내 분포지역과 한라산 침엽교목의 분포지역을 비교하여 분석하였다.

야생동물은 침엽수에 피해가 보고된 종과 타 지역 침엽수 피해종을 대상으로 한라산 침엽교목림에 피해가 예상되는 종에 대하여 조사하였다.

갱신율은 숲이 유지되기 위해서는 필수요소이다. 숲의 지속성을 위해서는 성목도 중요하지만 후대의 숲이 될 종자 결실률과 종자가 발아하여 치수로 되는 치수발생율, 또한 치수에서 성목이 될 성목성장율이 높아야 한다. 일반적으로 소나무 숲 천연갱신을 위해서는 1,000개체의 치수가 5개의 성목으로 성장할 수 있다(Lee and Kim, 1989)고 하였다. 이를 근거로 성목 성장지수를 0.005로 산정하여 갱신율을 구하였다.

$$\text{갱신율} = (\text{치수발생} \times \text{성목 성장지수}) / \text{고사목}$$

3) 환경 요인에 따른 침엽교목림 위협 및 확장지수

환경 요인으로 제시한 11가지 요인으로 식물군락에 위협과 확장에 관여하는 환경 요인들에 대한 기준값을 설정하고 요인에 대한 시간적 지속성을 감안하여 지수값을 부여하였다. 또한 확장과 위협에 관여하는 중요도에 따라 가중치를 부여하여 종합적으로 부여된 지수값의 범위에 따라 군락변화를 시간적으로 예측하고자 하였다.

3. 결과

1) 한라산 침엽교목림 공간변화

(1) 한라산 침엽교목림 분포 및 수관밀도 변화

한라산 대표 침엽교목인 구상나무와 소나무를 2006년과 2015년간 10년 기간의 변화를 정사영상을 이용하여 한라산국립공원 일대 침엽교목 수관밀도 분포를 분석하였다. 그 결과, 2015년에 수관분포 밀도가 11% 이상을 차지하는 침엽교목림의 전체 면적은 1,886ha로 나타났다(Figure 28, 29). 이중 수관분포면적이 15m×15m 격자에 11%~40% 범위에 포함되는 소밀도 등급은 전체면적의 47.8%에 해당하는 901.6ha로 나타나 가장 높은 비율을 차지하였다(Table 12). 수관밀도 41%~70%에 해당하는 중밀도 면적은 689.3ha는 전체 분포면적의 36.5%이다. 71% 이상의 수관밀도를 지닌 조밀도는 15.6%인 295ha로 분석되었다.

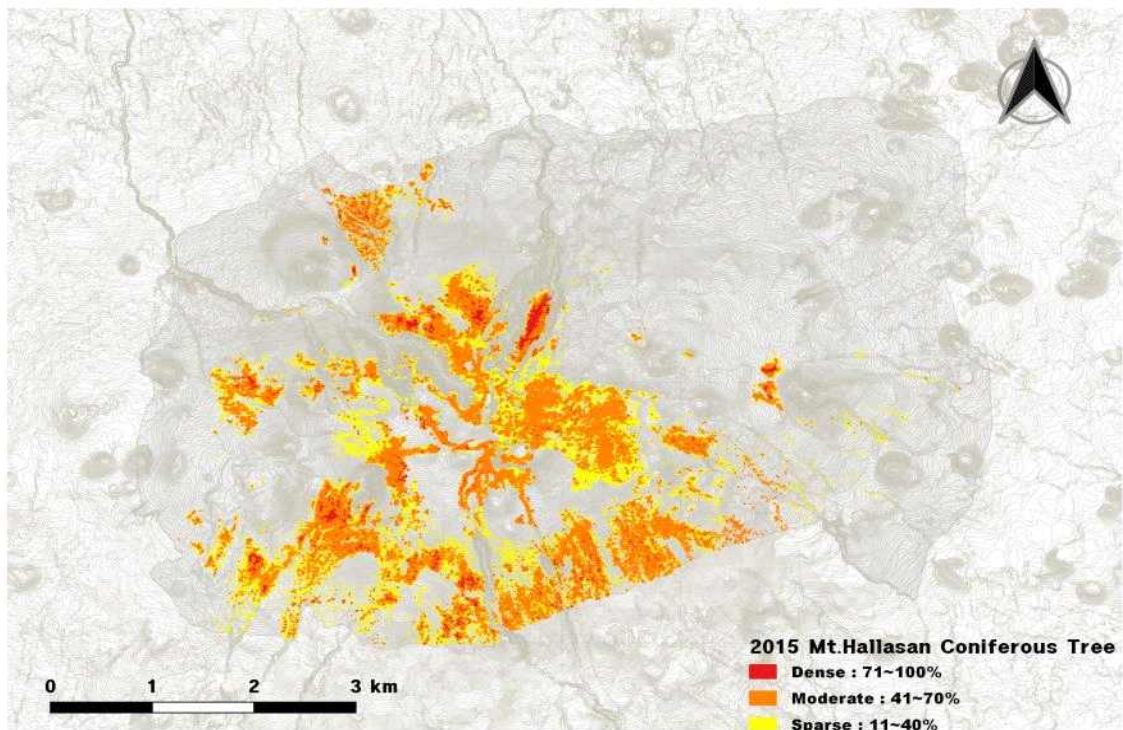


Figure 28. Distribution area of coniferous tree in Mt. Hallasan in 2015.

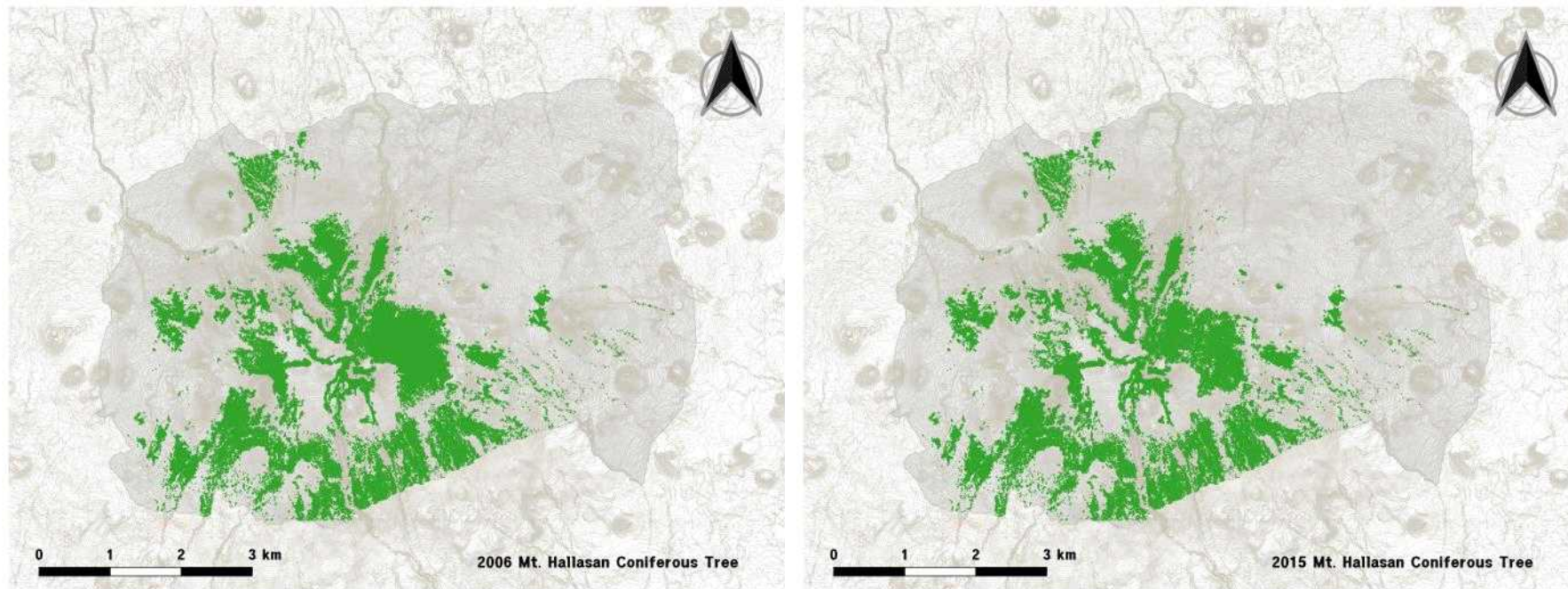


Figure 29. Changes of coniferous tree of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

2006년의 침엽교목의 전체면적은 2015년보다 60.8ha 많은 1,946.7ha로 나타났다 (Figure 29, 30, Table 12). 이중 소밀도 등급에 해당하는 면적은 860ha로 전체의 44.2%에 해당한다. 중밀도의 경우 703.1ha, 조밀도는 383.6ha로 분석되었다.

2015년의 침엽교목의 밀도등급별 변화를 2006년과 비교하면 조밀도는 전체적으로 38.0%가 감소되어 매우 큰 변화를 보였다. 또한 중밀도에서도 2.0%로 다소 감소된 것으로 나타났지만 소밀도에서는 4.8%가 증가된 것으로 분석되었다. 이는 조밀도 등급이 중밀도 또는 소밀도로 수관밀도가 낮아진 것으로 보이며, 중밀도나 소밀도의 상당 부분은 11% 이하의 밀도제의 등급으로 변화된 것으로 판단된다.

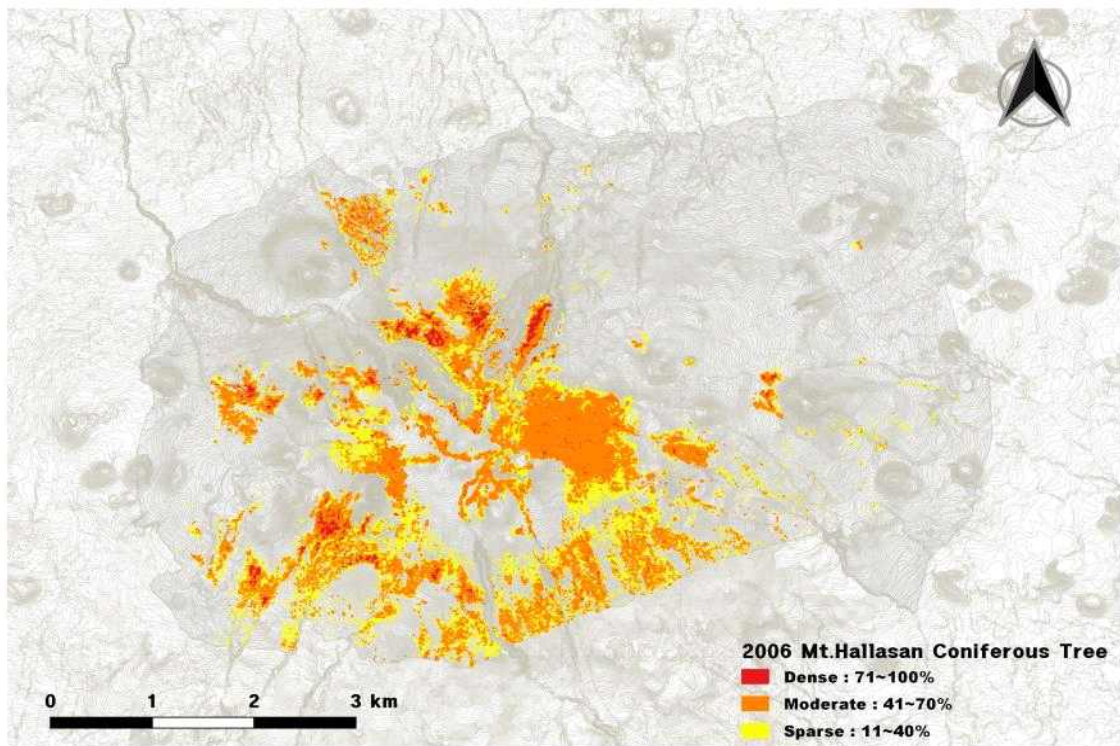


Figure 30. Distribution area of coniferous tree in Mt. Hallasan in 2006.

한라산 침엽교목들은 10년 동안 수관밀도 등급이 낮아지고 있으며 수관밀도 11% 이하의 등급제외 밀도로의 진행이 높아지고 있었다. 이는 침엽교목의 생육환경의 변화가 진행되고 있음을 짐작할 수 있다.

Table 12. Spatial and temporal changes of coniferous tree in Mt. Hallasan to 2006, 2015

Crown density	Area by year(ha)		Area change(ha)	Change ratio(%)
	2015	2006		
Sparse	901.6	860.0	41.6	4.8
Moderate	689.3	703.1	-13.8	-2.0
Dense	295.0	383.6	-88.6	-38.0
Total	1,885.9.	1,946.7	-60.8	-3.1

(2) 해발고도별 한라산 침엽교목림 변화

한라산 침엽교목림의 해발고도별 분포 변화를 보면, 크게 해발 1,010m~1,400m 구간과 1,510m~1,700m 구간에서 상대적으로 넓은 면적이 분포하고 있는 것으로 나타났다(Figure 31). 이는 구상나무와 소나무가 우점하고 있는 해발고도가 서로 중복되지 않고 있음을 보여 주는 것이다(Figure 5, 17). 즉, 소나무림의 경우 해발고도 1,010m~1,400m에서 우점하며, 구상나무림의 경우 해발고도 1,510m~1,700m에서 가장 많은 밀도로 생육하고 있는 것이다.

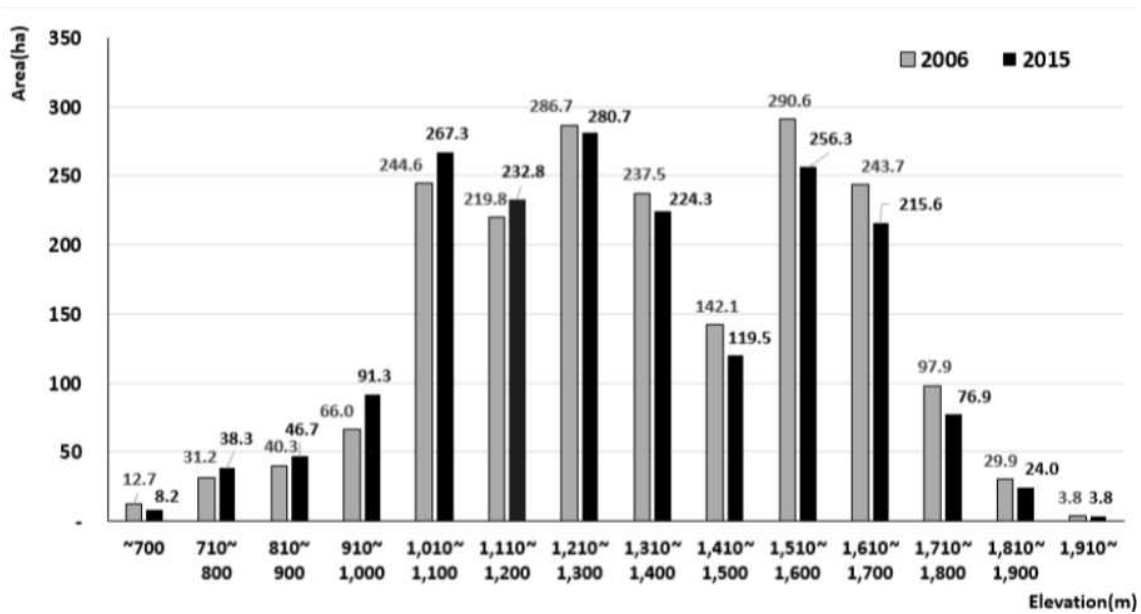


Figure 31. Changes of coniferous tree according to elevation in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

전체적으로 해발고도 1,510m~1,600m 구간에서 침엽교목의 면적이 2006년에는 가장 넓었지만, 2015년에는 해발고도 1,210m~1,300m 구간의 침엽교목 면적이 가장 넓어지는 변화를 가져왔다. 이들 중간지점에 해당되는 해발 1,410m~1,500m 구간은 소나무가 기후변화 등의 원인으로 해발고도 상승이 시작되는 구간이면서 구상나무림의 면적이 줄어든 구간이기도 하다.

이와 같은 결과는 앞으로 이 구간의 구상나무와 소나무의 면적변화 양상을 보면 두 종의 미래가 보일 것으로 예측된다. 즉, 구상나무의 고지대로의 후퇴와 소나무의 전진이 만나는 1,410m~1,500m 구간의 두 종의 점유면적 변화가 한라산 구상나무와 소나무의 변화 양상을 대변하는 해발고도일 것으로 보여 진다(Figure 32). 하지만, 해발 1,510m~1,600m 구간은 구상나무의 우점도율(RDR) 높게 나타나고 있어, 침엽수종의 위협과 확장에 영향을 미치는 환경요인이 발생한 이후에 면적변화가 발생할 것으로 예측이 된다.

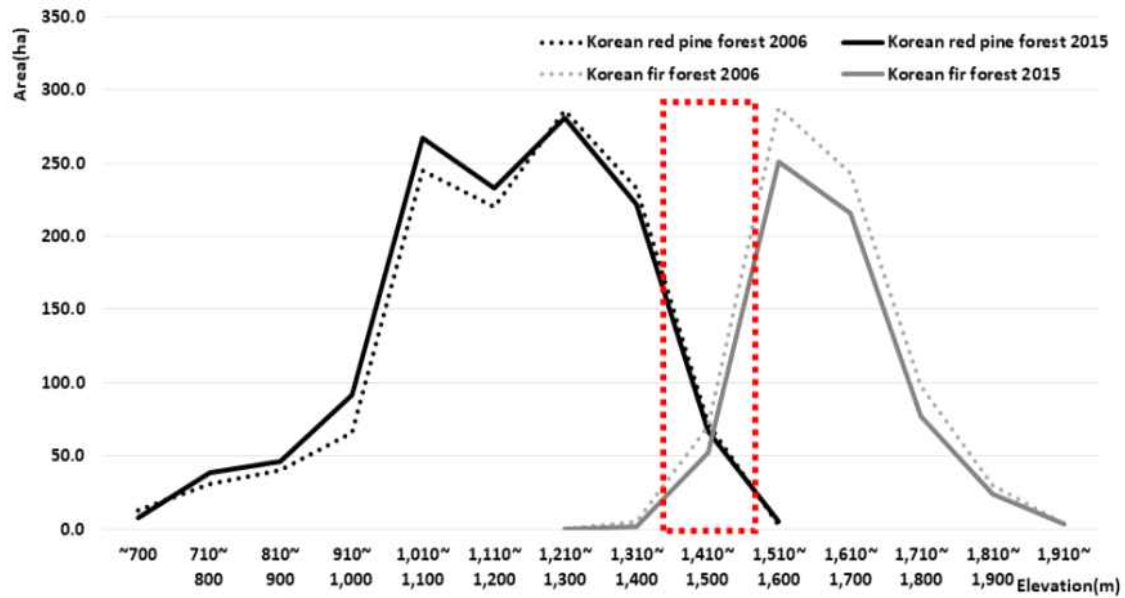


Figure 32. Changes of Korean fir forests and Korean red pine forests to altitude of Mt. Hallasan to 2006, 2015.

한편, 한라산 침엽교목림이 해발고도에 따라 차지하는 면적에 대한 상대적인 RDR값의 변화를 보면 해발고도 1,200m 구간을 기점으로 2006년과 2015년간의 해발고도별 비율이 1,200m 이하 지역은 RDR값이 증가한 반면 1,200m 이상 지역은 RDR값이 감소한 것으로 조사되었다(Table 13).

이는 온대활엽수림대에 우점하고 있는 소나무림의 증가는 계속되는 반면 아고산대 침엽교목림의 구상나무림의 감소는 계속되었다는 것을 의미한다. 해발 1,300m 이상지역의 침엽교목림이 우점하는 비율은 낮아지고 있는데, 특히 해발 1,710m~1,800m 구간의 우점비율의 감소폭이 가장 높게 나타나고 있는 것으로 분석되었다.

Table 13. Changes of coniferous forest to elevation in the Hallasan to 2006, 2015

Elevation(m)	Ht. Hallasan Area(ha)	Area by year(ha)		RDR(%)	
		2006	2015	2006	2015
~ 700	2,147.2	12.7	8.2	0.59	0.38
710~800	1,918.6	31.2	38.3	1.63	2.00
810~900	1,604.3	40.3	46.7	2.51	2.91
910~1,000	1,559.2	66.0	91.3	4.23	5.86
1,010~1,100	2,245.3	244.6	267.3	10.89	11.90
1,110~1,200	1,616.3	219.8	232.8	13.60	14.40
1,210~1,300	1,183.6	286.7	280.7	24.22	23.72
1,310~1,400	948.6	237.5	224.3	25.04	23.65
1,410~1,500	671.8	142.1	119.5	21.15	17.79
1,510~1,600	680.6	290.6	256.3	42.70	37.66
1,610~1,700	539.5	243.7	215.6	45.17	39.96
1,710~1,800	186.3	97.9	76.9	52.55	41.28
1,810~1,900	65.8	29.9	24.0	45.44	36.47
1,910 ~	10.9	3.8	3.8	34.86	34.86
Total	15,378.8	1,947	1,886	12.66	12.26

(3) 방위 및 경사별 한라산 침엽교림 변화

방위별 한라산 침엽교목림의 분포는 남쪽이 가장 면적이 넓었으며, 다음으로 남동, 북서, 동쪽 순이며, 서쪽방향의 면적이 상대적으로 가장 적었다. 특히 남쪽과 남서방향이 2006년에 비해 2015년은 면적이 26ha가 증가하였으며, 북향을 중심으로는 54.1ha 감소하였다(Table 14, Figure 33). 특히, 침엽교목림 방위별 RDR값의 비율변화는 남쪽은 2006년과 2015년을 비교하면 분포비율이 1.08%가 증가하면서 동일하게 남향의 RDR 비율이 증가하는 경향을 보이고 있다.

Table 14. Changes of coniferous trees forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015

Azimuth	Ht. Hallasan Area(ha)	Area by year(ha)		RDR(%)	
		2006	2015	2006	2015
FLAT(-1)	736.6	44.4	47.9	6.03	6.50
NORTH	2,840.5	227.8	209.7	8.02	7.38
NORTHEAST	1,754.4	165.8	148.6	9.45	8.47
EAST	1,829.7	203.7	184.6	11.13	10.09
SOUTHEAST	2,093.8	274.5	261.4	13.11	12.48
SOUTH	1,757.7	403.8	422.7	22.97	24.05
SOUTHWEST	1,273.3	243.9	251	19.15	19.71
WEST	1,016.5	182.1	178	17.91	17.51
NORTHWEST	2,076.0	200.8	182	9.67	8.77
Total	15,378.8	1,946.8	1,885.9	12.66	12.26

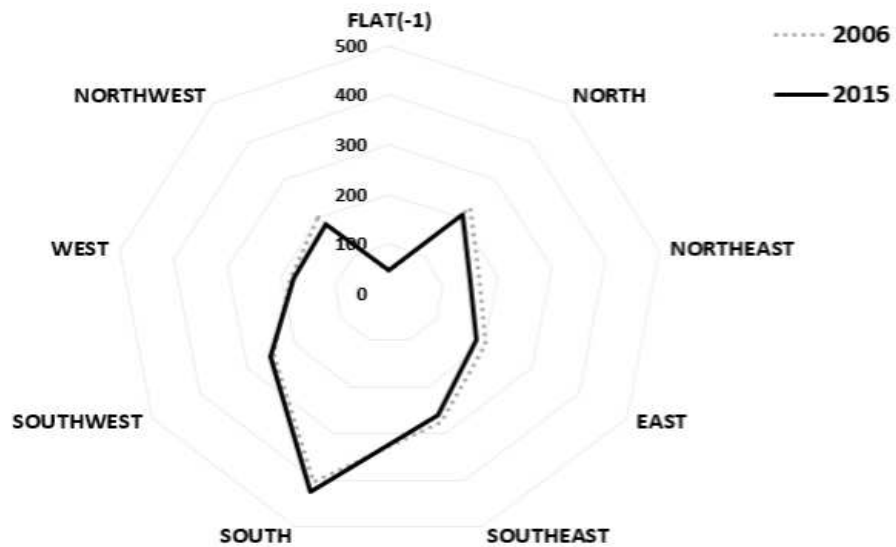


Figure 33. Changes of coniferous trees forest according to azimuth in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

한라산 침엽교목림은 경사 11°~25° 사이에서 가장 많이 자생하고 있으며 2006년은 전체면적의 53.2%, 2015년에는 47.5%로 분석되었다(Figure 34). 경사에 따른 시간적 변화를 보면 경사가 낮을수록 2006년과 비교하여 2015년에 면적이 증가하는 것으로 조사되었으며, 반면 경사가 급할수록 면적이 감소하고 있다. 0°~5°사이 구간의 경우 분포면적이 2006년 보다 두 배가 증가한 것으로 분석되었다.

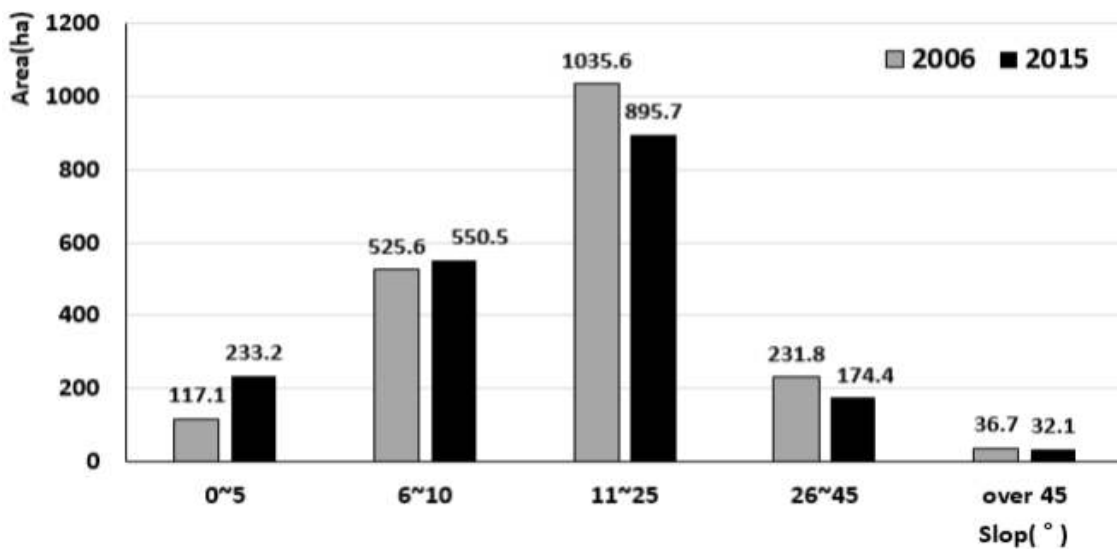


Figure 34. Changes of coniferous trees forest according to slop in Mt. Hallasan to 2006, 2015.

2) 환경 요인 분석에 따른 침엽교목림 위협 및 확장지수 산정

침엽교목림의 시·공간적인 변화를 군락의 면적 증가와 감소로 구분하여 환경요인에 따른 영향을 분석하였다. 이들 환경요인은 11개의 항목을 선정하였는데, 비생물적 요인으로는 기온, 강수량, 수증기압포차, 일사량, 태풍, 토양 등 6개 항목이, 생물적 환경요인으로는 충해, 병해, 야생동물, 제주조릿대, 갯신울 등 5개 항목으로 구분하였다. 이와 같은 환경요인의 항목 선정은 지금까지 한라산 침엽교목림의 쇠퇴와 확장의 원인을 단일요인이 아니라 다양한 요인이 복합적으로 영향을 준다고 알려져 있기 때문이다.

이번에 제시한 환경요인 중에 병해충, 일사량, 제주조릿대, 야생동물, 갯신울에 대

한 기준값 산정을 위한 기초 자료가 부족하여 관련 전문가들의 의견을 반영하여 기준값을 산정하였다.

침엽교목림의 위협 또는 확장에 영향을 판단하기 위해 환경요인을 지수로 수치화하여 분석하였다. 이러한 지수 값에 대한 범위를 시간적으로 분류하여 군락의 확장과 위협정도를 판단하였다. 다만, 환경요인 중 현지 측정이 이루어지지 않은 환경요인에 대해서는 군락의 확장과 위협의 범위 값에서 제외하여 판단하였다.

(1) 비생물적 환경 요인

① 대기온도, 강수량

㉠ 환경요인 분석

2000년~2015년 동안의 제주지역 4개소(제주, 성산, 고산, 서귀포) 비산림지역과 한라산 어리목과 성판악 산림지역에 대한 강수량과 평균 기온변화를 산출하고 분기별로 나누어 특성을 분석하였다(Figure 35). 이는 산림지역과 비산림지역의 강수량과 온도의 변화 양상을 비교하고 한라산 침엽교목림의 자생지의 변화를 파악하기 위한 것이다.

비산림지역의 평균기온은 $16.0^{\circ}\text{C}(15.7^{\circ}\text{C}\pm 16.5^{\circ}\text{C})$ 였고, 증가추세로 나타났으며, 연평균기온은 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 내외 변화를 보인다(Park et al., 2014). 강수량은 평균 $8,154\text{mm}(6,198\text{mm}\pm 10,883\text{mm})$ 로 년별 변동 폭이 컸지만, 추세로 볼 때는 감소추세로 분석되었다. 2005년의 강수량과 평균기온이 전체평균보다 낮았으며, 2003년과 2007년의 강수량과 평균기온은 평균보다 높은 것으로 분석되었다. 또한 제주도 남부와 동부권역에서는 서부와 북부권역에 비해 상대적으로 많은 강수량이 나타났으며, 서부권역의 해발고도 400m 이하지역은 연평균 2,000mm의 강수량을 보인 반면 남부권역의 동일한 해발고도 지역에서는 2,500mm 내외의 강수량이 나타났다(Park et al., 2014).

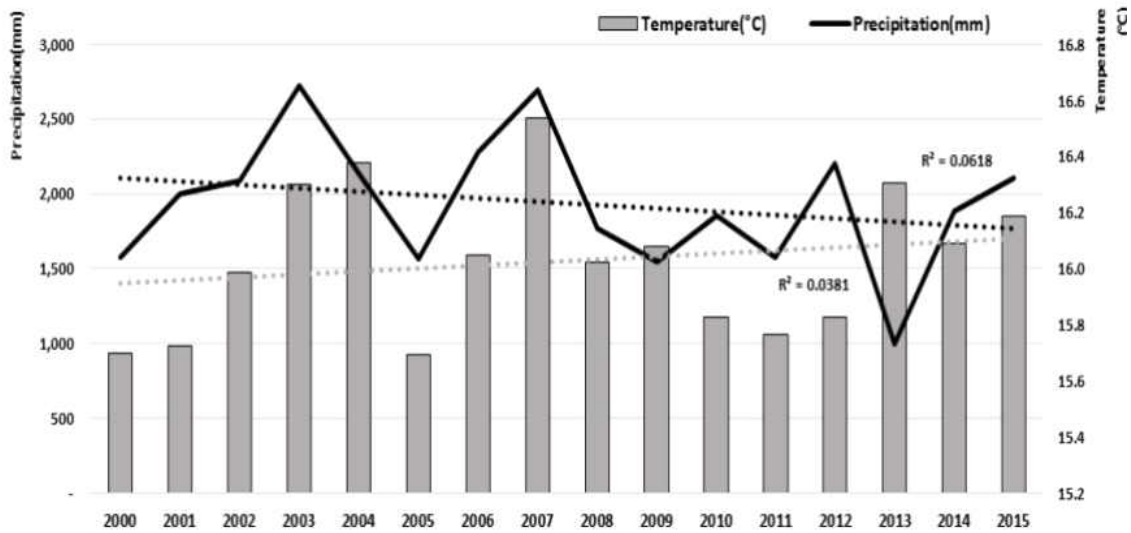


Figure 35. Changes of precipitation and average temperature from 2000 to 2015 in Jeju area(Gosan, Seogwipo, Seongsan, Jeju).

분기별 비산림지역의 2000년~2015년 동안 평균온도 및 강수량변화는 1분기와 4분기의 강수량과 온도의 평균변화는 크지 않지만 2분기와 3분기의 강수량 변화의 폭은 큰 것으로 분석되었다(Figure 36). 반면 평균온도의 변화는 크지 않았다.

한라산을 포함한 제주지역 전체 10년 동안(2000~2009년)의 평균 기후학적 사계절 개시일인 경우 봄철은 2월 21일, 여름철은 6월 7일, 가을철은 9월 30일, 겨울철은 12월 25일에 시작된다고 보고(Choi, 2019)하였다. 봄철은 남한 전체와 비교하여 20일 이상 빠르며, 여름은 해수의 영향으로 7일 이상 늦게 시작하고, 가을과 겨울은 약 8일, 약 27일씩 더 늦어지는 것으로 알려져 있다.

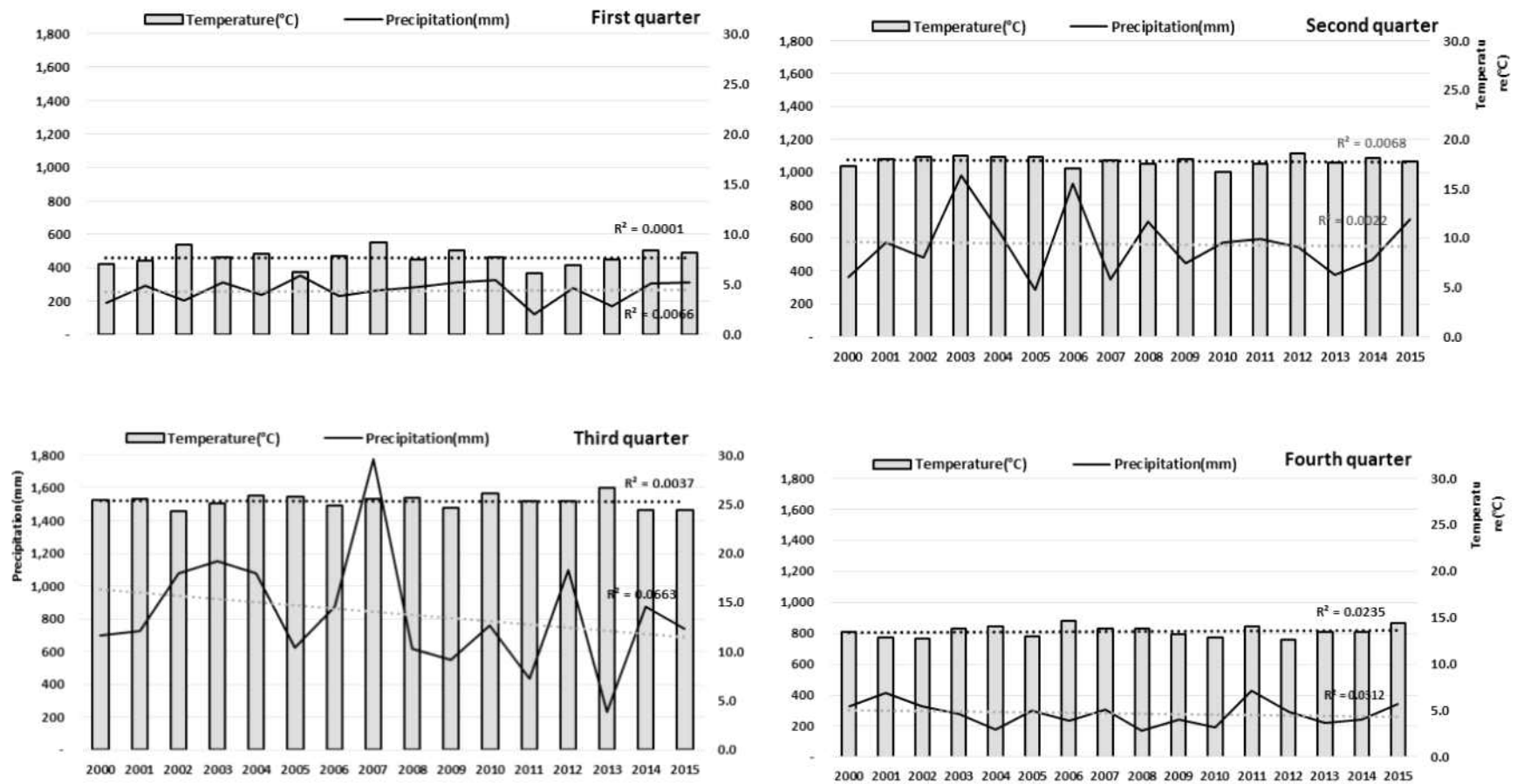


Figure 36. Changes of quarterly precipitation and average temperature from 2000 to 2015 in Jeju.

a. 성판악

산림지역인 성판악(해발고도 757m)과 어리목(해발고도 967m)을 대상으로 2000년부터 2015년 동안의 강수량과 평균기온변화를 산출하고 분기별로 나누어 특성을 분석하였다.

성판악의 평균기온은 10.9℃(10.3℃±11.7℃)로 거의 온도변화가 없었으며, 년 강수량은 평균 4,274mm(2,869mm±5,813mm)로 15년 동안의 평균 연 강수량은 가파른 증가 추세를 보였다(Figure 37).

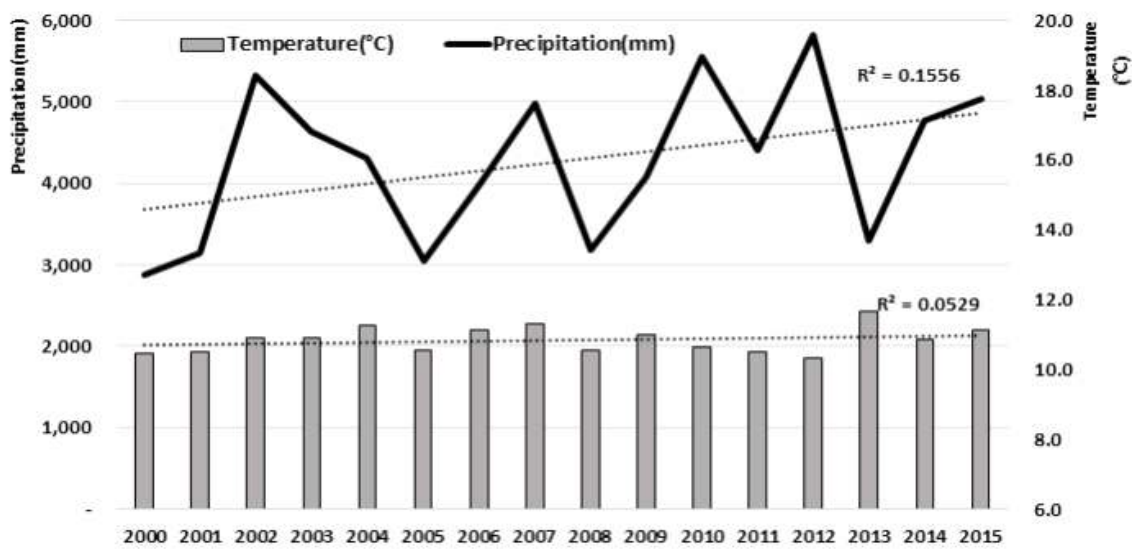


Figure 37. Changes of average annual temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Seongpanak in Mt. Hallasan.

또한 월별 강수량과 평균기온을 보면 8월에 강수가 집중되며 7월과 8월이 가장 더운 것으로 조사되었으며, 4월에 기온이 올라 11월에 낮아지는 주기를 보여주고 있다(Figure 38).

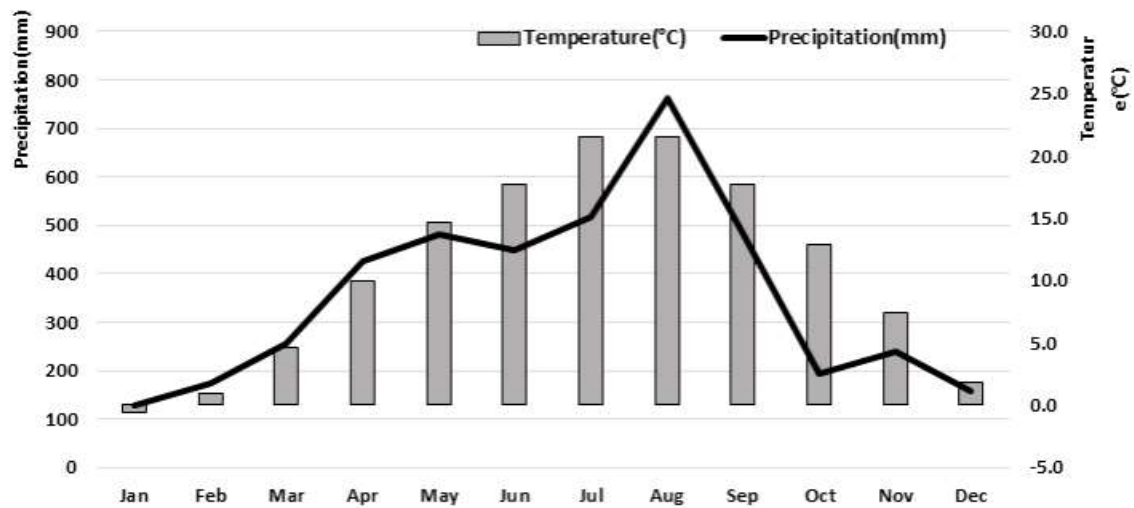


Figure 38. Changes of monthly average temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Seongpanak in Mt. Hallasan.

분기별 성판악의 평균기온과 강수량을 보면 1분기 평균기온은 1.7°C였으며, 평균 강수량은 560mm였다(Figure 39). 강수량은 증가 추세에 있으며, 2010년에는 이례적으로 1,150mm의 강수량이 기록되었으며, 다음해인 2011년에는 332mm 적은양의 강수가 기록되었다. 2분기 성판악 평균기온은 14.1°C였으며 평균강수량은 1,359mm였다. 1분기 보다는 강수량 증가세가 둔하지만 증가추세에 있다. 3분기에는 평균기온은 20.3°C였으며 평균강수량은 1,765mm였다. 2000년부터 2015년까지 강수량 피크가 3번 발생했는데 2002년, 2007년, 2012년이 2,500mm가 넘는 비가 집중되었으며 2001년, 2013년은 강수량이 1,000mm 이하를 기록하였다. 특히 2013년은 456mm의 가뭄과 22.2°C의 고온이 기록되었다. 4분기는 평균기온 7.4°C, 평균강수량 591mm였으며 기온변화는 거의 없었지만, 강수량은 증가하는 것으로 조사되었다.

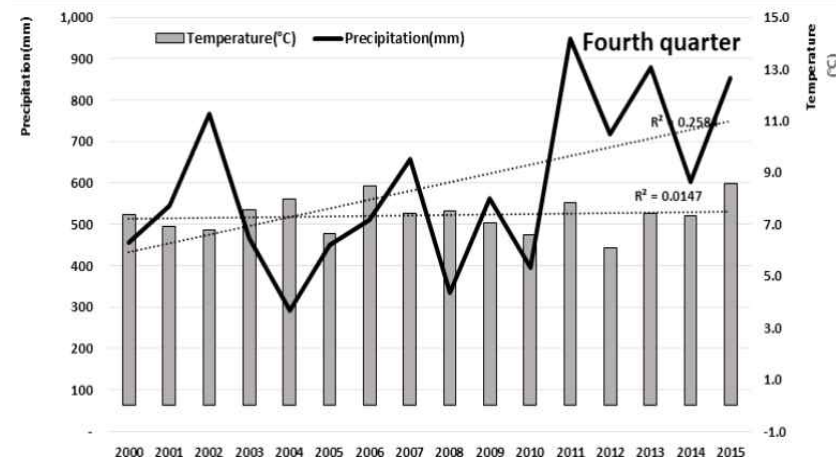
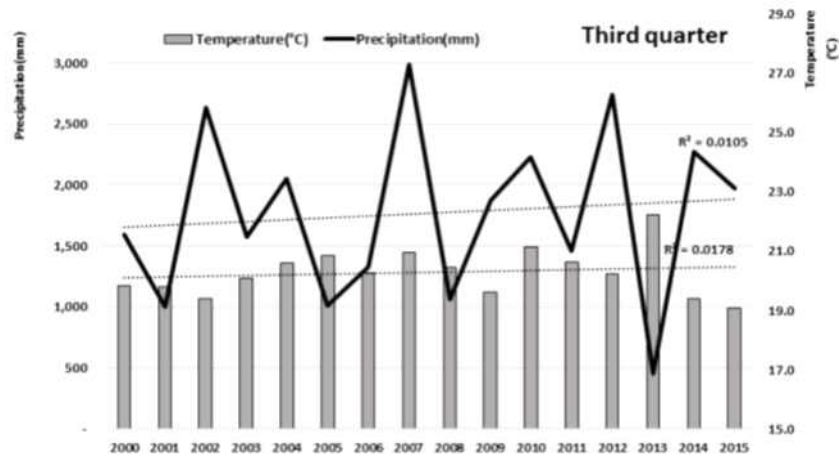
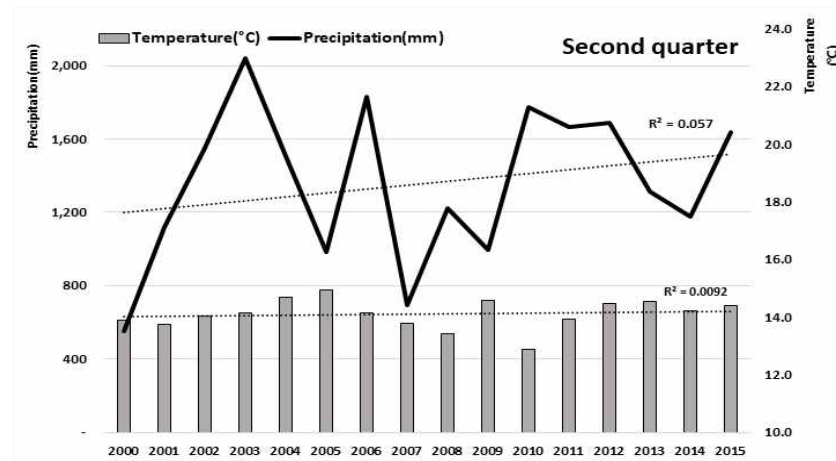
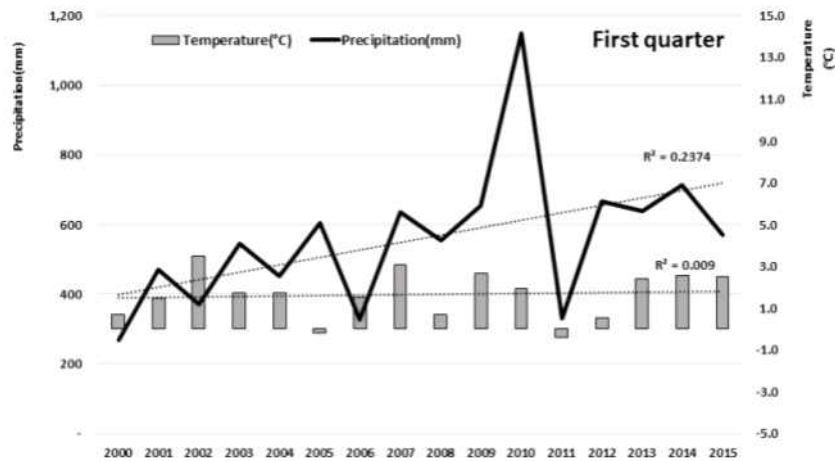


Figure 39. Changes of quarterly precipitation and average temperature from 2000 to 2015 at the Seongpanak in Mt. Hallasan.

b. 어리목

어리목의 2000년부터 2015년 사이의 평균기온은 9.7℃(9.2℃±10.2℃)로 변화가 없었으나, 년 강수량은 3,204mm(2,063mm±4,451mm)로 증가 추세로 분석되었다(Figure 40).

또한 월별 강수량과 평균기온을 보면 8월에 강수가 집중되며 7월과 8월이 가장 더운 것으로 조사되었으며, 4월에 기온이 올라 11월에 낮아지는 주기를 보여주고 있다(Figure 41). 10월부터 이듬해 3월까지의 강수량이 낮은 것으로 조사되었다.

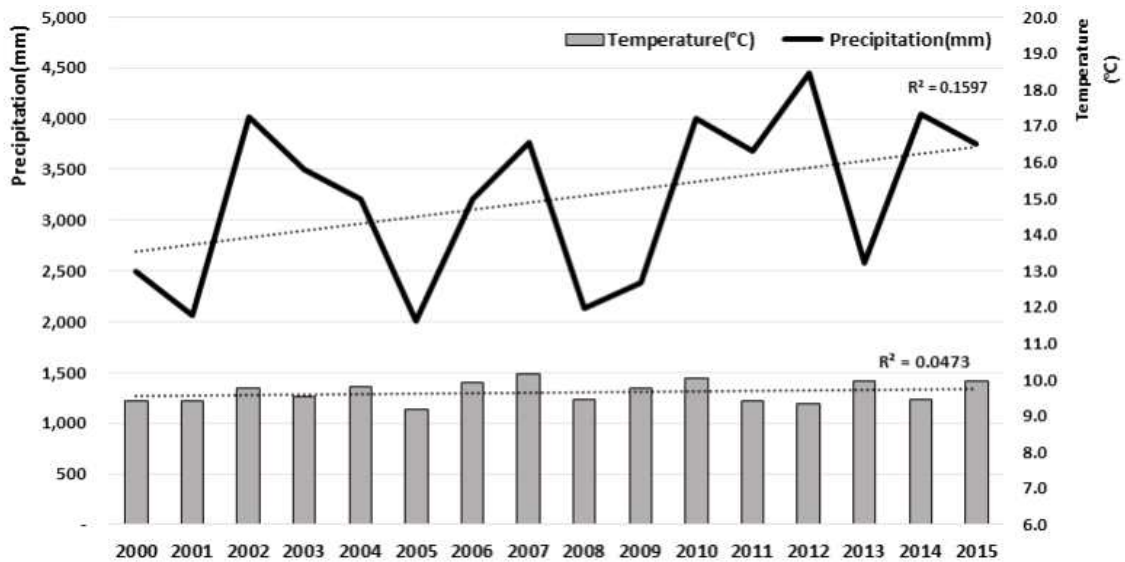


Figure 40. Changes of average temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan.

어리목의 분기별 평균기온과 강수량을 보면 1분기의 경우 평균기온은 0.0℃였으며 강수량은 412mm였다(Table 15). 강수량은 증가 추세에 있으며, 2010년에 성판악과 동일하게 강수량이 높았으며 다음해인 2011년에는 적은양의 강수가 기록되었다.

2분기 성판악의 평균기온은 13.3℃였으며 평균강수량은 830mm였고, 강수량은 증가 추세에 있다. 3분기에는 평균기온은 19.6℃였으며 평균강수량은 1,556mm였다. 이는 성판악 3분기와 추세가 유사하였다. 4분기는 평균기온 5.7℃, 평균강수량 404mm였으며 기온변화는 거의 없었지만, 강수량은 증가하는 것으로 조사되었다. 2013년 4분기에 강수가 집중되어 743.5mm를 기록하였다.

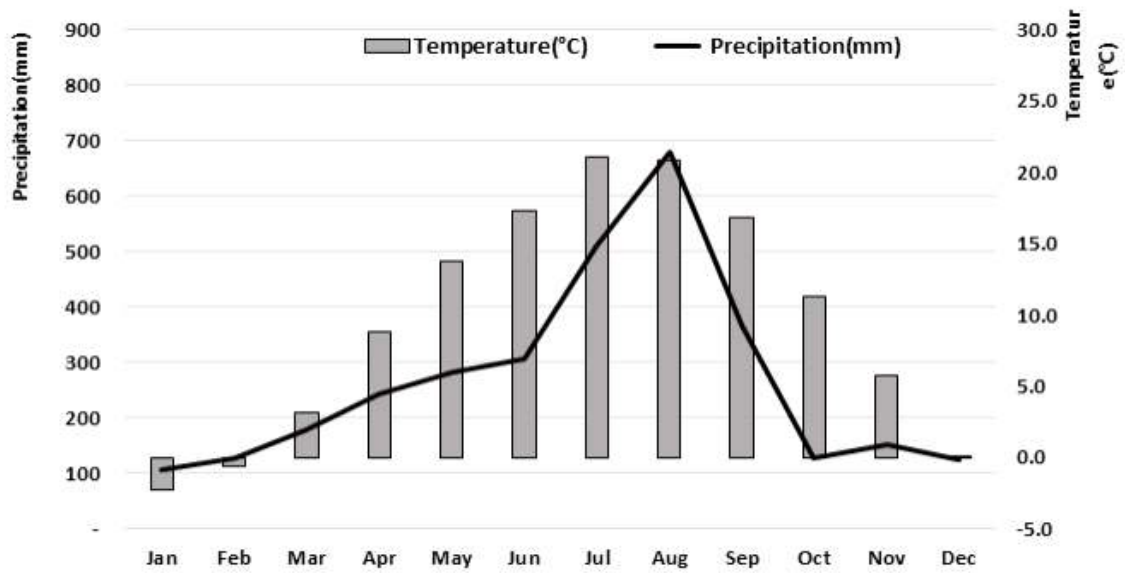


Figure 41. Changes of monthly average temperature and precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan.

2000년부터 2015년 사이의 평균기온은 거의변화가 없으나, 강수량은 꾸준히 증가하고 있다. 또한 봄철인 1~2분기의 강수량 증가가 이루어진 것으로 조사되었다. 그리고 해발고도가 높은 어리목은 성판악에 비해 강수량과 기온 측정값이 낮았으며, 특히 2분기의 강수량이 적은 것으로 분석되었다.

비산림지역인 제주지역 4개소와 산림지역인 한라산지역 2개소의 평균기온과 강수량 변화를 보면 비산림지역의 강수량은 감소경향에 있으며, 기온은 상승경향에 있는 것으로 분석된다. 반면 산림지역의 경우는 강수량은 증가하고 기온은 동일하게 상승경향이 보이고 있다. 분기별 특징을 보면 비산림지역의 경우 기온은 3분기에 일부 변동폭이 있었지만 변동이 거의 없었으며, 강수량도 3분기에 연도별 변동폭이 컸으며 감소경향을 보였다. 산림지역의 경우 기온은 분기별 변동폭은 컸지만 소폭의 상승경향을 보였으며, 강수량은 1분기와 4분기에 증가 경향이 뚜렷하게 보였다.

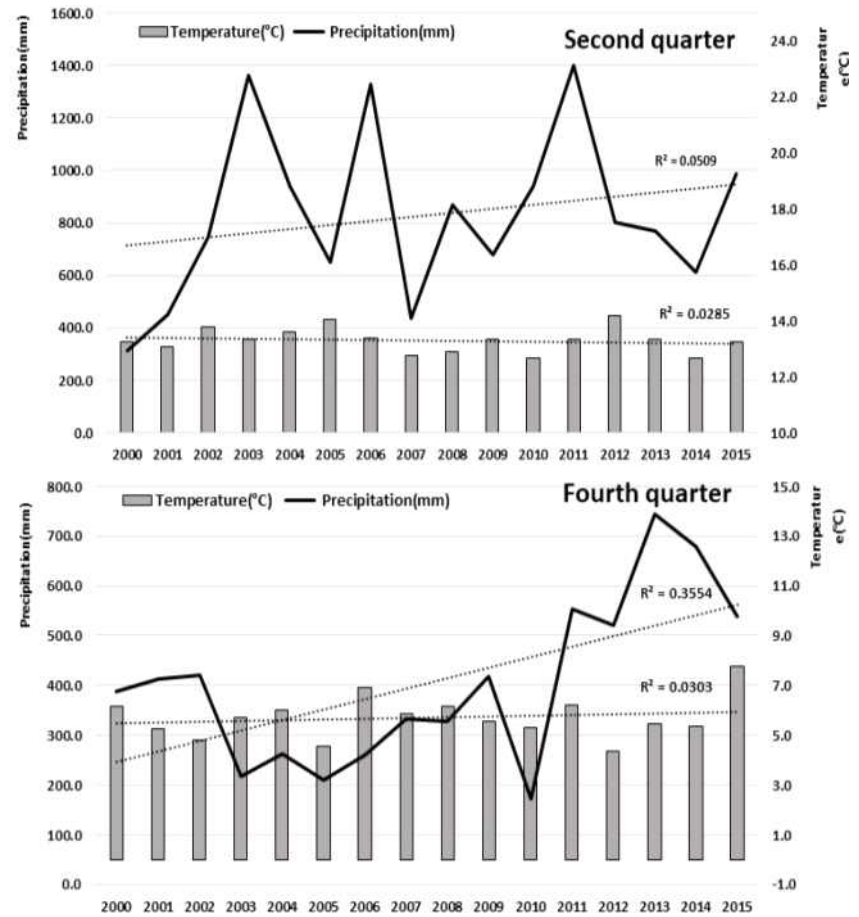
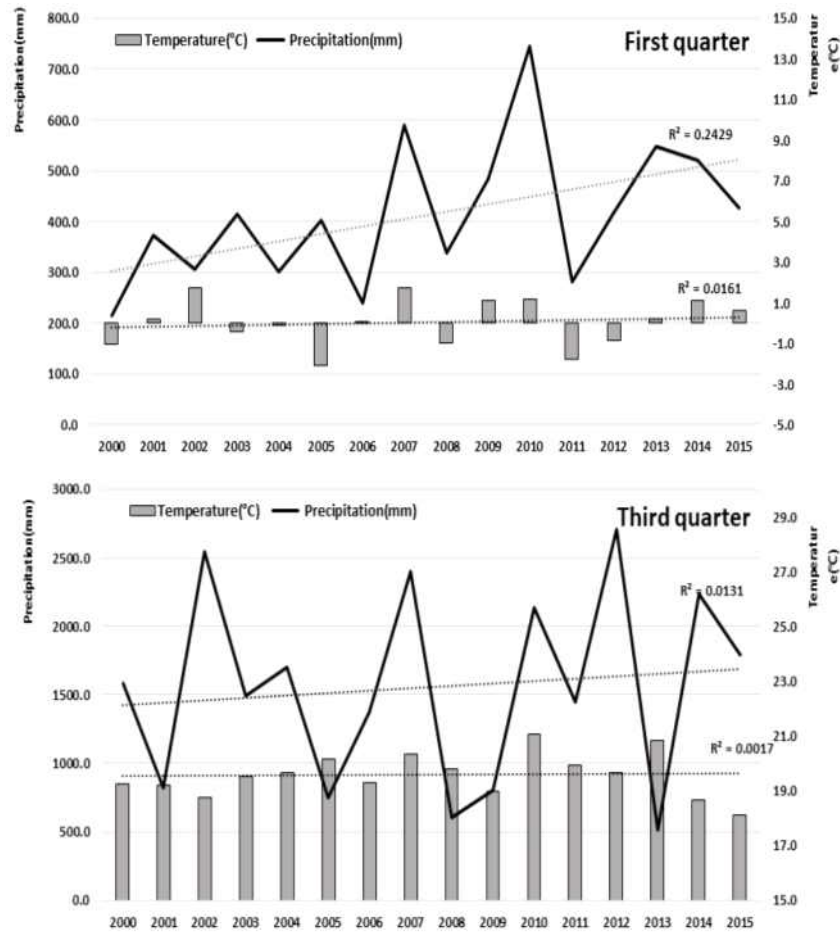


Figure 42. Changes of quarterly average temperature and average precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan.

Table 15. Quarterly average precipitation and temperature in Eorimok, Seongpanak and Jeju area

Regions	First quarter		Second quarter		Third quarter		Fourth quarter	
	P	T	P	T	P	T	P	T
Eorimok	412	0.0	830	13.3	1,556	19.6	404	5.7
Seongpanak	560	1.7	1,359	14.1	1,765	20.3	591	7.4
Jeju area	262	7.7	564	17.8	832	25.3	281	13.5

※ P: Precipitation(mm), T: Temperatures(°C)

특히 2007년 3분기 태풍나리의 영향으로 비산림지역에서는 강수량 가장 많았지만, 산림지역인 성판악은 2007년 3분기, 어리목은 2012년 3분기에 가장 강수량이 집중되는 것으로 조사되었다. 이처럼 지역적으로 강수량과 기온의 측정값이 상이할 수 있어 자생지 인근의 기상자료를 사용하여 분석하는 것이 정확도를 높이는 방법일 것이다.

㉔ 위협 및 확장지수 산정

기온은 전년도 평균기온을 기준으로 분석하여 일시적 변화 요인으로 당년의 온도가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이상이 발생될 때 일시적인 위협과 확장요인으로 작용할 것으로 예측하였다(Table 25, 26). 이는 한라산 사면별 해발고도에 따른 기온 감율 변화 평균값의 변화율을 근거로 하여 온도변화의 기준 값을 0.5°C 로 설정한 것이다. 즉, Choi (2012)는 한라산의 사면별 기온 감율을 서사면은 $-0.62^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 남사면 $-0.55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로, 동사면 $-0.45^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 북사면 $-0.48^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 다르게 나타난다고 보고하였다.

이러한 기온변화는 침엽수종에 따라 생장주기의 영향을 주거나 특정 군락의 수직적인 상하이동에 영향을 주는 요인으로 작용하기 때문이다. 따라서 단기적 변화요인으로 5년간의 평균온도의 변화가 $0.0\sim\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 일 때 위협과 확장요인으로 보았으며 값에 따라 지수값은 2~4로 주었다. 장기적 변화요인으로 10년 동안의 평균온도 변화가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이상 일 때 지수값은 5를 주었다.

강수량은 전년도 평균 강수량을 기준으로 분석하여 일시적 변화요인으로 강수량 변화가 $\pm 20\%$ 이상이 발생되면 수중에 따라 위협과 확장요인으로 작용할 것으로 보았다. 이는 10년간 서귀포 연강수량 변화율과 제주지역 평균 강수량에 대한 변화율로 기준 값을 20%로 설정한 것이다. 이러한 강수량의 변화는 현재 침엽수종의 생육기 반이나 공중습도 및 토양습도 등에 영향을 줄 것으로 판단되기 때문이다. 이를 바탕으로 평균 강수량의 변화율을 단기적, 장기적 요인으로 값을 조정하였다. 단기적 변화는 5년간의 평균 강수량의 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 이내의 변화가 위협이나 확장요인으로 보고 지수 값을 배정하였다. 장기적 변화 요인으로 10년 동안 평균 강수량의 $\pm 10\%$ 이하 경우 최대 지수값 5을 부여하였다. 기온과 강수량은 가중치 0.5 지수값을 주었다.

② 태풍

㉠ 환경요인 분석

태풍은 열대저기압의 한 종류이다. 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)는 열대저기압 중에서 중심 부근의 최대풍속이 33m/s 이상인 것을 태풍(Typhoon, TY), 25~32m/s 인 것을 강한 열대폭풍(Severe Tropical Storm, STS), 17~24m/s인 것을 열대폭풍(Typical Storm, TS), 그리고 17m/s 미만인 것을 열대저압부(Tropical Depression, TD)로 구분한다. 한편, 우리나라와 일본에서는 최대풍속이 17m/s 이상인 열대저기압 모두를 태풍이라고 부른다(Meteorological Administration Website). 2000년부터 2015년 사이에 380개의 태풍이 발생하여 49개가 우리나라에 영향을 주었으며 제주를 직·간접적으로 영향을 준 태풍은 13개를 분석하였다(Figure 43, Table 16).

Table 16. Typhoons affected Jeju Island from 2000 to 2015

Year/ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
2000					2		5(2)	6(2)	5(1)	2	2	1	23(5)
2001					1	2	5	6(1)	5	3	1	3	26(1)
2002	1	1			1	3(1)	5(2)	6(1)	4	2	2	1	26(4)
2003	1			1	2(1)	2(1)	2	5(1)	3(1)	3	2		21(4)
2004				1	2	5(1)	2(1)	8(3)	3	3	3	2	29(5)
2005	1		1	1		1	5	5(1)	5	2	2		23(1)
2006					1	1	3(1)	7(1)	3(1)	4	2	2	23(3)
2007				1	1		3(2)	4	5(1)	6	4		24(3)
2008				1	4	1	2(1)	4	5	1	3	1	22(1)
2009					2	2	2	5	7	3	1		22(0)
2010			1				2	5(2)	4(1)	2			14(3)
2011					2	3(1)	4(1)	3(1)	7	1		1	21(3)
2012			1		1	4	4(2)	5(2)	3(1)	5	1	1	25(5)
2013	1	1				4(1)	3	6(1)	8	6(1)	2		31(3)
2014	2	1		2		2	5(3)	1	5	2(1)	1	2	23(4)
2015	1	1	2	1	2	2(1)	4(2)	3(1)	5	4	1	1	27(4)
Total	7	4	5	8	21(1)	32(6)	56(17)	79(17)	77(6)	49(2)	27	15	380(49)

* Numbers in parentheses indicate the number of typhoons that have affected Korea



Figure 43. The path of typhoons affected Jeju island.

제주지역에 영향을 미친 태풍 중에 앞서 강수량분석에서 언급한 어리목과 성판악 3분기 강수량의 3개 피크는 태풍내습으로 인한 강수량의 증가로 2002년에 발생한 라마순, 루사와 2007년 나리, 2012년에 발생한 카눈, 덴빈, 볼라벤, 산바가 해당이 된다(Table 17). 특히 2012년 한해에만 발생한 4개의 태풍은 구상나무림의 변화에 강한 영향을 준 것으로 알려져 있다(Koh et al., 2015; Seo et al., 2019).

강한 바람을 동반한 태풍은 태풍 내습 전 일반적인 고사율이 1.0%, 태풍 내습 시 25.6%, 태풍이후 1~2년간 5.8%, 태풍이후 3~8년간 2.0% 이상을 나타낸다고 보고 하였다(Toshiya, 2019). 또한 Koh et al.(2015)은 태풍으로 인해 줄기와 가지를 자르는 풍절(風折, wind break), 줄기를 통째로 넘어뜨리는 풍도(風倒, wind fall), 나뭇잎의 절단(切斷), 줄기나 가지에 상처를 내는 열상(裂傷) 및 동화작용의 저해(沮害) 등의 피해를 초래한다고 제시하였다. 더욱이, 태풍은 피해가 집단적으로 발생하여 산림의 큰 피해를 주며, 바람의 피해로 추정되는 풍도목(風倒木)과 풍절목(風折木)이 많이 확인된다. 이는 태풍 영향으로 강풍에 의한 뿌리 흔들림 현상, 집중강우에 의해 토양유실 등으로 생육기반이 악화되었고, 겨울철 적설로 인한 나무 쓰러짐 현상이 다량 일어나면서 많은 고사목이 발생된 것으로 판단하였다.

Table 17. List of typhoons affected Jeju island from 2002 to 2014

Typhoon name	Year	Influence period	Seongpanak		Eorimok	
			P*	WS**(m/s)	P*	WS**(m/s)
			(mm)	(Mean/Max)	(mm)	(Mean/Max)
라 마 순 (RAMMASUN)	2002	07/04 01 ~ 07/06 04	380	8.5/15.6	471	7.0/11.5
루사(RUSA)	2002	08/30 14 ~ 09/01 01	610	9.9/18.8	798	8.9/13.4
매 미 (MAEMI)	2003	09/12 00 ~ 09/12 21	159	3.8/9.7	389	5.7/10.8
메기(MEGI)	2004	08/18 12 ~ 08/19 07	217	7.2/9.7	177	4.7/7.4
에 위 니 아 (EWINIAR)	2006	07/09 21 ~ 07/10 12	136	7.1/14.2	371	9.2/13.3
나리(NARI)	2007	09/16 04 ~ 09/16 16	550	5.5/16.5	450	5.7/10.5
덴 무 (DIANMU)	2010	08/10 10 ~ 08/11 08	320	7.5/11.5	430	4.9/7.3
곤 파 스 (KOMPASU)	2010	09/01 09 ~ 09/01 21	84	8.9/10.6	146	4.7/7.5
카 눈 (KHANUN)	2012	07/18 16 ~ 07/19 02	145	7.2/10.7	181	6.9/8.9
덴 빈 (TEMBIN)	2012	08/30 04 ~ 08/30 08	46	10.3/11.6	98	4.4/4.9
볼 라 벤 (BOLAVEN)	2012	08/27 16 ~ 08/28 15	316	10.5/17.4	564	9.5/12.5
산 바 (SANBA)	2012	09/16 10 ~ 09/17 17	613	6.7/10.8	683	5.1/7.7
나 크 리 (NAKRI)	2014	08/02 00 ~ 08/03 16	581	8.0/12.5	772	7.5/11.6

*P: Precipitation, **WS: Wind speed

연륜 성장 변화와 강수량과의 관계를 알아보기 위하여 Kim et al.(2020a)의 구상나무 연륜 측정값을 4개 지역으로 분류하고 재 가공하여 분석하였다(Figure 44). 연륜 측정값에 대한 Cronbach의 알파값이 0.847로 높은 신뢰수준이었으며, 강수량에 대한 평균연륜과의 Pearson 상관계수의 상관관계에서는 1월 강수량이 음의 상관관계($P < 0.01$ 수준)를 나타냈으며, 큰두레왓 지역의 경우는 5월과 6월의 강수량이 음의 상관관계($P < 0.05$ 수준)를 나타내었다.

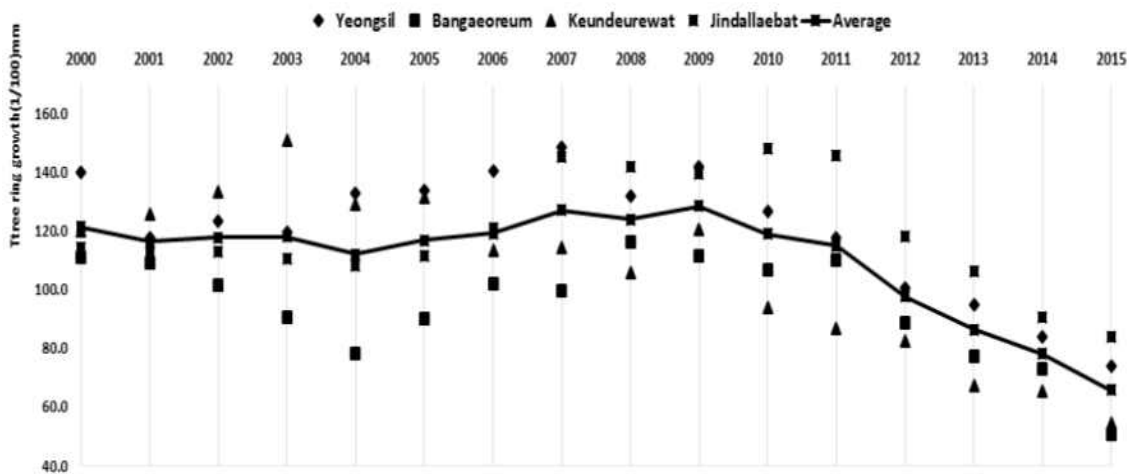


Figure 44. Change of annual growth of Korean fir from 2000 to 2015 in major region of Mt. Hallasan(Source: Kim et al., 2020).

Koo et al.(2001)는 구상나무의 성장과 강수조건과의 관계는 전년도 12월 및 당해 1월의 강수량과 유의수준의 양의 상관관계가 있다는 연구결과와는 차이가 있는 것으로 분석되었다.

어리목 지역 평균 강수량(2000년~2015년) 차이값 변화를 보면 일부기간 동안은 강수량과 연륜성장변화 관계를 설명할 수 있지만(Figure 45), 2012년부터 보여 지는 연륜성장 감소 변화는 기존의 연구결과로는 설명을 할 수가 없다. Toshiya(2019)의 보고처럼 강한 태풍에 의해 고사율이 증가하는 것처럼 분석할 수는 없었지만, 구상나무의 성장감소에는 2012년 제주지역에 연속적으로 영향을 준 4개의 태풍과 2013년 2분기와 3분기의 가뭄이 복합적으로 영향을 준 것으로 판단된다.

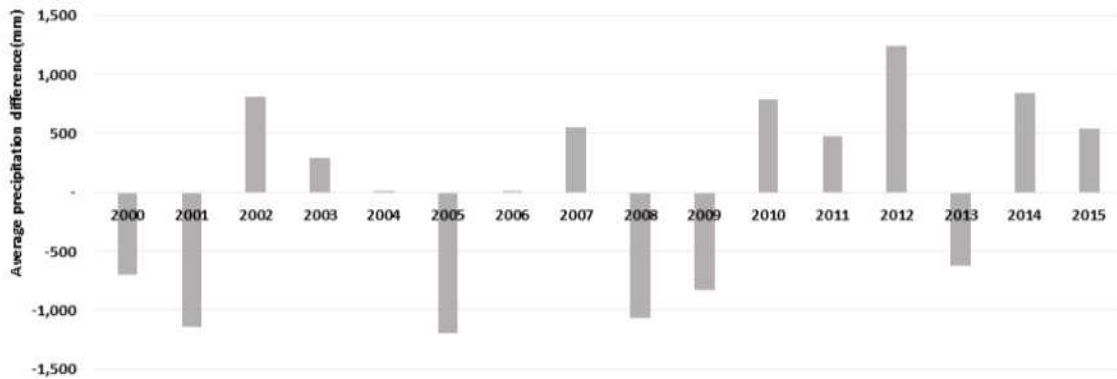


Figure 45. Changes of the standard deviation value to average precipitation from 2000 to 2015 at the Eorimok in Mt. Hallasan.

㉞ 위협 및 확장지수 산정

태풍은 영향을 미치는 기간과 강수량, 바람의 강도와 당해 영향 횟수가 복합적으로 위협과 확장요인으로 작용할 것으로 보았다. 영향기간이 24시간이내이면서 강수량 300mm 이상이고 최대풍속이 10m/s급 2개 이하일 때 일시적 위협요인으로, 영향기간이 2일 이내이면서 강수량 400mm 이상, 최대 풍속 15m/s급 2개 이하일 때 단기적 위협요인으로, 영향기간이 2일 이내 이면서 누적 강수량 500mm 이상, 최대 풍속 15m/s급 2개 이상일 때 장기적 위협요인으로 구분하였다. 또한 당년에 태풍의 영향이 없는 경우 일시적 확장요인으로 3년간 영향기간이 1일 이내이면서 강수량 300mm 이하, 최대풍속 10m/s 급 1개 정도를 단기적 확장요인으로, 5년간 영향기간이 1일 이내, 강수량 300mm 이하, 최대풍속 10m/s 급 2개 정도를 장기적 확장요인으로 구분하였다. 태풍은 위협요인에 가중치를 0.5 지수값을 주었다.

③ 수증기압포차

㉞ 환경요인 분석

수증기압포차(vapor pressure deficit, VPD)는 대기 중 수증기의 농도차를 의미한다. VPD가 0hpa이면 대기 중의 수증기가 포화된 상태를 의미하며, VPD가 높을수록 대기가 건조하다는 것을 의미한다. 일반적으로 VPD가 너무 낮으면 식물체에서 증산이 일어나기 어려운 반면에, VPD가 너무 높으면 과도한 증산으로 식물이 수분

스트레스를 받기 쉽다. 일반적으로 식물체에서 적당한 VPD 값은 5~12hPa로 알려져 있다(Grange and Hand, 1987). 산림의 경우 일 평균 VPD는 건조기에 13.60hPa, 비 건조기에 8.60hPa, 최대 VPD는 건조기에 22.7hPa, 비 건조기에는 17.3hPa로 보고된 바 있다(Laiju et al., 2012),

해안지역인 학암포(충남 태안군 원북면) 해안 사구 일원의 초지 생태계에서 일 평균 VPD는 2.50 ± 1.70 hPa(평균±표준편차, n=365)로 보고되었다(Lee and Choi, 2013). 식물은 생육시기에 대기 중 수분의 농도 차이에 의한 증산작용을 통해 발생하는 힘을 이용하여 토양으로부터 수동적으로 수분을 흡수하게 된다.

한라산국립공원 성판악과 진달래밭, 선작지왓 지역의 평균 VPD를 제시함으로써 한라산 아고산대 지역 내 서식지 특성을 이해하고, 기후변화가 자생식물의 성장, 생육에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 미기상 요인의 장기적 관측이 필요하다.

2011년~2015년 동안 한라산 주요지역의 일 평균 VPD는 성판악(Figure 46)은 2.89 ± 1.60 hPa(n=1,826), 진달래밭(Figure 47)은 2.44 ± 1.35 hPa(n=1,820), 윗세오름(Figure 48)에서 2.51 ± 1.33 hPa(n=1,819)로 서로 유사하게 나타났으며, 최대값은 성판악에서 16.44hPa, 진달래지역에서 13.99hPa, 윗세오름 지역에서 15.65hPa로 확인되었다(Table 18).

일 평균 VPD가 5~12hPa인 날은 성판악지역에서 총 317일(n=1,826), 진달래밭 지역에서 총 291일(n=1,820), 선작지왓 조사지역에서 총 63일(n=381)로 나타났으며, 일 평균 VPD가 12hPa 이상인 날은 성판악 일원에서 총 28일(n=1,826), 진달래밭에서 총 9일(n=1,820), 선작지왓 일원에서 총 14일(n=1,819)로 나타났다.

Table 18. Comparison of daily average VPD in major region in Mt. Hallasan

Regions	Year	VPD	
		5 hPa~12 hPa	12 hPa ~
Seongpanak	2011	62	2
	2012	55	3
	2013	66	6
	2014	56	11
	2015	78	6
	Total	317	28
Jindallaebat	2011	47	2
	2012	53	1
	2013	65	3
	2014	53	2
	2015	47	1
	Total	291	9
Witseoreum	2011	52	1
	2012	52	0
	2013	63	8
	2014	54	1
	2015	65	4
	Total	286	14

㉞ 위협 및 확장지수 산정

수증기압 포차는 식물이 가장 생육이 양호하다는 VPD 5~12hpa 사이의 일평균 값이 년 60일을 기준으로 위협과 확장의 변화가 있을 것으로 예측하였다. 이는 한라산 윗세오름, 진달래밭, 어리목 지점의 AWS 자료값을 2011년부터 2015년까지 계산하여 VPD 5~12hpa사이 일 평균값을 3개 지역을 평균한 결과 59.6일이였다.

당년 일평균 VPD 5~12hpa이 60일 이하는 일시적 위협으로, 2년 동안 VPD 5~12hpa 구간이 100일 이하는 단기적 위협으로, 3년간 VPD 5~12hpa 150일 이하는 장기적 위협으로 구분하였다. 확장요인으로 일평균 VPD 5~12hpa 사이에 있는 날이 60일 이상은 일시적 확장요인으로, 2년 일평균 VPD 5~12hpa 150일 이상은 단기적 확장으로 3년 동안 일평균 VPD 5~12hpa이 200일 이상은 장기적 확장요인으로 구분하였다.

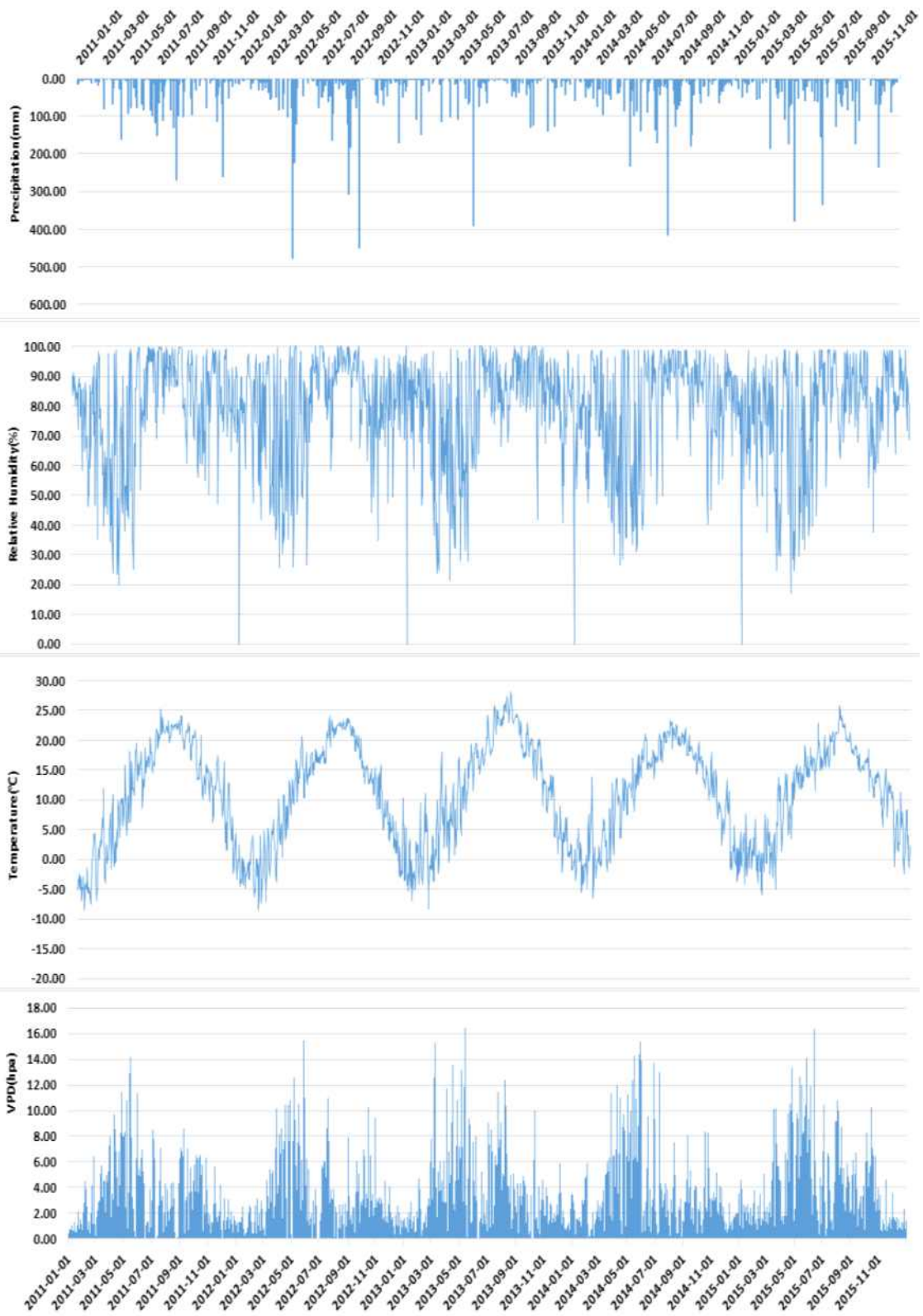


Figure 46. Vapor pressure deficit at the Seongpanak in Mt. Hallasan.

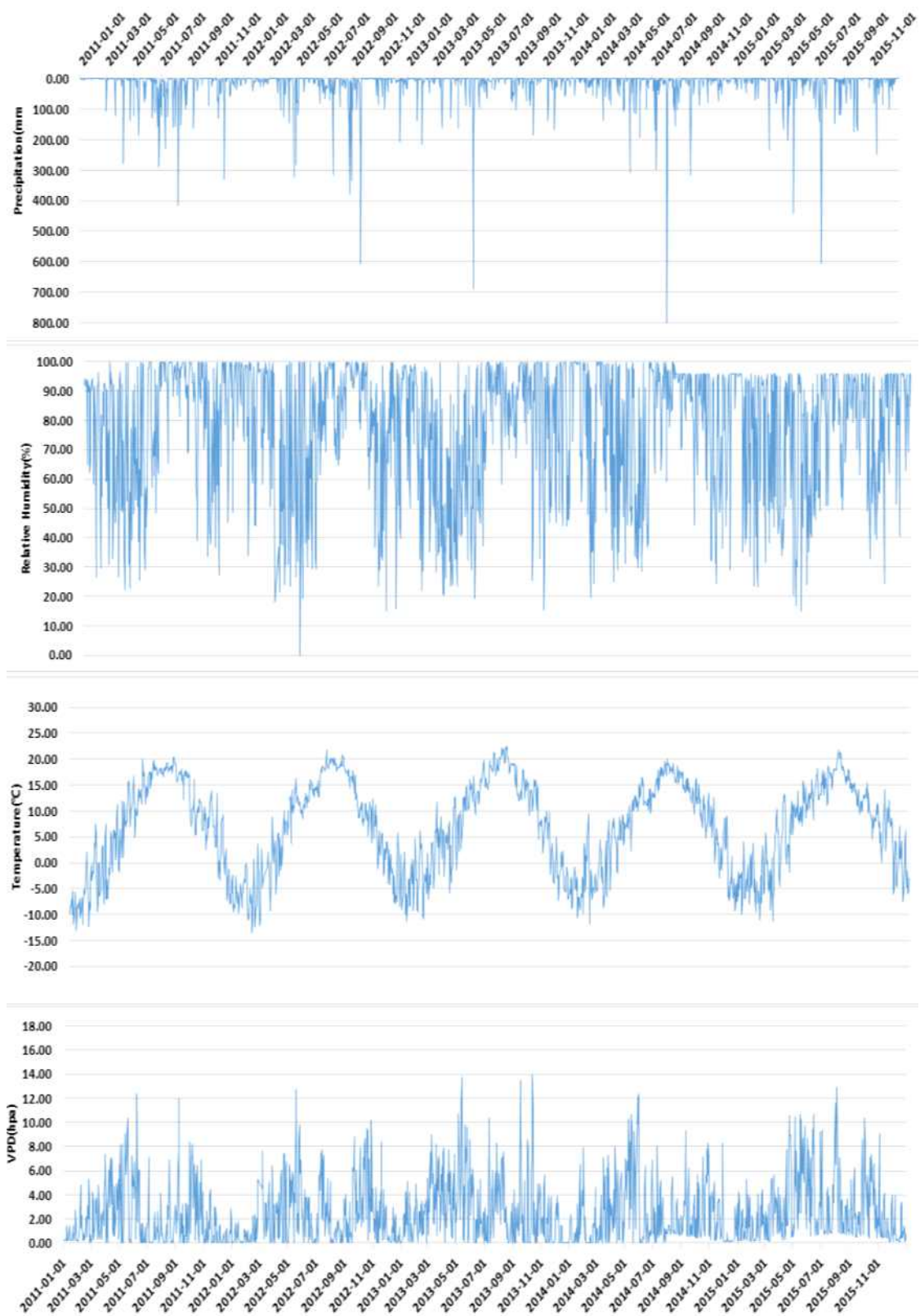


Figure 47. Vapor pressure deficit at the Jindallaebat in Mt. Hallasan.

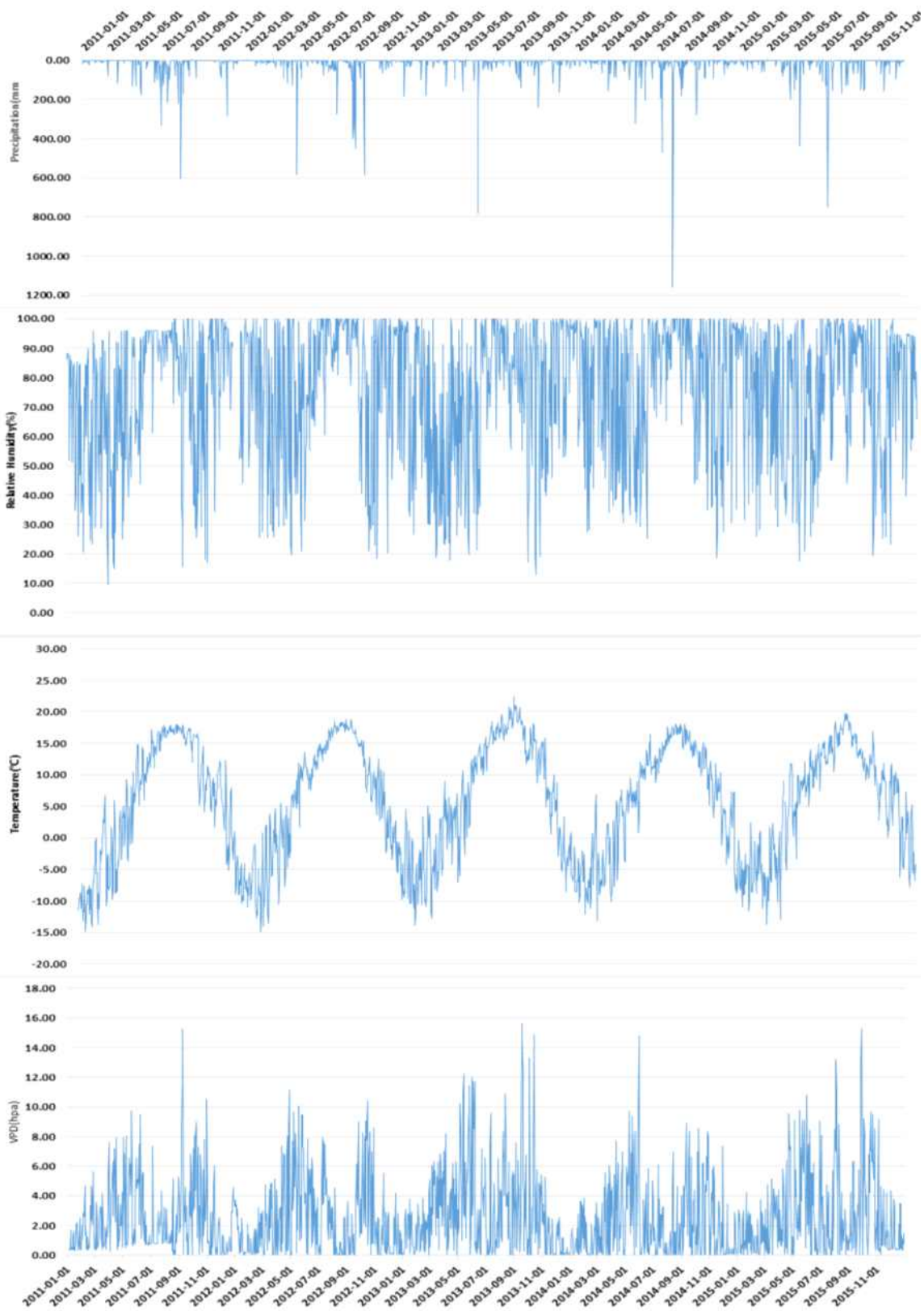


Figure 48. Vapor pressure deficit at the Witseoreum in Mt. Hallasan.

④ 일사량

㉠ 환경요인 분석

수목은 햇빛을 대상으로 서로 경쟁하면서 생육을 하는데, 그늘에서 잘 자랄 수 있는 수종을 음수라 하고 그늘에서 잘 자라지 못하는 수종을 양수라고 한다(Lee, 1993). 생리학적으로 보면 광도가 높은 환경에서는 양수가 광을 효율적으로 이용하여 광합성을 더 많이 함으로써 음수보다 성장속도가 빠르지만, 반대의 환경에서는 음수가 광합성 효율은 양수보다 낮다. 그러나 낮은 광도에서는 광합성을 효율적으로 실시함과 동시에 광보상점도 낮고 호흡량이 적기 때문에 광도가 낮은 그늘에서 경쟁력이 양수보다 높다(Lee, 1993). 구상나무의 경우는 전광의 3%~10%에서 생존 가능한 음수로 분류하였으며, 소나무는 전광의 30%~60%에서 생존이 가능한 양수로 분류하였다(Lee, 1993).

2006년 구상나무림이 분포하는 지역의 평균 일사량은 $1,378\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이고 최대는 $1,650\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$, 최저는 $270\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 로 나타났다(Figure 49).

구상나무 밀도별로 보면 조밀도 군락은 평균 $1,416(625\pm 1,612)\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이며, 중밀도 군락은 $1,383(554\pm 1,620)\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이었다. 소밀도 군락의 평균 일사량은 $1,364(270\pm 1,650)\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이었다.

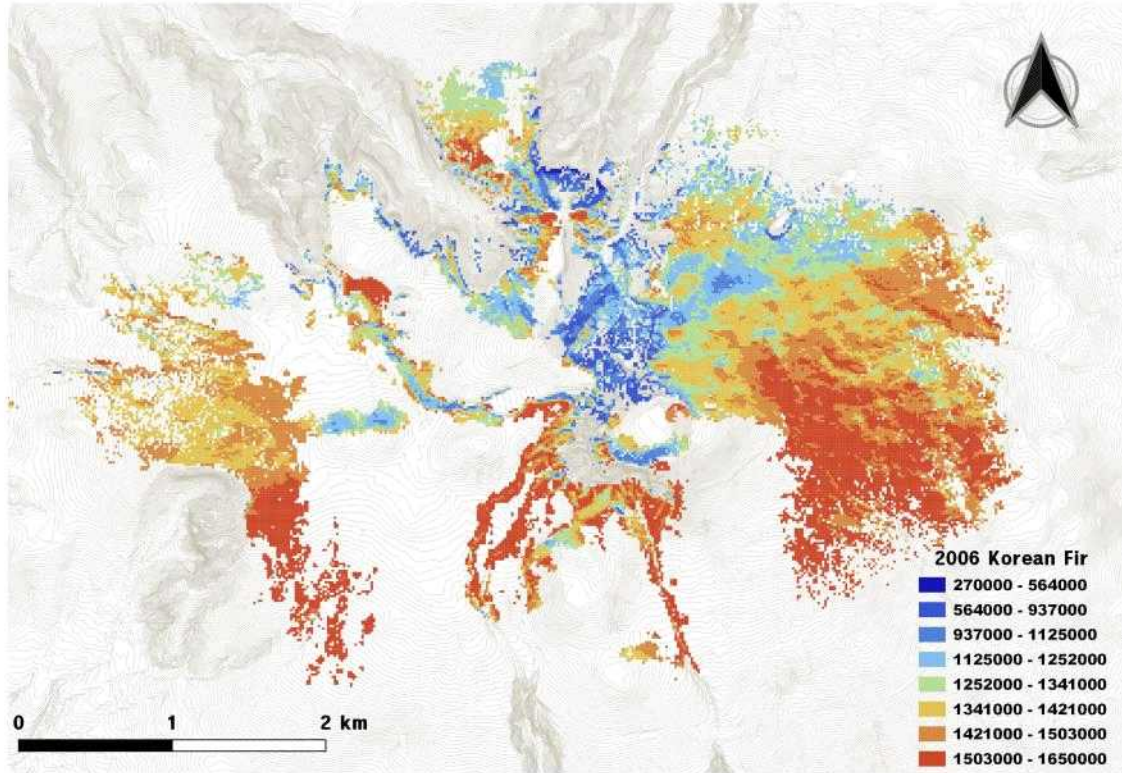


Figure 49. Average insolation in the Korean fir forest of Mt. Hallasan in 2006.

2015년 구상나무림이 분포하는 지역의 평균과 최고 일사량은 2006년 값과 비슷하며 최저 일사량은 $185\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 로 낮게 분석되었다(Figure 50).

구상나무 밀도별 수치변화를 보면 조밀도 군락은 $1,417(239\pm 1,634)\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 였으며, 중밀도 군락은 $1,385(429\pm 1,650)\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 였다. 또한, 소밀도 군락은 $1,366(185\pm 1,649)\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 로 밀도별 최소와 최고값의 간격이 2006년과 비교해서 넓어진 것으로 조사되었다. 구상나무가 적정 생육 가능한 일사량의 범위를 제시한다면 2006년 조사된 중밀도 군락의 평균일사량이 약 $1,380\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이고 최소 $500\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 에서 $1,600\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이다.

한편, 눈향나무가 분포하는 지역의 연일사량은 최저 약 $1,080\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$, 최고 약 $1,669\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이고, 평균 약 $1,541\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이다. 이 수치는 천연보호구역의 연일사량 최저 약 $140\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$, 최고 약 $1,678\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$, 평균 약 $1,353\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 와 비교하면 매우 높은 값이다(Yoon et al., 2021).

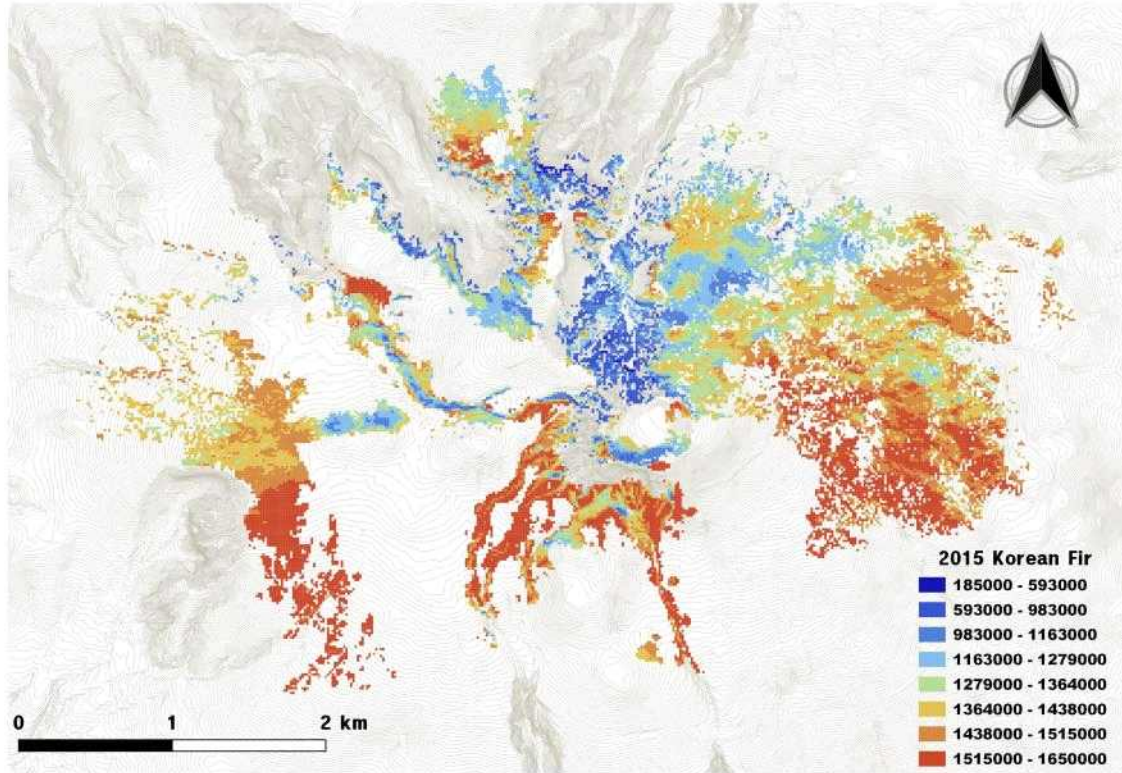


Figure 50. Average insolation in the Korean fir forest of Mt. Hallasan in 2015.

㉔ 위협 및 확장지수 산정

일사량은 전년도 평균 일사량 값을 기준으로 분석하여 일시적 변화 요인으로 당년의 일사량 변화의 기준값을 $\pm 10\%$ 로 발생이 되면 수종에 따라 위협과 확장요인으로 작용할 것으로 보았다. 이는 1983년부터 2007년까지 25년간 평균값을 1971년~2000년 평년값과 비교해 보면 여름철 최고기온은 0.1°C 상승하였고, 일사량은 $169\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 가 증가하였다(Choi and Yun, 2009)고 보고하였으며, 계절별 일사량은 연평균대비 봄은 24%, 여름은 22% 많으며, 가을은 11%, 겨울은 34% 적다(Kim et al., 2008)고 하였다. 증가 일사량 $169\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 에 여름 증가분을 빼면 $132\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 이고, 이 값은 한라산 지역의 평균 일사량 $1,353\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{year}$ 의 9.7%이다.

평균 일사량의 $\pm 10\%$ 이내는 일시적 위협과 확장요인으로, 평균일사량 $\pm 11\% \sim \pm 15\%$ 이내는 단기적 위협과 확장요인으로, 평균일사량 $\pm 15\%$ 이상을 장기적 위협과 확장요인으로 구분하였다.

⑤ 토양

㉔ 환경요인 분석

한라산 침엽교목림의 토양 분석 결과, 토양 pH는 3.65~5.16 범위였으며, 평균 pH는 4.50으로 전반적으로 산성을 나타내었다(Table 19). 토양 pH는 토양의 중요한 화학적 성질의 하나로서 토양과 식물의 생육을 진단하는데 필요한 성분으로 2012년 한라산국립공원 토양의 pH는 4.8(표토)~5.0(심토)보다 낮게 나타났다(Jeju Special Self-Governing Province Hallasan Research Institute, 2013). 이는 한랭 습윤기후에서 식물유체의 분해속도가 느려져 유기물이 생성·집적되고 그 결과 생성된 유기산이 축적된 결과로 토양이 강산성을 띠게 되는 것으로 보인다는 보고(Jin et al., 1994)와는 다르게 높은 고도에 생육하는 구상나무가 소나무 자생지보다 pH가 낮은 것으로 분석되었다.

Table 19. Soil characteristics analyzed from the coniferous forest in Mt. Hallasan

Plant type	pH	EC	OM*	T-N	Av. P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Na	CEC
	(1:5)	(dS/m)	(%)	(%)	(mg/kg)	(cmol+/kg)				
Korean fir Forest	4.71	0.39	27.95	0.79	15.20	0.54	1.19	0.71	0.29	40.98
Korean Red Pine Forest	4.29	0.41	16.50	0.58	11.61	0.18	0.48	0.30	0.16	11.48
Mean	4.50	0.40	22.23	0.69	13.41	0.36	0.84	0.51	0.23	26.23

유기물은 토양의 성질을 개량하고 식물의 생육을 돕는데 꼭 필요한 성분으로(Lee, 1996) 구상나무림은 27.95%, 소나무림은 16.50%로 나타났으며, 한라산 침엽교목림의 평균 유기물 함량은 22.23%로 조사되었다. 한라산국립공원의 평균 유기물 함량인 21.15%~15.79%(Ko and Kang, 2013)보다 더 높게 나타났다.

지리산국립공원 구상나무림의 경우 평균 유기물 함량이 10.6%으로 한라산 보다 낮게 나타나고 있다. 그 원인으로 지구온난화로 인해 기온이 올라가면서 토양온도

가 올라가 미생물에 의한 분해 속도가 점차적으로 늘어난 결과로 분석하였다(Cho, 2014).

전질소함량은 토양유기물과 밀접한 상관관계를 가지는데, 한라산 침엽교목의 평균 함량은 0.69%로 나타났으며, 구상나무림은 0.79%, 소나무림은 0.58%였다. 한라산국립공원의 평균 전질소 함량은 1.16%(표토)~0.94%(심토)였으며(Cho, 2014), 덕유산 향적봉 일대 구상나무림의 전질소함량을 0.85%로 보고(Moon, 2001)하였으며, 계방산, 덕유산, 지리산 등의 가문비나무 평균 전질소함량을 0.59%로 보고(Han et al., 2012)한바 있다.

한라산 침엽교목림지역 전질소 함량이 타 지역과 비교하여 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 유기물 함량이 많을수록 질소함량이 많아지는데 유기물이 화산재에서 유래한 Al과 결합하면 용탈에 대한 저항성이 있기 때문에 화산재가 많이 집적된 토양에서 질소함량이 높게 나타난다(Ko and Kang, 2013)는 결과와는 상반되게 한라산 침엽교목림은 유기물 함량은 높은 반면 전질소함량은 낮게 나왔다.

유효인산은 토양에 흡착된 인산을 약산으로 용출시킨 인산을 의미하며, 인산은 화산재가 함유된 화산회성 토양에서 강하게 흡착하여 고정시키는 능력이 매우 크다. 한라산 침엽교목림의 유효인산은 평균 13.41mg/kg로 조사되었다. 구상나무림은 15.20mg/kg, 소나무림은 11.61mg/kg다. 한라산국립공원의 평균유효인산함량은 9.7mg/kg~7.3mg/kg으로 보고하였다(Ko and Kang, 2013). 지리산의 평균 유효인산은 18.51mg/kg으로 보고(Cho, 2014)하였으며, Kim et al.(2010)은 덕유산 향적봉 일대 주목군락의 유효인산을 20.6mg/kg로 보고하였다.

한라산과 같은 화산회 토양은 유효인산함량이 매우 낮아 토양비옥도가 낮은 원인으로 알려져 있으며 식물성장의 제한요소로 작용할 수 있다(Ko and Kang, 2013).

양이온치환용량(CEC)는 토양의 비옥도의 척도가 되는 값으로 한라산 침엽교목림의 평균값은 26.23cmol⁺/kg이며, 구상나무림은 40.98cmol⁺/kg, 소나무림은 11.48cmol⁺/kg로 나타났다. 한라산국립공원의 평균 양이온치환용량(Ko and Kang, 2013)은 20.98cmol⁺/kg~20.91cmol⁺/kg로 침엽교목림보다 낮은 수치를 보인다. 지리산 구상나무림의 경우 18.62cmol⁺/kg(Jo, 2014), 덕유산 향적봉 일대 구상나무림 22.38cmol⁺/kg(Moon, 2001) 보다는 다소 높게 나타났다. 제주도 화산회토가 양이온치환용량은 높으나 염기용탈이 일어나는 토양특성으로 치환성양이온 함량이 낮다는

보고(Shin, 1978)와 일치 한다.

치환성양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+)의 함량은 한라산 침엽교목림 토양에서도 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 의 순으로 높게 분석되어 일반적인 산림토양에서 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 의 순으로 감소한다는 보고(河田, 1989)와 우리나라 일반적인 산림토양의 치환성양이온은 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 순으로 함량이 낮아진다는 보고(Jeong et al., 2002)와 일치하는 경향이 나타났다. 치환성양이온의 수치는 Ca^{2+} : $0.84\text{cmol}^+/\text{kg}$, Mg^{2+} : $0.5\text{cmol}^+/\text{kg}$, K^+ : $0.36\text{cmol}^+/\text{kg}$, Na^+ : $0.23\text{cmol}^+/\text{kg}$ 이었다.

㉔ 위험 및 확장지수 산정

토양은 화학적 성질에 대한 10개 항목에 대해서 당년 분석값의 변화율이 $\pm 10\%$ 의 변화가 수중에 따라 위험과 확장요인으로 작용할 것으로 보았다. 이는 2005년, 2010년과 2015년 3개년의 평균 분석값과 평균값 대비 변화율이 9%로 계산되었다. 평년 분석값의 변화가 $\pm 9\%$ 이내 이면 일시적 확장과 위험요인으로 구분하였으며, 평년 분석값의 변화가 $\pm 10\% \sim \pm 15\%$ 이내이면 단기적 확장과 위험요인으로 구분하였다. 장기적 확장과 위험요인으로는 평년 분석값의 변화가 $\pm 16\%$ 이상일 경우로 구분하였다.

Table 20. Soil characteristics analyzed from Korean fir forest at the sites of Mt. Hallasan in 2005, 2010 and 2015

Year	Sampling site	pH	EC	OM*	T-N	Av. P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Na	CEC**
		(1:5)	(dS/m)	(%)	(%)	(mg/kg)	(cmol ⁺ /kg)				
2005	Witseoreum	4.61	0.26	34.42	0.86	12.69	1.14	1.54	1.10	0.31	45.60
2005	Seongpanak	5.16	0.15	24.90	0.50	5.28	0.64	1.31	0.87	0.40	60.76
2010	Witseoreum	4.70	0.29	20.90	0.66	11.54	0.29	1.33	0.52	0.24	25.58
2010	Seongpanak	4.30	0.76	26.93	1.25	37.00	0.66	1.69	1.07	0.35	35.45
2015	Witseoreum	4.46	0.13	26.45	0.71	9.73	0.14	0.53	0.23	0.16	43.20
2015	Seongpanak	5.02	0.76	34.12	0.75	14.93	0.36	0.74	0.45	0.30	35.31
	Mean	4.71	0.39	27.95	0.79	15.20	0.54	1.19	0.71	0.29	40.98

* OM: Organic matter, ** CEC: Cation exchange capacity

Table 21. Soil characteristics analyzed from Korean red pine forest at the sites of Mt. Hallasan in 2010 and 2015

Year	Sampling site	pH	EC	OM*	T-N	Av. P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Na	CEC**
		(1:5)	(dS/m)	(%)	(%)	(mg/kg)	(cmol ⁺ /kg)				
2010	Sogbat	4.80	0.35	14.40	0.86	8.69	0.23	0.55	0.30	0.19	20.31
2010	Yeongsil	4.45	0.22	13.28	0.40	17.17	0.16	0.42	0.27	0.09	8.69
2010	1100 Road	4.45	0.36	12.77	0.44	12.42	0.14	0.48	0.25	0.17	11.86
2015	Yeongsil	4.22	0.34	16.15	0.46	10.42	0.14	0.32	0.23	0.14	24.20
2015	Sogbat	4.17	0.46	18.42	0.53	10.56	0.17	0.48	0.32	0.14	30.00
2015	1100 Road	3.65	0.70	23.95	0.79	10.38	0.26	0.61	0.44	0.24	39.80
	Mean	4.29	0.41	16.50	0.58	11.61	0.18	0.48	0.30	0.16	22.48

* OM: Organic matter, ** CEC: Cation exchange capacity

(2) 생물적 요인

① 병해

㉞ 환경요인 분석

생물들은 다양한 병에 노출되어 있으며, 특히 수목의 경우 고정되어 있어, 타 생물들에 의해 감염되거나, 바람, 비, 온도 등 비생물적 요인에 의해서도 감염되기도 한다. 한라산 침엽교목에 속하는 식물들에게 발생하는 시들음병, 흑병, 잎떨림병, 가지마름병, 잎마름병, 종자발아를 저해하는 토양균류 등이 있다. 2000년 이후부터 발표된 침엽교목 관련 병해 자료를 활용하여 기주식물로 침엽수에 영향을 미치는 병에 대해서 발병 정도와 지속성 등을 감안하여 침엽교목림 변화에 영향을 미칠 정도를 판단하고자 한다.

Kim et al.(2019)은 구상나무의 쇠퇴 및 고사에 관여하는 병해를 8종을 확인하였다. 이중 스크레로테리스 가지마름병은 북반구의 북유럽지역, 캐나다와 미국 동부지역, 일본 북해도 등 주로 겨울에 적설량이 많은 지역에서 소나무과 식물에 큰 피해를 주는 중요한 병으로 알려져 있다(Eppo, 2009). 국내에서는 중부 이북지역의 잣나무(*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.)와 스트로브잣나무(*Pinus strobus* L.)에서 발병이 최초 보고 되었다(Na et al., 2007). 또한 구상나무 종자 발아에 영향을 미치는 한라산의 *Racodium therryanum* 토양균류(soil fungi)는 유기물층이 발달된 토양에 눈이 덮인 기간이 길수록 구상나무 종자 발아에 부정적 영향을 미치는 것으로 확인되었다(Cho et al., 2007).

소나무류 시들음병(소나무재선충병)은 1988년 부산 동래구 금정산 소나무에서 처음 보고된 이후 2006년도 피해 집계에 따르면 전국 8개도 54개 시군구에서 7,871ha의 소나무임지에서 발생되었고 피해목 제거본수는 1,368,527본에 달한다(National Institute of Forest Science, 2018). 제주지역의 경우 2013년~2021년까지 곰솔 2,347천본이 감염되어 제거되었다. 소나무 흑병은 참나무류와 기주교대를 하는 이종기생균으로 나무의 가지와 줄기에 다양한 크기와 흑을 형성하여 표면이 거칠고 조직이 연하여 강풍과 폭설에 부러지는 피해를 유발한다(National Institute of Forest Science, 2018)

한라산 침엽 교목인 소나무와 구상나무에 발생하는 것으로 알려져 있는 병은 Table 22와 같다.

Table 22. List of major disease in the coniferous forest of Mt. Hallasan

Disease name	Pathogens	Host Plants
스클레로데리스 가지마름병 (Scleroderris canker)	<i>Gremmeniella abietina</i>	Pineaceae
아스코칼릭스 가지마름병 (Ascocalyx canker)	완전세대(<i>Ascocalyx abietis</i>) 불완전세대(<i>Bothrodiscus berenice</i>)	Pineaceae
그을음 잎마름병 (Rhizosphaera needle blight)	<i>Rhizosphaera pini</i>	Pineaceae
잎떨림병 (Lophodermium needle cast)	<i>Lophodermium piceae</i>	Pineaceae
리룰라 잎떨림병 (Lirula needle cast)	<i>Lirula macrospora</i>	Pineaceae
로피움 가지마름병 (Lophium twig blight)	<i>Lophium mytilinum</i>	Pineaceae
토양균류 (Soil-borne fungi)	<i>Racodium therryanum</i> Thuem	
혹병 (Pine-oak gall rust)	<i>Cronartium quercuum</i> (Berk.) Miyabe ex Shirai	Pine trees Oaks
소나무류 시들음병 (Pine wilt disease)	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i> (Steiner & Buhrer) Nckle	Pine trees

② 충해

㉠ 환경요인 분석

침엽수에 발생하는 해충은 약 200여종을 기록되어 있으나(National Institute of Forest Science, 2020), 소나무과 식물인 구상나무와 소나무에 발생하여 피해를 주고 있는 해충은 솔나방, 솔잎혹파리, 솔껍질각지벌레, 솔수염하늘소, 북방수염하늘소, 나무좀류, 솔알락병나방, 잎말이나방 등이 주요해충이다.

한라산 침엽교목림에서는 다양한 곤충들이 서식하고 있으며, 이중에서는 기주식물로 침엽수를 이용하는 해충들이 있다. 2000년 이후 발표된 곤충분포 자료를 활용하여 출현빈도와 침엽수를 기주식물로 사용하는 곤충을 해충으로 분류하여 침엽수림

군락의 변화에 영향을 미칠 정도를 판단하고자 한다.

국립공원연구원(2014)은 지리산국립공원 내 구상나무 군락의 나방 동태를 발표하였는데, 지리산 돼지평전과 임걸령에 솔검은가지나방(*Deileptenia ribeata*)이 우점하며 솔밭물결자나방(*Pennithera djakonovi*), 다색띠큰가지나방(*Macaria liturata*), 숲가지나방(*Macaria notata*), 털뿔가지나방(*Alcis angulifera*), 꼬마복숭아밤나방(*Telorta edentata*) 등이 주요 출현종으로 보고하였다.

솔검은가지나방의 유충은 소나무의 잎을 가해하는 것으로 알려져 있어 주의가 필요한 해충이나 한라산에서는 서식기록(Jeong, 2013)이 없는 것으로 판단된다.

Na(2020)는 2009년부터 2015년 사이에 한라산국립공원 대형나방 변화 확인을 보고하였는데 총 13과 604종 13,433개체를 채집하여 분석한 결과, 털뿔가지나방이 2,145개체로 가장 많았으며, 넓은띠담흑수염나방(*Hydrillodes morosa*) 921개체, 먹그림가지나방(*Menophra senilis*) 362개체, 앞선두리불나방(*Agylla gigantea*) 340개체, 세줄날개가지나방(*Hypomecis roboraria*) 238개체 순으로 확인하였다.

지리산에서 주요 출현종으로 보고 된 털뿔가지나방이 한라산에서는 우점하여 서식하는 것으로 보인다. 남한전역에서 서식하고 있는 흔한 종으로 침엽수에 피해를 주는 해충으로 분류하지 않고 있으며, 유충은 인동과 식물을 먹는다(CBD-CHM Korea Website). 넓은띠담흑수염나방, 먹그림가지나방, 앞선두리불나방, 세줄날개가지나방은 유충은 침엽수를 먹이로 하지 않는 것으로 알려져 있다.

Lee(2012)는 2010년에 한라산에서 채집된 딱정벌레목 곤충의 분포를 보고하였는데 총 17과 72종 14,405개체였다. 먼지벌레과 윤납작먼지벌레(*Synuchus nitidus*)가 8,937개체로 가장 많이 채집되었고, 다음으로 한라길쭉먼지벌레(*Pterostichus raptor*) 919개체, 딱정벌레과 우리딱정벌레(*Carabus sternbergi sternbergi*) 770개체, 송장벌레과 녀점박이송장벌레(*Nicrophorus quadripunctatus*) 728개체, 송장벌레과 넓적송장벌레(*Silpha perforata*) 543개체, 딱정벌레과 제주왕딱정벌레(*Carabus (Isiocarabus) saishutoicus*) 384개체, 소똥구리과 모가슴소똥풍뎅이(*Onthophagus fodiens*) 369개체, 먼지벌레과 애칠납작먼지벌레(*Synuchus congruus*) 343개체, 딱정벌레과 멧쟁이딱정벌레(*Damaster jankowskii jankowskii*) 284개체, 먼지벌레과 아라길쭉먼지벌레(*Pterostichus shirozui*) 230개체, 딱정벌레과 한라큰두꺼비딱정벌레(*Scambocarabus kruberi hallasanensis*) 148개체, 송장벌레과 검정송장벌레

(*Nicrophorus concolor*) 138개체, 먼지벌레과 금빛먼지벌레(*Poecilus coerulescens encopoleus*) 115개체 순이었다. 국가 생물다양성 정보공유체계 검색을 통해 딱정벌레목 곤충에 대한 침엽수 가해여부를 조사하였는데, 해충으로 분류된 종이 보고되지 않았다.

솔수염하늘소와 북방수염하늘소는 소나무재선충병의 매개충으로 저지대는 솔수염하늘소에 의해 감염이 이루어지고, 주로 중부지방의 잣나무림에서는 북방수염하늘소가 소나무재선충병을 매개하는 곤충이다(National Institute of Forest Science, 2018). 2017년에 해발고도 900m인 어리목 입구 도로변에서 곰솔이 소나무재선충병에 감염되어 고사하였는데, 제주지역에서는 북방수염하늘소가 보고되지 않고 있어 솔수염하늘소가 기후변화에 의한 온난화로 고지대로 서식지를 이동하고 있다고 판단하였다.

침엽수 구과를 가해하는 해충으로 구상나무잎말이나방(*Cydia kamijoi*)과 솔알락명나방(*Dioryctria abietella*)을 보고하였다(Sin et al., 2018; Kim et al., 2020). 구상나무잎말이나방은 홋카이도에서 서식하는 일본 고유종으로 알려져 있었다. 기주식물인 일본개분비나무(*Abies sachalinensis*)가 일본(홋카이도)과 러시아 극동(쿠릴 열도, 캄차카, 사할린)에만 분포하고 있다. 일본개분비나무는 해안지역의 섬으로 해발고도 1,650m까지 생육하며 토양은 배수가 잘되지만 서늘하거나 한량한 해안성 기후에서 강수량이 풍부한 지역에서 자란다(Zhang et al., 2013). 한라산에서 처음 발견된 구상나무잎말이나방은 침입성인지 자생종인지 결정할 수 없지만 침입성일 가능성이 있다(Shin et al., 2018).

Shin et al.(2018)은 2014년에 한라산 영실, 돈내코, 성관악 등에서 구상나무잎말이나방과 솔알락명나방에 의한 피해를 $75.30 \pm 2.34\%$ 로 보고하였으며, Kim et al.(2019)은 윗세오름, 장구목 남벽 지역에서 솔알락명나방은 82%, 구상애기잎말이나방은 50%, 두 종 모두 우화한 구과는 39%에 해당하였다. 남벽분기점 구상나무의 구과 피해율이 80.1%로 가장 높았고, 평균 피해율은 70.5%로 보고하였다. 국립생태원(2017)에서는 남벽 일대에서 큰솔알락명나방(*Dioryctria sylvestrella*)에 의한 구과 피해율을 약 63.3%로 보고하였다.

구상나무의 구과해충으로서 솔알락명나방이 우점하는 원인으로는 구상애기잎말이나방의 기주 범위가 *Abies* 속에 제한되는데 반해(Suzuki and Komai, 1984), 솔알락

명나방은 소나무과 내 4개 속 21종의 기주를 가해할 수 있어(Bae et al., 2008), 구상나무군락지 주변에 분포하는 소나무류 또한 기주로 활용할 수 있기 때문인 것으로 판단된다(Kim et al., 2020).

한라산 침엽수의 목질부를 가해하는 해충으로 Kim(2016)은 2013년 4월부터 2014년 7월까지 유충을 제외하고 6종 23목 99과 224종의 개체를 구상나무(생목, 고사목)에서 포획하여 그중 딱정벌레목이 75종으로 전체 종의 33.5%를 차지하였으며 곰개미(*Formica japonica*) 43.47%, 툯토기과 16.34%, 한라구상나무좀(*Polygraphus nobuchii*) 8.71% 순으로 포획된 것을 보고하였다.

한라구상나무좀은 한라산 구상나무를 기주로 하는 종으로 Choo and Woo(1989)에 의해 처음으로 보고되었으며 수세가 약한 살아 있는 구상나무와 초기 부식단계의 고사목에 집중적으로 가해하는 것으로 조사되었다(Kim, 2016).

소나무와 구상나무를 가해하는 주요 해충으로는 11종으로 주로 목질부와 구과를 가해고 잎이나 신초부위를 피해를 입히기도 한다(Table 23).

㉔ 위협 및 확장지수 산정

생물적 요인으로는 병·해충의 원인으로 구과 및 목질부 가해로 인한 피해가 발생된 경우 당년 피해율이 50% 이내일 경우 일시적 위협요인으로, 피해율 50~70% 이내일 경우 단기적 위협요인으로, 피해율 70% 이상일 경우 장기적 위협요인으로 구분하였다. 또한 당년 병해충피해율이 40% 이하일 경우 일시적 확장요인으로 3년 병·해충에 의한 피해율 20%~40% 이내를 단기적 확장요인으로, 5년 동안 병·해충에 의한 피해율 20% 이하를 장기적 확장요인으로 구분하였다.

Table 23. List of major pests in the coniferous forest in Mt. Hallasan

Korean name/ English name	Family	Scientific name	Host plant	Main damage
솔나방 (Pine Caterpillar)	솔나방과 Lasiocampidae	<i>Dendrolimus corelimus</i>	Pine trees	Leaf
솔잎혹파리 (Pine Needle Gall Midge)	혹파리과 Cecidomyiidae	<i>Thecodiplosis japonensis</i>	Korean red pine, Japanese black pine	Leaf
솔껍질깍지벌레 (Red Pine Bast Scale)	Matsucoccidae	<i>Matsucoccus thunbergiana</i>	Korean red pine, Japanese black pine	Xylem
솔수염하늘소 (Japanese Pine Sawyer)	하늘소과 Cerambycidae	<i>Monochamus alternatus Hope</i>	Pine trees	Xylem
북방수염하늘소 (Sakhalin Pine Longicorn Beetle)	하늘소과 Cerambycidae	<i>Monochamus saltuarius</i>	Pine trees	Xylem
나무좀류 (Bark Beetle)	나무좀과 Scolytidae	<i>Tomicus piniperda</i> (소나무좀) <i>Cryphalus fulvus</i> (노랑애나무좀)	Pine trees	Xylem
한라구상나무좀	나무좀과 Scolytidae	<i>Polygraphus nobuchii</i>	Korean fir	Xylem
솔알락명나방 (Cone Pyralid)	명나방과 Pyralidae	<i>Dioryctria abietella</i>	Pineaceae	Conifer
큰솔알락명나방 (Japanese pine tip moth)	명나방과 Pyralidae	<i>Dioryctria sylvestrella</i>	Pineaceae	Conifer
구상나무잎말이나방	잎말이나방과 Tortricidae	<i>Cydia kamijoi</i>	Korean fir	Conifer
복숭아명나방 (Yellow peach moth)	플명나방과 Crambidae	<i>Conogethes punctiferalis</i>	Pine trees	Conifer

③ 제주조릿대

㉔ 환경요인 분석

제주조릿대는 분포면적은 제주조릿대 관리방안연구(Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Office, 2020) 결과로 보고되었는데, 한라산국립공원 내 전체면적 153km²의 95%에 해당하는 146km²에 제주조릿대가 분포하고 있으며, 북사면 95.5%, 남사면 94.7%로 사면별 제주조릿대가 점유하고 있는 비율은 거의 차이가 없다. 해발 1,400m 이상의 아고산 지역은 면적이 22km²이며 이 중 88.3%에 해당하는 19km²를 제주조릿대가 점유하고 있는 것으로 보고하였다(Figure 51, 52, Table 24).

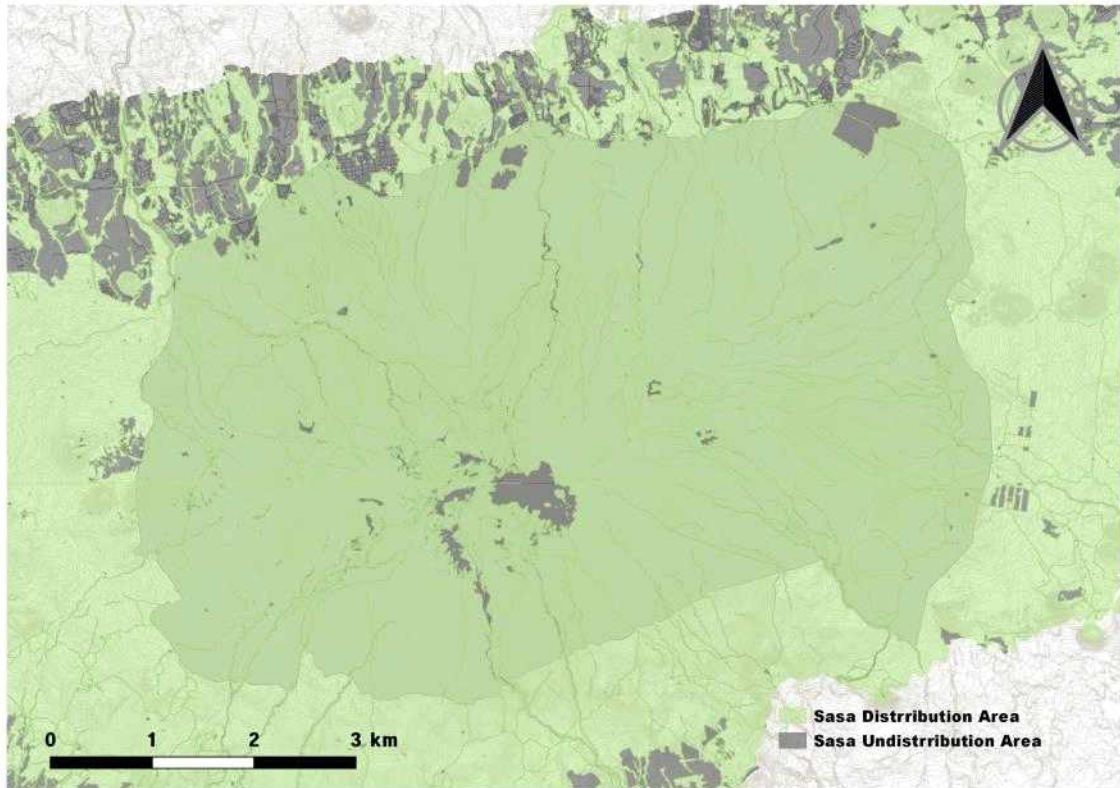


Figure 51. Distribution and undistributed areas of Jeju Sasa in Hallasan National Park.

남사면(83.5%)이 북사면(93%)보다 제주조릿대 점유비율이 낮은 것으로 나타났는데, 이는 정상부근의 남동사면에 제주조릿대가 자라지 않는 암석지대가 넓게 자리

잡고 있으며, 물이 자주 고이는 습지가 분포하기 때문이다. 해발 1,400m 이상 지역에는 관목림, 초지 등이 많이 포함되어 있으나 대부분 제주조릿대가 분포하고 있으며, 한라산 분화구 주변, 계곡 기저부 및 암반지역, 습지, 인공시설물 구역과 탐방로를 제외한 거의 전 지역에 확산되어 있다. 어리목 등산로를 따라서는 장구목(해발 1,800m) 정상까지 제주조릿대가 분포하며, 분화구 서북벽에도 제주조릿대가 분포한다. 관음사 등산로 방면은 해발 1,800m, 성관악 등산로는 해발 1,850m가 분포한계로 파악되었으며 그 이상의 고지대 초본층은 김의털(*Festuca ovina* L.)과 털새(*Arundinella hirta* var. *ciliata* Koidz.)가 우점하고 있다.

Table 24. Comparison of distribution and undistribution area of Jeju Sasa in Hallasan National Park

Range	Area(km ²)			Occupation rate(%)	
	Total	Distribution	Undistribution		
Sub-alpine region (Above 1,400m)	South slope	10.63	8.87	1.76	83.5
	North slope	10.91	10.15	0.76	93.0
	Total	21.54	19.02	2.52	88.3
Hallasan National Park	South slope	50.46	47.78	2.68	94.7
	North slope	102.94	98.35	4.59	95.5
	Total	153.40	146.13	7.27	95.3

한라산 침엽교목 분포지역의 하층식생에 제주조릿대가 우점하고 있으며, 제주조릿대 확산 및 밀도 증가로 인해 구상나무 종자의 발아 저해와 피압으로 인한 치수생육 상태가 불량해지고 있다(Park and Kim, 1986; Lee and Hong, 1995; Song, 2011; Kim and Oh, 2016)고 보고하였으며, Song et al.(2020)은 구상나무 치수가 자라는 지표면의 유형은 암석위에 이끼가 자라는 유형에서 가장 많은 치수가 자라는 것으로 보고하였다. 이는 하층식생으로 제주조릿대가 구상나무 치수 발생을 방해하고

있는 것으로 판단된다. 또한 소나무림에서도 제주조릿대 밀도가 높아 뿌리경쟁이 발생하고 후계림을 이룰 치수의 발생이 이루어지지 못하고 있어 제주조릿대 관리가 시급하다고 보고하였다(Hallasan National Park Management Office, 1998).

한라산 침엽교목림 분포지역에 대한 제주조릿대 하층 분포는 2006년에 95.6%, 2015년에 96.4%로 거의 침엽교목 하층 식생을 제주조릿대가 우점하고 있는 것으로 조사되었다(Table 25). 수종별로 보면 소나무림의 경우 2006년에는 97.2%, 2015년 97.8%가 하층식생을 점유하고 있으며, 구상나무의 경우 2006년은 93.0%, 2015년은 93.7%로 소나무림에 비해서는 다소 낮은 것으로 분석되었다. 이는 한라산 백록담 화구벽 등 일부 해발고도 1,800m 이상 고지대에는 제주조릿대가 자라지 못하는 지역에 구상나무가 분포하고 있는 차이로 해석된다.

Table 25. Occupied area and ratio of Jeju Sasa on substratum vegetation according to coniferous type in Mt. Hallasan

Plant type	Distribution area (ha)		Occupation area of Jeju Sasa(ha)		Occupation rate of Jeju Sasa(%)	
	2015	2006	2015	2006	2015	2006
Korean red pine	1,259.9	1,208.4	1,231.6	1,174.2	97.8	97.2
Korean fir	626.0	738.3	586.5	686.5	93.7	93.0
Coniferous forest	1,885.9	1,946.7	1,818.1	1,860.7	96.4	95.6

㊤ 위협 및 확장지수 산정

제주조릿대의 경우 10년간 면적 확장이 5% 이하의 경우 일시적 위협요인으로, 면적확장이 6%~10% 이내면 단기적 위협요인으로, 면적확장이 10% 이상의 경우 장기적 위협요인으로 구분하였다. 확장요인으로는 제주조릿대 면적 감소가 5% 이내면 일시적 요인으로 6%~10% 이내면 단기적 요인으로, 10%이상 면적 감소하며 장기적 확장요인으로 구분하였다. 가중치 0.5 지수값을 확장요인과 위협요인에 부여하였다.

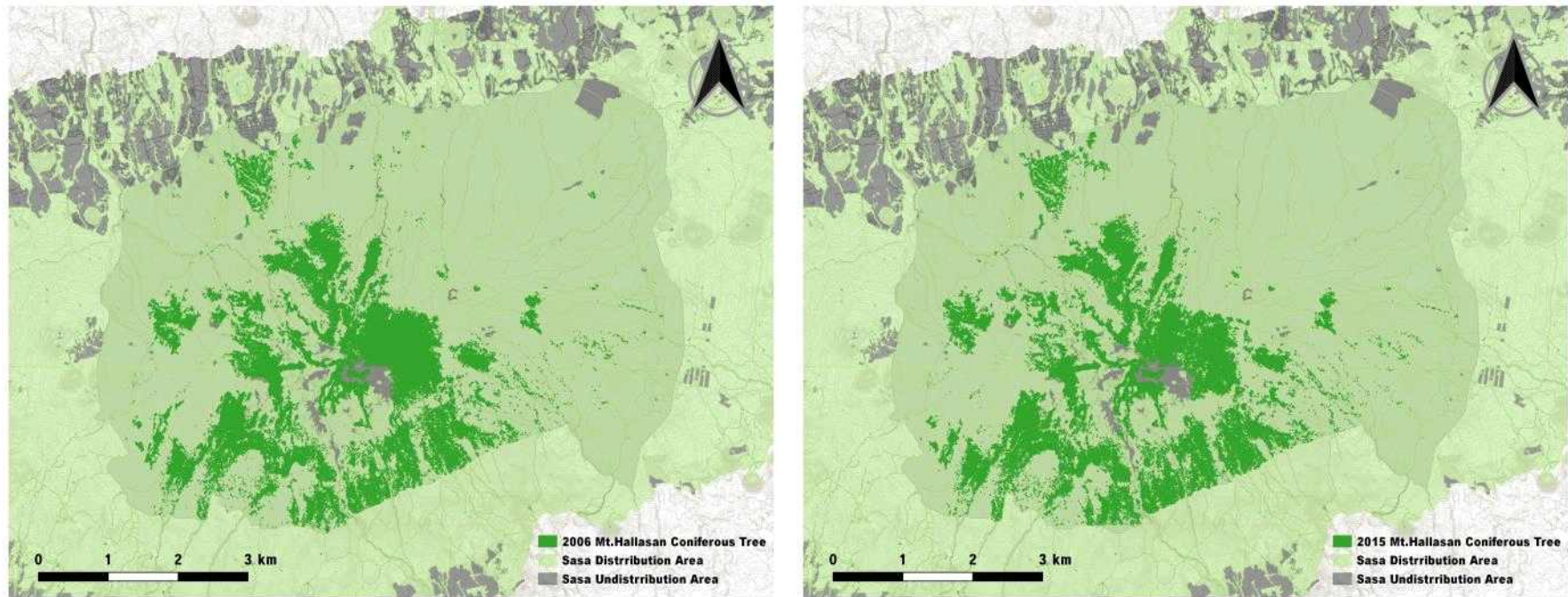


Figure 52. Distribution of Jeju Sasa and coniferous trees in Mt. Hallasan in 2006 and 2015.

④ 야생동물

㉞ 환경요인 분석

침엽수는 초기 성장단계에서 작은 피해가 전 생장기에 영향을 미친다. 구상나무의 경우 한라산에 서식하고 있는 야생동물인 노루(*Capreolus pygargus*) 섭식 피해가 보고되고 있으며, Lee et al.(2019)은 구상나무 유묘의 발생은 어느 정도 이루어지고 있거나 교란으로 인한 치수로의 발달이 제한되고 있어 조사된 개체수 3,138개체중 12.1%인 381개체가 노루의 섭식이 확인되었으며, 노루의 섭식이 유묘 발생 및 치수 발달 교란을 야기하는 가장 중요한 요인으로 추정하였다. 소나무는 노루의 먹이 식물로 선호성이 높다는 보고(Petersen and Strandgaard, 1994; Kim and Kim, 2001)와 전혀 먹지 않는다는 보고(Bergman et al., 2005)가 있으나, 선호도가 높지는 않는 것으로 보고되고 있다(Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Headquarters, 2019b)

Park et al.(2020)에 따르면 지리산국립공원 세석평전 일대 설치류에 의한 수목피해가 발생하여 배설물의 유전자염기서열 분석결과를 유전자은행(미국 국립생물정보센터; NCBI)에 등록된 데이터와 비교한 결과, 대륙밭쥐(*Craseomys regulus*)에 의해 수고 1.5m 이상 개체 가지에 97.5% 피해를 입혀 가지부만 고사하였으며, 수고 1.5m 미만의 구상나무는 대륙밭쥐에 의해 고사율이 58.3%의 피해를 받은 것으로 보고하였다. 한라산국립공원에는 제주땃쥐(*Crocidura dsinezumi*), 우수리땃쥐(*Crocidura lasiura*), 제주등줄쥐(*Apodemus agrarius chejuensis*), 집쥐(*Rattus norvegicus*), 한라산땃쥐(*Sorex caecutiens hallamontanus*) 등 4종이 서식하고 있으며 제주등줄쥐가 가장 서식밀도가 높으며 해발 1,700m 구상나무림에 15마리/ha에 가장 높은 밀도로 서식하고 있다고 보고하였다(Oh, 2013). 한라산의 경우 설치류에 의한 피해는 아직까지 조사가 이루어지지 않아 피해정도는 알 수가 없으나, 지리산국립공원의 피해를 감안한다면 치수들의 피해가 있을 것을 예상된다.

㉟ 위협 및 확장지수 산정

야생동물의 경우 당년 유묘 섭식비율이 10% 이하면 일시적 위협요인으로, 당년 유묘 섭식 비율 10%~30% 이하이면 단기적 위협요인으로, 유묘 섭식 비율 30% 이상의 경

우는 장기적 위협요인으로 구분하였다. 당년 유묘 섭식 비율 10%~5%이면 일시적 확장요인으로, 유묘 섭식 비율 5% 이하이면 단기적 확장요인으로, 5년 동안 유묘 섭식 비율 10% 이하의 경우 장기적 확장요인으로 구분하였다.

⑤ 갱신율

㉠ 환경요인 분석

숲의 유지를 위해서는 고사목보다 치수발생이 많아야 한다. 영실 일대 소나무림은 상층은 소나무가 우점하고 있으나 어린 소나무의 발달이 이루어지지 않고 있어 기후변화나 기상이변 등에 의해 변화 속도가 빨라질 가능성이 있다(Koh et al., 2017).

한라산 구상나무 고사 실태 및 생육 상황을 파악하기 위해 2013년, 2014년에 전체 구상나무 분포지를 대상으로 조사하였는데, 구상나무에서 살아있는 개체수는 전체 구상나무의 54.1%인 평균 1,098.3본/ha이며, 고사목은 45.9%인 평균 930.0본/ha으로 나타났으며 치수는 평균 260.8본/ha 발생하였다(Koh et al., 2015). 고사목과 치수발생 현황비율로 계산한 갱신율은 0.14%였다.

Song et al.(2020)은 영실과 진달래밭 지역의 고사목과 치수발생을 2009년, 2014년, 2018년에 조사하였는데(Table 26), 결과자료를 토대로 2009년 구상나무의 갱신율은 영실이 4.65%, 진달래밭은 1.37%, 2018년의 경우 영실 8.76%, 진달래밭이 1.93%였다.

Table 26. Renewal rate of Korean fir between by Yeongsil and Jindallaeba region in Mt. Hallasan in 2009, 2014 and 2018

Region	2009		2014		2018		Total		Renewal rate (%)
	Seedling	Dead	Seedling	Dead	Seedling	Dead	Seedling	Dead	
Yeongsil	242	26	449	32	631	36	1,322	94	7.03
Jindallaeba	41	15	28	27	197	27	266	69	1.93
Total	283	41	477	59	828	63	1,588	163	5.84

*Data source: Song et al.(2020)

㉔ 위협 및 확장지수 산정

갱신율의 경우 고사목과 치수 발생하여 성목으로 성장한 비율로 군락의 지속성을 판단하는 요인이다. 갱신율 100% 이내면 일시적 위협요인으로 2년 동안 갱신율 100% 이내면 단기적 위협요인으로, 3년 동안 갱신율이 50% 이하면 장기적 위협요인으로 구분하였다. 확장요인으로는 당년 갱신율 150%~200% 이내면 일시적 요인으로, 2년 동안 갱신율이 200%~500% 이내면 단기적 확장요인으로, 3년간 갱신율 500% 이상의 경우 장기적 확장요인으로 구분하였다. 갱신율도 가중치 0.5 지수값을 주었다.

3) 한라산 침엽교목림 위협 및 확장지수

한라산 구상나무림과 소나무림 변화의 환경요인을 위협 및 확장기준과 가중치를 일시적, 단기적, 장기적 시간으로 구분하여 종합하면 Table 27, 28과 같이 요약할 수 있다. 이는 위협과 확장정도를 시간적 개념에서 지수값을 부여했을 뿐만 아니라 위협과 확장정도에 중요한 요인으로 작용하는 항목에 대해서는 가중치를 부여한 것이다.

Table 27. Threat level and index value of coniferous forest in Mt. Hallasan

Factors (weights)	Threat Level and Index Value				
	Temporary (current year)/ 1	Short term (within 4 years)/ 2~4	Long term (5 years or more)/ 5		
Non - living things	Temperatures (0.5)	Average temperature of the previous year: ± 0.5 °C or Over	Average temperature (5 years): $\pm 0.1 \sim \pm 0.5$ °C	Average temperature (10 years): ± 0.6 °C or Over	
	Precipitation (0.5)	Precipitation of the previous year: ± 20 % or Over	Normal (5 years) precipitation: ± 11 % ~ ± 30 %	Normal (10 years) precipitation: ± 15 % or Over	
	VPD	VPD 5-12 hpa: 60 days or Less	2 years VPD 5~12 hpa: 100days or less	3 years VPD 5~12 hpa: 150days or less	
	Insolation	Average insolation: ± 10 % Within	Average insolation: ± 11 % ~ ± 15 %	Average insolation: ± 15 % or Over	
	Typhoon(0.5)	Influence period (within 1 day) Precipitation: 300 mm \uparrow , Wind speed: up to 10 m/s class 2 or less	Influence period (within 2 days) Precipitation: 400 mm \uparrow , Wind speed: up to 15 m/s class 2 or less	Influence period (within 2 days) Precipitation: 500 mm \uparrow , Wind speed: up to 15 m/s class 2 or more	
	Soil(10 items)	Normal soil analysis value: within ± 9 %	Normal soil analysis value: within ± 10 % ~ ± 14 %	Normal soil analysis value: ± 15 % or Over	
	Pest damage	Damage rate by pests: within 50 %,	Damage rate by pests: within 50 % ~ 70 %	Damage rate from pests: over 70 %	
	Disease	Damage rate: less than 50 % due to disease	Damage rate due to disease: within 50 % ~ 70 %	Damage rate: 70 % or more by disease	
	Living things	wild animals	Seedling feeding rate: 10 % or Less	Seedling feeding rate: 10 % ~ 30 %	Seedling feeding rate: more than 30 %
		Jeju Sasa	Jeju Sasa area expansion: 5 % \downarrow	Jeju Sasa area expansion: 6 % ~ 10 %	Jeju Sasa area expansion: 10 % \uparrow
Renewal rate* (0.5)		Renewal rate for the year: 100 % or Less	Renewal rate for 2 year: 100 % or Less	Renewal rate for 3 year: 50 % or Less	

* The renewal rate is the ratio of dead wood and Seedling.(Seedling \times 0.005/Dead tree \times 100)

Table 28. Expansion level and index value of coniferous forest in Mt. Hallasan

Factors (weights)	Expansion Level and Index Value			
	Temporary (current year)/ 1	Short term (within 4 years)/ 2~4	Long term (5 years or more)/ 5	
Non - living things	Temperatures (0.5)	Average temperature of the previous year: ± 0.5 °C or Over	Average temperature (5 years): ± 0.1 °C ~ ± 0.5 °C	Average temperature (10 years): ± 0.6 °C or Over
	Precipitation (0.5)	Precipitation of the previous year: ± 20 % or Less	Normal (5 years) precipitation: ± 5 % ~ ± 10 %	Normal (10 years) precipitation: ± 11 % or Less
	VPD	VPD 5-12 hpa: 60 days or Over	2years VPD 5~12 hpa: 150 days or Over	3 years VPD 5~12 hpa: 200 days or Over
	Insolation	Average insolation: ± 10 % Within	Average insolation: ± 11 % ~ ± 15 %	Average insolation: ± 16 % or Over
	Typhoon	No typhoons that affected the year	Influence period for 3 years (within 1day) Precipitation: 300 mm ↓, wind speed: up to 10 m/s 1 class	Influence period for 5 years (within 1day) Precipitation: 300 mm ↓, wind speed: up to 10m/s 2 class
	Soil(10 items)	Normal soil analysis value: within ± 9 %	Normal soil analysis value: within ± 10 % ~ ± 14 %	Normal soil analysis value ± 15 % or Over
	Pest damage	Damage rate by pests: within 40 %,	3years Damage rate by pests: within 20 % ~ 40 %	5years Damage rate by pests: 20 % ~ 40 % or Less
	Disease	Damage rate by disease: within 40 %,	3years Damage rate by disease: within 20 % ~ 40 %	5years Damage rate by disease: 20 % ~ 40 % or Less
	wild animals	Seedling feeding rate: 10 % ~ 5 %	Seedling feeding rate: 5 % or Less	5years Seedling feeding rate: 10 % or Less
	Jeju Sasa(0.5) Renewal rate* (0.5)	Jeju Sasa area reduction: 5 % ↓ Renewal rate for the year: 150 % ~ 200 %	Jeju Sasa area reduction: 6~10 % 2year renewal rate: within 200 % ~ 500 %	Jeju Sasa area reduction: 11 % ↑ 3year renewal rate: 500 % or Over

* The renewal rate is the ratio of dead wood and Seedling.(Seedling×0.005/Dead tree × 100)

4) 환경요인에 따른 침엽교목림의 위협 및 확장지수 평가

(1) 환경요인에 따른 위협/확장 지수값의 시간적 범위

한라산 침엽교목림의 위협과 확장요인으로 비생물적 요인은 2015년을 기준년도로 하였으며, 생물적 요인은 2018년 이후에 보고된 자료를 기준으로 분석하였다. 이는 한라산 침엽교목림의 확장과 위협지수값의 시간적 범위에 대한 경향성을 판단하여 기초자료로 활용하고자 하였다.

위협 및 확장지수는 0점부터 62.5점까지 범위이며 0~12.5점까지는 당해연도에 영향을 미치는 일시적 범위로 분류하였으며, 12.5~37.5까지는 4년 이내에 영향을 미치는 단기적 범위로 37.5~62.5는 5년 이상 영향을 미치는 장기적 범위로 분류하였다(Table 29). 이는 일시적 범위에 대한 가중치와 요소별 지수값을 전체 더하여 산정하였으며 단기적, 장기적 범위도 동일하게 적용하였다. 단 지수값은 환경요인의 자료값이 없을 경우 해당되는 지수값의 범위를 제외하여 제시 하여야 한다.

Table 29. Threats and extended range index values for 11 indexes

Threats and Extended Range	Temporary	Short term	Long term
Index Values	0~12.5	12.5~37.5	37.5~62.5

(2) 환경요인에 따른 한라산 침엽교목림의 위협/확장지수

2015년을 기준으로 구상나무의 경우 비생물적 환경요인이 온도는 5년 동안 평균 온도차이가 0.3℃가 발생하여 위협요인으로 지수값 3으로 나타났고 가중치를 반영하여 4.5점을 부여되었다. 또한 강수량도 5년 평균 10% 이상 발생하여 지수값 3과 가중치 반영하여 4.5점으로 나타났다. 수증기압포차는 당해연도 확장요인으로 1점이 나타났으며, 태풍도 당해연도 확장요인이 1점, 토양은 평년 토양분석값 대비 -18%로 장기적 위협요인으로 지수값 5점으로 나타났다. 생물학적 환경요인으로 충해는 솔알락명나방에 의한 구과 피해율이 70.5% 발생하여 장기적 위협요인으로 5점이 부여되었다. 병해로 인한 피해 발생은 보고되지 않아 장기적 확장요인으로 5점 부여

하였다. 야생동물인 노루에 의한 섭식피해 12.1%로 단기적 위협요인에 해당되어 2점으로 나타났으며, 제주조릿대 면적은 2018년에 보고된 이후 면적변화가 보고되지 않아 분석에 제외하였다. 구상나무 갱신율은 Song et al.(2020)에 의해 보고된 영실과 진달래밭 자료값을 사용하였다. 2018년 고사목은 63그루, 치수발생은 828개체로 갱신율은 6.58%로 장기적 위협요인으로 지수값 5점에 가중치 반영하여 7.5점 부여하였다.

구상나무는 비생물적 요인의 위협지수 14점과 생물적 요인의 위협지수 14.5점을 합해져서 환경요인에 의한 위협지수가 28.5점이었으며, 확장지수는 7점으로 분석되었다 (Table 30). 이처럼 2015년을 기준으로 볼 때 구상나무림은 위협 지수의 수준이 높게 나타나 지속적인 면적 감소가능성이 높다는 것으로 의미하는 것이다.

Table 30. The threat and expansion index of Korean fir in the Mt. Hallasan

Factors (weights)		Threat level	Expansion level	Remark
	Temperatures(0.5)	4.5	-	
	Precipitation(0.5)	4.5	-	
Non -	VPD	-	1.0	
living	Insolation			Data deficient
things	Typhoon(0.5)	-	1.0	Threat weights
	Soil(10 items)	5.0	-	
	Sum	14.0	2.0	
	Pest damage	5.0	-	
	Disease	-	5.0	
Living	wild animals	2.0	-	
things	Jeju Sasa			Data deficient
	Renewal rate(0.5)	7.5	-	
	Sum	14.5	5.0	
	Total	28.5	7.0	

소나무의 경우 온도는 5년 동안 평균 온도차이가 0.3℃ 발생하여 확장요인으로 지수값 3과 가중치를 반영하여 4.5점으로 나타났고, 강수량의 경우 5년 평균 10% 이

하 발생하여 지수값 3과 가중치 반영하여 4.5점 나타났다. 수증기압포차는 당해연도 확장요인으로 1점이 나타났으며, 태풍은 당해연도 발생하지 않아 확장요인 1점을 부여하였으며, 토양은 평년 토양분석값 대비 9%로 일시적 확장요인으로 지수값 1점이 나타났다. 병충해 및 야생동물에 대한 피해가 보고되지 않아 장기적 확장요인으로 5점 부여하였으며, 제주조릿대 면적은 2018년에 보고된 이후 면적변화가 보고되지 않아 분석에 제외하였다. 소나무 치수발생이 없어 장기적 위협요인으로 5점에 가중치 2.5를 반영하여 7.5점 부여하였다.

소나무는 비생물적 요인의 위협지수 5.5점과 생물적 요인의 위협지수 7.5점을 합해져서 환경요인에 의한 위협지수가 12점이었으며, 확장지수는 21.5점으로 분석되었다(Table 31). 이는 2015년 환경요인적인 기준으로 볼 때 소나무림의 확장가능성이 높다는 것을 의미한다.

Table 31. The threat and expansion index of Korean Red Pine in the Mt. Hallasan

Factors (weights)		Threat level	Expansion level	Remark
	Temperatures(0.5)	-	4.5	
	Precipitation(0.5)	4.5	-	
Non -	VPD	-	1.0	
living	Insolation			Data deficient
things	Typhoon(0.5)	-	1.0	Threat weights
	Soil(10 items)	1.0	-	
	Sum	5.5	6.5	
	Pest damage		5.0	
	Disease		5.0	
Living	wild animals		5.0	
things	Jeju Sasa			Data deficient
	Renewal rate(0.5)	7.5		
	Sum	7.5	15.0	
	Total	12.0	21.5	

5) 환경요인에 따른 위협 및 확장지수 검증

침엽교목의 위협이나 확장지수의 신뢰성을 검증하기 위하여, 시간적으로는 연륜분석을 통해 구상나무림에 변화요인으로 작용한 2011년부터 2014년까지 선정하였다. 지역적으로는 구상나무림 면적감소 지역인 진달래밭과 면적증가 지역인 방애오름지역을 선정하였다. 또한 소나무림의 경향성을 판단하기 위해 시기는 동일하게 선정하였으며, 지역은 면적 감소지역인 속밭과 면적 증가지역인 개미등을 선정하였다.

기상자료는 제시된 지역에 가장 인접한 지역의 자료를 사용하여 비생물적 요인(온도, 강수량, 수증기압포차, 태풍)으로 위협과 확장지수값을 산출하였다. 또한 4가지 환경요인에 대한 지수값을 산정하여 확장과 위협의 범위도 조정되어 제시하였다 (Table 32).

Table 32. Threats and extended range index values for 4 Indexes

Threats and Extended Range	Temporary	Short term	Long term
Index Values	0~5.5	6.0~22.0	22.5~27.5

(1) 구상나무림 위협 및 확장지수 평가

진달래밭 지역의 구상나무림은 확장과 위협의 지수값은 위협지수 39.5, 확장지수 20.5로 위협요인이 우세하게 작용하여 2011년에서 2014년 사이에 면적이 감소한 것으로 분석된다(Table 33).

이를 환경요인별로 보면 온도는 확장적 요인으로 작용하였으나, 2013년 경우에는 평균온도가 11.7℃로 10년 평균온도 10.9℃ 보다 0.8℃ 상승하여 장기적 위협지수 범위에 있었다. 강수량은 연도별 편차가 심하여 구상나무림에 지속적으로 위협요인으로 작용하였으며, 10년 평균 보다 30% 증가한 2012년과 20% 이상 감소한 2013년은 장기적 위협의 범위에 있었다. 태풍은 위협요인으로 우세하였다.

2011년에는 일시적 확장구간에 있던 구상나무림이 2012년과 2013년, 2014년에 일시적 위협구간 범위값이 산출되었다. 이는 이들 지역이 2015년 이전에 구상나무림

의 급격한 감소와 일치되는 것으로, 환경요인중 강수량과 태풍이 크게 영향을 주었음을 의미하는 것이다.

Table 33. The threat and expansion index of Korean fir at Jindallaebat area in Mt. Hallasan

Factors (weights)	Threat level				Expansion level				Remark
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014	
Temperatures(0.5)	-	-	7.5	-	6.0	6.0	-	4.5	
Precipitation(0.5)	1.5	7.5	7.5	1.5		-	-	-	
VPD	-	1.0	-	1.0	1.0	-	1.0	-	
Typhoon(0.5)	-	7.5	-	4.5	1.0	-	1.0	-	Threat weights
Sum	1.5	16.0	15	7.0	8.0	6.0	2.0	4.5	

윗세오름 일대 기상자료를 이용하여 방애오름 지역의 구상나무림은 위협지수 23점, 확장지수 22점으로 위협과 확장요인이 비슷하게 작용하였는데, 결과적으로 2011년에서 2014년 사이에 면적변화 폭이 적은 것으로 분석된다(Table 34). 다만, 이들 지역이 위협지수값이 다소 높게 나타났음에도 불구하고 면적이 일부 증가된 것은 분석된 4개의 환경요인 외에 생물학적 요인 등 다른 요인이 작용했기 때문으로 해석될 수 있다.

환경 요인별로 보면 기온은 2011년부터 5년 동안의 평균기온 6.09℃ 보다 0.88℃ 감소하고, 2012년도 0.49℃ 감소하여 확장요인으로 작용하였다. 강수량은 위협요인으로 작용하였으며, 결측값과 2011년 이전의 자료가 없어 제공된 자료로 분석하였다.

Table 34. The threat and expansion index of Korean fir at Bangaeoreum area in Mt. Hallasan

Factors (weights)	Threat level				Expansion level				Remark
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014	
Temperatures(0.5)			6.0		6.0	6.0		4.5	
Precipitation(0.5)	ND		1.5	1.5	ND	1.5			
VPD	1.0	1.0					1.0	1.0	
Typhoon(0.5)	-	7.5	-	4.5	1.0	-	1.0	-	Threat weights
Sum	1.0	8.5	7.5	6.0	7.0	7.5	2.0	5.5	

(2) 소나무림 위협 및 확장지수 평가

속밭 지역 소나무림의 2011년부터 2014년까지 위협지수 42.5, 확장지수 20.5로 위협요인이 우세하게 작용하였다(Table 35).

이를 환경요인별로 보면 온도는 2013년을 제외하고는 10년 평균온도 보다 하락하여 위협요인으로 작용하였으며, 2013년의 경우 10년 평균 온도와 비교하여 0.8℃ 상승하여 확장요인이었다. 반면 강수량의 경우 2012년 태풍에 의한 강수량 증가와 2013년 가뭄에 의한 강수량 감소가 장기적 위협요인에 있었다.

Table 35. The threat and expansion index of Korean red pines at Sogbat area in Mt. Hallasan

Factors (weights)	Threat level				Expansion level				Remark
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014	
Temperatures(0.5)	4.5	6.0	-	3.0	-	-	7.5	-	
Precipitation(0.5)		7.5	7.5		1.5	-	-	7.5	
VPD	-	1.0	-	1.0	1.0	-	1.0	-	
Typhoon(0.5)	-	7.5	-	4.5	1.0	-	1.0	-	Threat weights
Sum	4.5	22.0	7.5	8.5	3.5	0.0	9.5	7.5	

개미등 지역 소나무림은 2011년부터 2014년까지 확장과 위협의 지수값은 위협지수 43, 확장지수 14로 평가되어 위협요인이 우세하였다(Table 36). 이를 환경요인별로 보면 온도는 10년 평균보다 증가하여 확장요인으로 작용하였으며, 반대로 강수량은 증감폭이 커 위협요인으로 작용하였다. 그러나 개미등 지역의 경우 2005년과 비교하여 2015년에 면적이 증가한 지역이다. 이는 평가된 4개의 환경요인보다는 자료가 부족한 7개 환경요인에 의해서 확장된 것으로 판단되며 지형적 위치에 따른 일사량, 토양 등의 비생물학적 환경요인뿐만 아니라 병해충, 제주조릿대의 분포특성, 야생동물이나 갱신률 등의 생물학적 환경요인 더욱 크게 작용했다고 볼 수 있다.

Table 36. The threat and expansion index of Korean red pines at Gaemideung in Mt. Hallasan

Factors (weights)	Threat level				Expansion level				Remark
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014	
Temperatures(0.5)	-	-	-	-	4.5	4.5	1.5	1.5	
Precipitation(0.5)	7.5	7.5	7.5	7.5	-	-	-	-	
VPD	ND	ND	ND	1.0	ND	ND	ND	-	
Typhoon(0.5)	-	7.5	-	4.5	1.0	-	1.0	-	Threat weights
Sum	7.5	15.0	7.5	13	5.5	4.5	2.5	1.5	

한라산 구상나무림과 소나무림에 대해 지난 2011년부터 2014년까지 시기를 한정하여 적용한 확장/위협 지수평가로 볼 때, 구상나무림의 경우 면적의 감소나 증가에 온도, 강수량, 태풍 등이 주요 원인으로 평가되는 것으로 나타났는데 반해 소나무림의 경우는 주요 요인으로 평가되기에는 미흡한 것으로 나타났다.

이러한 평가결과는 대상 지역에 대한 한정된 적용시기와 데이터 확보의 한계성 등으로 인해 확장/위협 지수평가에는 한계를 가져올 수밖에 없었던 것으로 해석되었다. 이는 대상지역에 대한 신뢰성을 갖는 환경요인 측정값의 지속적인 축적과 더불어 생물학적 요인에 대한 모니터링이 병행되면 제시된 확장/위협 지수평가를 통해 보다 효율적인 연구접근이 가능할 것으로 판단된다.

4. 고찰

한라산 구상나무와 소나무의 수관밀도 10% 이상을 지닌 침엽교목림의 면적은 2006년 이후 10년이 지난 2015년에는 60.8ha가 감소된 것으로 나타났다. 이들 침엽수림의 감소는 해발 1,200m 이하 지역에서는 다소 증가하는 경향을 보였으나 1,210m 이상 지역에서 해발고도에 관계없이 감소되는 경향을 보였다. 그리고 방위, 경사에 따라서도 다소 다른 증가와 감소 경향을 보였다. 방위에 따라서는 남쪽과 남서방향에서는 증가한 반면 북향을 중심으로는 다소 증가되었다. 또한 경사에 따라서는 10° 이하 지역에서는 침엽교목림이 다소 증가하였으나 11° 이상에서는 감소된 것으로 나타났다.

한라산 침엽교목림의 면적변화는 구상나무와 소나무의 두 종간에 뚜렷한 차이를 보였다. 즉, 소나무림은 증가하는 반면 구상나무는 감소하는 것으로 나타난 것이다. 더욱이 소나무림의 증가된 면적에 비해 구상나무림의 감소된 면적이 훨씬 높게 나타나 전체적인 침엽교목림의 면적은 감소하는 결과를 가져왔다. 특히, 소나무림의 면적은 한라산 해발 1,210m 이상에서 1,500m까지 주로 발생되면서 고지대로 확장되는 반면 구상나무는 해발고도에 관계없이 감소되는 것으로 나타났다. 이와 같은 한라산 구상나무림의 감소와 소나무림의 증가 경향은 기존 보고(Kim and Lee, 2013; Song et al., 2012)와 유사하였다. 이러한 침엽교목림의 변화는 한라산 해발고도 및 지형 특성에 따른 기후요인뿐만 아니라 제주조릿대 군락의 확대, 병해충의 영향 등 다양한 환경요인에 의해 초래되는 것으로 볼 수 있다.

침엽교목림의 변화에는 다양한 환경요인들이 작용한 결과로 확장과 쇠퇴가 진행된다. 이는 수목의 성장과 분포범위는 다양한 인자들에 의해서 영향을 미치기 때문이다. 이 중에서 온도와 수분이 가장 큰 영향을 미친다(Fritts, 1976; LaMarche et al., 1984; Shin et al., 2001). 기온은 수목의 성장과 개화, 증산작용 등 생리적 작용을 하며, 수분은 원형질의 구성성분으로 양분의 흡수와 이동, 용매작용을 통해 성장에 관여한다(Lee, 1993).

한편, 산림지역과 비산림지역에 대한 강수량과 온도의 변화는 비산림지역이 연평균온도가 증가하고, 강수량은 감소 추세에 있는 반면에 산림지역은 강수량은 증가

하며, 온도는 비산림지역에 비해 낮은 증가추세에 있는 것으로 분석되었다. 특히, 구상나무의 생육 쇠퇴 및 고사는 수분수지 불균형에 의한 봄철 수분스트레스가 주요 원인으로 보고하였으며(Park and Seo, 1999; Koo et al., 2001; Seo et al., 2019), 온난화에 의한 기온상승은 봄 가뭄 기간 동안 증발산량을 증가시키고 이로 인해 수분수지의 불균형을 일으켜 구상나무 생육감소를 초래하는 것으로 보았다(Park and Seo, 1999; Koo et al., 2001). 강수량은 연륜생장에 가장 큰 영향을 주며(Zobel and Van Buijtenen, 1989), 연륜폭 변화의 80%를 강수량으로 설명할 수 있다고 하였다(Zahner, 1968). 또한 구상나무의 생장은 4월과 전년 11월의 기온 및 전년 12월과 당년 1월의 강수량과 양의 상관관계를 가진다고 보고하였다(Koo et al., 2001). 그리고 소나무의 직경생장과 월강수량은 전년도 8월과 9월의 강수량이 많을수록 증가하며(Chung, 2013), 전년도 9월의 온도가 높고 강수량이 많으면 직경생장이 증가한다(Larsen and Macdonald, 1995)고 하였다.

강한바람 및 많은 비 피해 이외도 태풍은 구상나무 물질생산의 감소를 초래하여 생육쇠퇴에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다(Jang et al., 2014). Altman et al.(2012)은 한라산 아고산대의 구상나무림에서 현존량과 유기탄소량 변동의 주요 원인은 태풍이라고 판단하였으며, 태풍의 횡수는 강수량과 직결되며 강수량은 식물의 성장과 밀접한 연관이 있다고 보고하였다. 또한 태풍의 진행 방향과 관련하여 오른쪽을 위험반원이라고 하며 태풍자체의 풍향과 대기 대순환에 의한 일반풍이 가세하여 풍속이 강해진다고 알려져 있어 진행경로에 따라 피해규모가 달라지기도 한다.

한라산 침엽교목림의 면적변화 원인으로 Ahn et al.(2019)과 Ahn and Youn.(2020)은 기후변화에 따른 토양 수분 과다의 가능성을 보고하였고, Yunyun et al.(2021)은 중국 아한대 산림지역에 자생하는 잎갈나무(*Larix gmelinii*)는 영구 동토층의 잉여물에 의해 토양침수가 발생하여 고사한다고 하였다. 일반적으로 극한지역인 고지대에 서식하는 식물일수록 수분 스트레스 변화에 민감한 것으로 알려져 있다. 한라산 아고산 지역은 해양성 기후의 영향으로 비가 많고 대기 중 습도가 높은 지역이지만, 화산회토로 이루어진 토양은 배수가 원활하다(Hyun, 2006).

숲이 유지되기 위해서는 종자공급, 종자발아, 치수 활착이 중요한 요인이다(Kim et al., 2001). 소나무 숲 천연갱신을 위해서는 1,000개체의 치수가 5개의 성목으로 성장할 수 있다(Lee and Kim, 1989)고 하였다. 구상나무림의 지속적인 유지는 숲의

주연부로의 어린나무의 확장, 숲 내부의 고사목 발생에 따른 숲 내 어린나무의 발생 및 생장으로 숲이 지속된다(Koh et al., 2015). 숲의 확장과 쇠퇴는 다양한 원인에 의해서 발생되어지는 결과이다.

이와 같이 다양한 환경요인들 한라산 구상나무림과 소나무림의 변화에 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 보다 효율적인 영향분석을 위해서는 다양한 요인에 대한 복합적이고 종합적인 분석이 필요하다. 그러나 변화의 원인에 대한 특정 대상을 평가하는데 있어 그 대상을 대표하는 여러 개의 환경요인을 사용하게 되는데, 환경요인을 종합적으로 평가하는 경우에는 요인별 평가비중의 차이로 인한 개연성, 주관성 개입 가능성, 중복평가의 문제, 요인 간의 상대적 중요도의 차이 등에 따른 가중치 반영 방법선정 등에서 상당한 어려움이 따른다.

기존의 지표에 의한 평가 연구에서는 주로 환경영향 평가를 위한 지표 방법(Lee and Yang, 2001)이나 기후변화로 인한 도시 녹지공간의 재해 위험도를 평가(Yu, 2015), 노거수의 보호 및 관리를 위해 노거수 위험인자에 대한 위험도를 평가(Xia and kang, 2017)하는 등 다양한 용도로 사용되고 있었다.

본 연구에서는 침엽수 군락의 쇠퇴와 확장의 원인을 다양한 요인에서 찾고 그 요인에 대한 시간적인 지속성을 지수값으로 적용받아 식생군락의 현재 상태를 알고 향후 확장성과 쇠퇴에 대한 판단의 근거로 제시하고자 하였다. 하지만, 확장과 쇠퇴를 평가하고자 하는 대상을 대표해 주는 정도가 다르고, 그 중요성 또한 상이하여서 이러한 정도를 정량화하기가 난해한 이유가 있다(Lee et al., 2001).

본 연구에서 제시된 환경요인에 지수값을 적용하여 시기별, 지역별, 수종별 확장과 위협을 검증하였다. 한라산 구상나무림의 변화는 강수량과 태풍 등 비생물적 요인이 우세하게 작용하여 위협과 확장에 영향을 주었으며, 시간적인 예측이 상당부분이 일치하였다. 하지만 소나무의 경우 온도, 강수량, 태풍 등 제시된 환경요인의 지수값으로는 위협요인이 우세하게 평가되었다. 이는 수종별로 위협 정도의 차이와 확장 요인으로 작용한 시기, 확장 및 위협요인으로 작용한 다른 요인들의 자료 부족 등의 원인을 소나무의 확장 및 위협을 판단하는데 한계를 지닌 것으로 해석되었다.

이러한 평가는 대상 지역에 대한 한정된 적용시기와 데이터 확보의 한계성 등으로 인해 확장/위협 지수평가에는 한계를 가져올 수밖에 없는 것으로 판단되었다. 그러므로 한라산 침엽수의 시공간적 변화에 대한 원인을 보다 정확하게 규명하기 위

해서는 대상지역에 대한 신뢰성을 갖는 환경요인 측정값의 지속적인 축적과 더불어 생물학적 요인에 대한 모니터링이 병행되면 수종별 특성을 반영한 환경요인과 지수값의 범위가 보다 구체적으로 선정이 되고 확장과 위협요인의 특성을 밝히는데 효과적인 접근방법이 가능할 것으로 판단된다.

V. 종합고찰

우리나라 산림면적의 36.9%가 침엽수로 숲의 구성요소로 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 이들 침엽수들은 기후변화 등 다양한 원인으로 면적 감소와 쇠퇴 현상이 보고되고 있다. 제주도의 경우 산림면적의 24.7%를 침엽수가 차지하고 있으며, 한라산에 자생하는 침엽수는 구상나무, 주목, 눈향나무, 비자나무, 곰솔, 소나무가 있다.

본 연구에서는 한라산의 침엽교목인 구상나무와 소나무를 대상으로 한라산국립공원 구역 내에서 2006년부터 2015년 사이의 시·공간적 변화를 정사영상을 이용하여 개발한 격자기반 면적산출방법으로 수관 밀도별 변화를 조사하였다. 시공간적 변화에 영향을 주는 환경변화 요인으로 비생물적 요인과 생물적 요인으로 구분하여 분석하였다. 이를 통해 한라산 구상나무림과 소나무림에 영향을 미치는 환경요인들은 선정하였고, 위협 및 확장정도를 지수값으로 표현하여 침엽교목림에 미치는 영향에 대한 종합적인 분석을 통해 숲의 현재 위치와 미래 숲의 확장과 쇠퇴로 진행될지에 대한 예측을 해석하였다.

한라산국립공원 내 구상나무림의 2015년 전체 면적은 626.0ha로 조사되었는데, 2006년 738.3ha에 비해 10년 동안 15.2%에 해당하는 112.3ha가 감소하였다. 반면 소나무림은 2015년 1,259.9ha로 조사되었는데, 2006년 1,208.5ha에 비해 10년 동안 4.1%에 해당하는 51.4ha가 증가한 것으로 나타났다.

구상나무림과 소나무림의 변화 특징은 쇠퇴와 확장이다. 구상나무림의 쇠퇴는 기후변화의 원인으로 해발고도에 따라서 저고도 자생지부터 단계별 감소가 아니라, 가장 많이 자생하고 있는 해발고도 1,510m~1,600m 구간에서 전체 감소 면적의 32.6%에 해당되는 대규모 면적변화가 발생되었다. 반면 소나무림의 확장은 기후변화의 원인으로 생육가능한 자생지의 면적이 고지대로 넓어지고 있어 자생지 해발고도가 높아져 주요 생육지의 면적이 증가한 것으로 나타났다.

구상나무림과 소나무림의 확장과 쇠퇴의 현상은 해발고도 뿐만 아니라 방위, 경사, 주요 자생지로도 분석이 되었다. 구상나무림은 해발고도 1,510m~1,700m 사이

구간에 주로 분포하고, 경사는 $11^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 사이 구간에 가장 많이 자생하였는데, 이들 구간에서 쇠퇴가 가장 높게 나타나기도 하였다. 방위별로는 동쪽을 중심으로 북동과 남동 방향으로 가장 넓게 분포하였는데, 남동쪽이 23.4ha가 감소하였으며, 동쪽을 중심으로 남동과 북동의 면적 변화가 전체 면적의 55.5%인 62.3ha가 줄어든 것으로 나타났다. 소나무림은 해발고도 1,010m~1,400m 구간에 가장 넓었으며, 1,100m~1,300m 구간의 면적은 증가하였지만, 수관밀도 등급변화는 조밀도 등급 면적이 대폭 감소하고 중밀도와 소밀도급 면적은 증가하였다. 지표 경사에 따라서는 전체적으로 증가하였다. 방위별로는 남사면을 중심으로 남서와 남동 방향에 56.4%가 분포하여 10년 동안 27.8ha가 증가한 반면 북사면을 중심으로 북동과 북서 면적은 7.6ha가 줄어든 것으로 나타났다.

한라산 지역별 구상나무림의 분포 변화는 진달래밭에서 정상에 이르는 지역이 전체 감소 면적인 117.9ha 중 71.8%에 해당하는 84.6ha가 감소하였으며, 영실등산로 일대가 21.5%인 25.3ha, 큰두레왓 일대는 6.8%인 8.0ha가 줄어든 반면 방애오름 일대는 5.6ha가 증가한 것으로 분석되었다. 소나무림의 분포 변화는 영실 지역 일대가 2006년에 비해 전체 증가 면적 중 49.6%인 25.5ha 증가하였으며, 산벌음 계곡 우측을 포함하는 입석오름 지역은 20.4ha, 죽은드레를 포함하는 개미등 지역은 7.4ha가 증가하지만 속밭 지역은 1.9ha가 감소한 것으로 분석되었다.

한라산 구상나무림과 소나무림의 지역별 주요 자생지에 대한 군락의 생육등급을 수관밀도별 변화 특성과 연륜분석을 통한 평균수령을 적용하여 숲의 확장과 쇠퇴를 제시하였다. 향후 군락에 대한 평가로 인위적 간섭에 대한 결정이 필요할때 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

구상나무림은 지역별 평균수령과 수관밀도 특성변화를 반영하고, 소나무림은 상대적으로 평균수령이 많고 관련 자료가 없어 지역별 수관밀도 특성으로만 생육등급을 5단계로 구분하여 제시하였다. 구상나무림은 개척기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 60년 이하로 어린나무들이 관찰되는 방애오름 일대 백록샘 일부 지역이 해당하며, 도입기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 61년~70년 사이로 숲이 형성되어지는 젊은 숲으로 방애오름 일대 구상나무림이 해당된다. 성장기는 큰두레왓 일대 구상나무림으로 평균 수령이 71년~80년 사이로 수관밀도 등급별로 증가하며 중밀도와 소밀도 면적이 차이가 거의 없으며 소밀도가

중밀도로 상승이 활발하게 이루어지는 단계로 구분하였다. 성숙기에 해당하는 등급은 구상나무 군락의 평균 수령이 81년~90년 사이로 전체적인 면적 감소가 이루어지는 단계로 영실등산로 일대 구상나무림이 해당된다. 쇠퇴기는 평균 수령이 90년 이상으로 수관밀도 등급하락으로 인한 면적이 감소하며, 전체적인 면적 감소가 이루어지는 단계로 왕관릉 등 진달래밭 일대 구상나무림이 해당한다.

소나무림 수관밀도 변화에 따른 생육등급으로, 개척기에 해당하는 소나무 군락은 중밀도와 소밀도 등급이 꾸준히 증가하고 있고, 치수들의 발생이 관찰되고 있는 지역으로 개미등과 입석오름 지역 일부 지역이 해당이 된다. 도입기는 수관밀도 등급 상승이 이루어지고 있는 개미등 지역으로 구분하였다. 성장기는 입석오름 지역으로 수관 확장이 두드러지는 특징을 보이며, 성숙기는 조밀도로의 등급 상승이 계속적으로 이루어지며 상대적으로 소밀도와 중밀도 등급의 면적이 감소되는 단계로 속밭 지역 소나무림이 해당된다. 쇠퇴기 등급은 조밀도와 중밀도 등급의 수관 감소가 일어나 소밀도 등급이 증가하면서 소나무림의 감소가 이루어지는 단계로 영실 지역으로 구분하였다.

한라산의 대표 침엽교목인 구상나무와 소나무를 대상으로 시·공간적인 변화를 분석하였는데, 수관분포 밀도가 11% 이상을 차지하는 전체면적은 2015년은 1,886ha로 나타났다. 2006년의 침엽교목의 전체면적은 2015년보다 60.8ha 많은 1,946.7ha로 나타났다. 이중 소밀도 등급에 해당하는 면적은 860ha로 전체의 44.2%에 해당한다. 중밀도의 경우 703.1ha, 조밀도는 383.6ha로 분석되었다.

한라산의 침엽교목들은 10년 동안 수관밀도 등급이 낮아지고 있으며 수관밀도 11% 이하의 등급제외 밀도로의 진행이 높아지고 있었다. 이는 침엽교목의 생육환경에의 변화가 진행되고 있음을 짐작할 수 있다.

한라산 구상나무와 소나무의 공간변화에 영향을 미치는 환경요인 선정을 위해 전문가 집단 설문을 실시하여 11가지 환경요인을 선정하였고, 선정된 환경요인별 자료를 2000년부터 2015년까지 수집하여 분석하였다. 산림지역의 평균기온은 거의 변화가 없으나, 강수량은 꾸준히 증가하고 있으며, 또한 봄철인 1~2분기의 강수량 증가한 반면, 비산림지역의 경우는 강수량은 감소한 것으로 조사되었다. 기존의 연구 자료는 비산림지역의 기상자료를 사용하여 면적변화를 분석하여 제시한 결과 값이기 때문에 신뢰성에 많은 문제가 있을 것으로 판단된다.

제주지역에 영향을 미친 태풍 중에 어리목과 성관악에서 측정된 3분기 강수량의 3개 최고점은 태풍 내습으로 인한 강수량의 증가로 2002년에 발생한 라마순, 루사와 2007년 나리, 2012년에 발생한 카눈, 덴빈, 볼라벤, 산바가 해당이 된다. 특히 2012년 한해에만 발생한 4개의 태풍은 강풍에 의한 뿌리 흔들림 현상, 집중 강우에 의해 토양유실 등으로 생육 기반을 악화시켰으며, 다음 해인 2013년 3분기 가뭄과 기온상승이 구상나무림의 변화에 강한 영향을 준 것으로 판단된다.

한라산 아고산 지역은 학암포 해안사구와 유사한 일평균 수증기압포차(VPD)를 보이고 있어 높은 습도와 잦은 강수 현상을 보이는 해양성 기후의 영향을 받은 것으로 보인다. 배수가 잘되는 화산회토 토양과 암석위에서 자라는 구상나무와 소나무의 수분공급은 뿌리에서 너무 많은 양의 수분을 올릴 수가 없어 수증기가 포화되어 증산작용이 억제 되는 역할을 수행하여 생육하고 있는 것을 판단할 수 있다.

기후변화 등의 원인으로 한라산 아고산 지역의 평균기온이 상승하고 있으며, 그 결과 생태계의 변화는 지금의 속도보다는 더 빨라 질 것이다. 생육지 환경의 기후적 변화가 기존의 산림 식생대와 식물체의 생육환경에 많은 변화를 주어 결국에는 산림의 균형적인 생태계 천이를 저해하는 큰 요인으로 작용한다(Lee et al., 2008). 이러한 변화의 원인으로 제시된 비생물적 요인뿐만 아니라 생물적 요인들의 변화도 관찰되었으며 그중에 과거에는 보고되지 않던 병과 해충들의 출현으로 위협요인으로 작용하고 있다.

특히 구상나무에 발생하는 스크레로테리스 가지마름병은 북반구의 북유럽지역, 캐나다와 미국 동부지역, 일본 북해도 등, 주로 겨울에 적설량이 많은 지역에서 소나무과 식물에 큰 피해를 주는 중요한 병으로 알려져 있다(Eppo, 2009). 2018년에 한라산에서 병원균이 구상나무 고사지에서 동정되었지만 대규모의 확산에 의한 피해는 발생되지 않았으며, 구상나무 종자발아에 영향을 미치는 한라산의 *Racodium therryanum* 토양균류는 유기물이 발달한 토양에 눈이 덮인 기간이 길수록 구상나무 종자발아에 부정적 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

구과를 가해하는 해충으로 구상나무잎말이나방과 솔알락명나방의 피해가 지속적으로 보고되고 있어 대책이 필요한 것으로 알려지고 있다. 구상나무잎말이나방의 경우 일본지역에서만 서식하는 일본개분비나무를 기주식물로 하는 종으로 알려져 있었지만 2018년부터 계속해서 한라산에서 구상나무 구과에 피해를 주고 있다. 또

한 제주조릿대의 분포 면적이 증가하고 있고, 침엽교목 하층식생을 95% 우점하고 밀도가 높아 뿌리 경쟁이 발생하고 후계림을 이룰 치수의 발생이 이루어지지 못하고 있어 제주조릿대 관리가 시급한 것으로 알려지고 있다. 한라산에 서식하고 있는 야생동물인 노루는 이전의 연구결과에는 구상나무가 먹이선호성에서 낮은 등급이었지만 동계 기온과 적설량이 적어 겨울철에도 아고산 지역에서 겨울을 보내는 노루가 많아져 구상나무 섭식 피해도 발생하고 있다.

Koo와 Kim(2020)은 지난 40년 동안 발표된 구상나무 논문을 분야별, 지역별, 시기별 분석하였다. 구상나무 쇠퇴와 고사에 대한 원인을 분명하게 규명하지 못했고, 개별적이고 분야별로 수행되었기 때문에 종합적으로 분석하는 연구 수행이 필요하다고 하였다.

본 연구에서는 한라산 침엽교목림의 쇠퇴와 확장의 원인을 단일요인으로 판단하기에는 오류와 논란의 소지가 있어 숲의 확장과 쇠퇴를 판단할 때는 주요한 환경요인을 대상으로 수치화하여 판단하는 방식을 개발하여 적용하였다. 한라산에서 발생되어지는 다양한 환경요인들이 식물 군락에는 위협요인으로 작용할지 아니면 생육환경이 좋아서 군락의 확장 및 건전성을 확보하는 요인으로 분석이 될지를 비생물적, 생물적 환경요인으로 11개 항목으로 구분하였다. 위협과 확장 정도를 시간적 개념에서 일시적, 단기적, 장기적 요인으로 구분하여 지수값을 부여하였다. 위협과 확장 정도에 중요한 요인으로 작용하는 항목에 대해서는 가중치를 부여하였다.

구상나무림 면적의 감소가 발생한 위협시기에 지수값의 범위는 위협을 지시하였으며 소나무림의 확장성에 지수값의 범위에 있었다. 또한 최근의 시간적 위치에서의 한라산 침엽교목의 위치에 대한 지수값은 구상나무의 경우 단기적 위협범위에 있으며 소나무는 일시적 위협범위와 단기적 확장범위에 있는 것으로 분석되었다.

식물 군락의 환경요인에 대한 지수값을 적용하여 시기별, 지역별 검증을 통해 한라산 구상나무림의 변화를 지수로 제시되어지는 위협과 확장의 시간적인 예측이 상당부분이 일치하였다. 본 연구에서 제시된 환경요인에 의한 확장과 위협지수 방법은 군락의 쇠퇴와 확장의 위치에 있는 대상 식물의 과거의 자료로 현재와 미래를 알 수 있는 종합적 지표가 될 것으로 판단된다.

VI. 적 요

한라산의 침엽교목인 구상나무와 소나무를 대상으로 한라산국립공원 구역 내 2006년부터 2015년 사이의 시·공간적 변화를 정사영상을 이용하여 격자기반 면적 산출법을 개발하고, 수관 밀도별 변화를 조사하였다. 변화 요인으로 비생물적 요인과 생물적 요인으로 구분하여, 위협 및 확장정도를 지수값으로 표현하여 침엽교목림에 미치는 영향을 시간상으로 분류하였다.

한라산국립공원 내 구상나무림의 분포면적과 수관밀도는 2015년 구상나무림 전체 면적은 626.0ha로 조사되었는데, 2006년 738.3ha에 비해 10년 동안 15.2%에 해당하는 112.3ha가 감소한 것으로 나타났다. 한라산 구상나무림은 해발고도 1,510m~1,700m 구간에 가장 많이 분포하며, 경사는 11°~25° 구간, 동쪽을 중심으로 북동과 남동방위에서 가장 많이 자생하는 것으로 분석되었다. 한라산 구상나무림 수관 밀도별 특성 변화와 구상나무 군락별 평균 수령을 반영하여 생육등급을 5단계로 구분하여, 개척기는 어린나무 생장이 많은 방애오름 일부지역이 해당되며, 도입기는 중밀도 등급의 확장이 두드러지는 방애오름 지역, 성장기는 수령이 71~80년 사이에 해당하는 큰두레왓지역, 성숙기는 중밀도와 소밀도가 감소하는 영실 지역, 쇠퇴기는 전체적인 면적 감소가 이루어지는 진달래밭 지역이 해당된다.

한라산국립공원 내 소나무림의 전체면적은 1,259.9ha로 조사되었는데, 2006년 1,208.5ha에 비해 10년 동안 4.1%에 해당하는 51.4ha가 증가한 것으로 나타났다. 해발고도에 따라서는 2015년에 1,010m~1,400m 구간에서 전체면적의 79.6%인 1,003.0ha로 가장 넓었으며, 수관밀도 등급변화는 조밀도 등급 면적이 대폭 감소한 반면, 중밀도와 소밀도급 면적은 증가하였다. 지표 경사에 따라서는 시간변화와 관계없이 전체적으로 증가하였다. 방위별로는 남사면을 중심으로 남서, 남동방향에 56.4%가 분포하여 10년 동안 27.8ha가 증가한 반면 북사면을 중심으로 북동과 북서면적은 7.6ha가 줄어든 것으로 나타났다. 지역별 소나무림의 분포 변화는 영실 지역 일대가 2006년 이후 10년 동안 전체 증가 면적 중 49.6%인 25.5ha 증가하였고, 산별을 계곡 우측을 포함하는 입석오름 지역은 20.4ha, 죽은드레를 포함하는 개미등

지역은 7.4ha로 증가한 반면 속밭 지역은 1.9ha가 감소한 것으로 분석되었다.

한라산국립공원 내 침엽교목의 시·공간적인 변화는 수관분포 밀도가 11% 이상을 차지하는 전체면적은 2015년은 1,886ha로 조사되었다. 소밀도 등급은 전체면적의 47.8%로 가장 높은 비율을 점유하였으며, 2006년의 침엽교목의 전체면적은 2015년보다 60.8ha 많은 1,946.7ha로 나타났다. 이중 소밀도 등급에 해당하는 면적은 860ha로 전체의 44.2%에 해당한다. 한라산 침엽교목림은 10년 동안 수관밀도 등급이 낮아지고 있으며, 수관밀도 11% 이하의 등급제외 밀도로의 진행이 높아지고 있어 침엽교목의 생육환경 변화가 진행되고 있음을 짐작할 수 있다.

한라산국립공원 내 침엽교목림의 공간변화는 비생물적 환경요인으로 6가지, 생물적 환경요인으로 5가지, 총 11가지 환경요인의 자료를 2000년부터 2015년까지 수집하여 분석하였다. 산림지역의 평균기온은 거의 변화가 없으나, 강수량은 꾸준히 증가하고 있는 것으로 조사되었다. 특히, 봄철인 1~2분기 강수량은 꾸준히 증가한 것으로 분석되었다. 2012년 발생한 4개의 태풍은 강풍에 의한 뿌리 흔들림 현상, 집중강우에 의해 토양유실 등으로 생육 기반을 악화시켰으며, 다음해 2013년 3분기의 고온과 가뭄이 구상나무림의 변화에 강한 영향을 준 것으로 판단된다.

성판악, 진달래밭, 선작지왓의 일 평균 수증기압포차(VPD)는 2.61hPa로 한라산 아고산지역은 해양성 기후의 영향을 받는 것으로 판단된다. 구상나무가 적정 생육 가능한 일사량의 범위 평균 일사량이 약 1,380kWh/m²·year이고 최소 500kWh/m²·year에서 1,600kWh/m²·year로 제시하였다. 한라산 침엽교목림 토양의 pH는 4.50으로 전반적으로 산성을 나타내었으며, 평균 유기물 함량은 22.23%로 조사되었다. 전 질소 함량은 평균 함량은 0.69%로 나타났으며, 구상나무림은 0.79%, 소나무림은 0.58%였다. 한라산 침엽교목림의 유효인산은 평균 13.41mg/kg로 조사되었다. 양이온치환용량(CEC)은 한라산 침엽교목림의 평균값은 26.23cmol⁺/kg이며, 구상나무림은 40.98cmol⁺/kg, 소나무림은 11.48cmol⁺/kg로 나타났다. 치환성양이온의 함량은 Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺>Na⁺의 순으로 분석되었다.

한라산 침엽교목에 발생하는 병해는 시들음병, 흑병, 잎떨림병, 가지마름병, 잎마름병, 종자발아에 영향을 미치는 토양균류 등이 있으며, 해충은 솔나방, 솔잎혹파리, 솔껍질깍지벌레, 솔수염하늘소, 북방수염하늘소, 나무좀류, 솔알락병나방, 잎말이나방 등이 있었다.

한라산국립공원 내 전체면적 153km²의 95%에 해당하는 146km²에 제주조릿대가 분포하고 있으며, 한라산 침엽교목림 분포지역에 대한 제주조릿대 하층 분포는 2006년에 95.6%, 2015년에 96.4%로 거의 침엽교목 하층식생을 제주조릿대가 우점하고 있는 것으로 조사되었다. 제주조릿대 밀도가 높아 뿌리 경쟁이 발생하고 후계림을 이룰 치수의 발생이 이루어지지 못하고 있어 제주조릿대 관리가 시급한 것으로 보인다.

야생동물인 노루 섭식에 의해 구상나무가 12.1%의 피해가 발생하고 있으며, 설치류의 피해는 조사가 되지 않았지만, 제주등줄쥐는 한라산 해발 1,700m 고지 구상나무림에 높은 밀도로 서식하고 있어 피해가 예상된다.

숲이 유지되기 위해서는 고사목보다 치수 발생이 많아야 하지만, 영실 소나무림의 상층은 소나무가 우점하고 있으나 어린 소나무 발생이 없는 것으로 보고되었다..

침엽교목림이 시·공간적인 변화 중 균락의 면적 감소나 증가 등으로 영향을 미치는 비생물적, 생물적 환경요인으로 11개 항목으로 구분하였다. 위협과 확장정도를 시간적 개념에서 일시적, 단기적, 장기적 요인으로 구분, 지수값을 부여하였고, 위협과 확장정도에 중요한 요인으로 작용하는 항목에 대해서는 가중치를 부여하였다. 이는 한라산 침엽교목림의 쇠퇴와 확장의 원인을 단일요인으로 판단하기에는 오류와 논란의 소지가 있어 숲의 확장과 쇠퇴를 판단할 때는 주요한 환경요인을 대상으로 수치화하여 판단하는 방식을 개발하여 적용하였다.

구상나무림 면적의 감소가 발생한 위협시기에 지수값의 범위는 위협을 지시하였으며 소나무림의 확장성에도 지수값의 범위에 있었다. 또한 최근의 시간적 위치에서의 한라산 침엽교목의 위치에 대한 지수값은 구상나무의 경우 단기적 위협범위에 있으며 소나무는 일시적 위협범위와 단기적 확장범위에 있는 것으로 분석되었다.

이러한 확장/위협 지수평가는 대상지역에 대한 신뢰성을 갖는 환경요인 측정값의 지속적인 축적과 더불어 생물학적 요인에 대한 모니터링이 병행되면 침엽수의 확장과 위협요인의 특성을 밝히는데 효과적인 접근방법이 가능할 것으로 판단된다.

VII. 인용문헌

- Ahn, U.S., Kim, D. S., Yun, Y.S., Koh, S.H., Kim, K.S., and Cho, I.S. 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, Vol. 21, No. 1, pp1-28.
- Ahn, U.S. and Yun, Y.S. 2020. Causes of Decline in the Korean Fir Based on Spatial Distribution in the Mt. Halla Region in Korea: A Meta-Analysis. Forests, 11(4), pp391.
- Altman J., J. Dolezal., T. Cerny and J.S. Song. 2012. Forest response to increasing typhoon activity on the Korean peninsula: evidence from oak tree-rings. Global Change Biology. 19(2): pp498-504.
- Bae, Y.S., Byun, B.K. and Paek, M.K. 2008. Pyralid moths of Korea (Lepidoptera: Pyraloidae). Pocheon. Korea National Arboretum, Seoul.
- Bergman. M, G. R. Iason, A. J. Hester. 2005. Feeding patterns by roe deer and rabbits on pine, willow and birch in relation to spatial arrangement. Oikos.109(3):pp513-520.
- Cho, H.Y., T. Mamoto, T. Kunihide, S.G Hong and J.J. Kim. 2007. Damage to *Abies koreana* seeds by soil-borne fungi on Mount Halla, Korea. Canadian Journal of Forest Research; 37, 2; ProQuest Central Basic pp371.
- Cho, M.K. 2014. Change of Vegetation Structure and Pattern of Annual Ring Growth of *Abies koreana* E. H. Wilson Forest in Mt. Jirisan. Ph. D. Dissertation, Gyeongsang National Univ. Gyeongsangnam-do, pp100.
- Choi, K.Y. 2012. Variability of temperature lapse rate by slope and altitude of Mt. Halla. Proceedings of the Korean Geographical Society Conference, pp142-145.
- Choi, K.Y. 2016. Present and Future Climate Changes in the Four Seasons of the Hallasan Region. Proceedings of the Conference of the Korean Regional

- Geographical Society, pp51-54.
- Choi, M.H and Yun, J.I. 2009. On Recent Variations in Solar Radiation and Daily Maximum Temperature in Summer. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 11, No. 4, pp185-191.
- Choo, H.Y. and Woo, K.,S. 1989. Four New Species of Scolytidae (Coleoptera) from Korea. KOREAN JOURNAL OF APPLIED ENTOMOLOGY V28(2): pp57-60.
- Chung, J.M. 2013. Correlation Analysis and Growth Prediction between Climatic Elements and Tree Diameter Growth for Coniferous Species in South Korea Graduate School, Kookmin University.
- EPPO. 2009. *Gremmeniella abietina*. EPPO Bulletin 39, pp310-317.
- Forest Service. 2021. 2020 Basic Forest Statistics.
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and Climate. Academic Press Inc. (London) Ltd. 567pp.
- Grange, R.I. and D.W. Hand, 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. Journal of Horticultural Science 62(2), pp125-134.
- Hallasan National Park management Office. 1998. Measures to protect excellent pine trees in Hallasan National Park. p10.
- Hallasan Research Institute, Jeju Special Self-Governing Province. 2013. 2012 Hallasan National Park Natural Resources Survey (soil) pp351-392.
- Han, S.H., Kim, D.H., Kim, G.N. and Yoon, C.W. 2012. Conifer lifespan, photopigment and nitrogen distribution characteristics of spruce trees in Korea. Journal of the Korean Forestry Society 101(1): pp62-68.
- Heo, G.Y. 2004. Korean Folklore and Pine Trees, Our People's Life and Pine Trees, pp23-33.
- Hyun, H.N. 2006. Soils in Hallasan National Park. Report of Survey and Study of Hallasan Natural Reserve 2006. Research Institute for Mt. Halla, Jeju, pp. 87-108.

- Im, H.T. 1992. Plant geographical study for the plant of jeju.kor. J. Plant taxon.22(3): pp219-234.
- Jang, R.H., K.T. Cho and Y.H. You. 2014. Annual biomass production and amount of organic carbon in *Abies koreana* forest of subalpine zone at Mt. Halla. Kor. J. Environ. Ecol.28(6): pp627-633.
- Jeju Special Self-Governing Province Hallasan Research Institute. 2007. Korean Fir in Mt. Halla.
- Jeju Special Self-Governing Province Hallasan Research Institute. 2013. The Natural Resources Research in Mt. Hallasan.
- Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Office. 2019a. Basic scientific research on Mt. Hallasan Nature Reserve.
- Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Office. 2019b. Jeju roe deer behavioral ecology and management.
- Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Office. 2018. A Study for Management System of *Sasa quelpaertensis*.
- Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Office. 2020. A Study for Management System of *Sasa quelpaertensis*.
- Jeju Special Self-Governing Province. 2006. Jeju Forest 60 Years History.
- Jeju Special Self-Governing Province. 2017. Mt. Hallasan National Park Precision control strategy to prevent the spread of pine wilt disease. Hallasan National Park Management Office. pp63-72.
- Jeon, S.B. 2013. The Natural Resources Research in Mt. Hallasan. Jeju Special Self-Governing Province Hallasan Research Institute. pp. 284-301.
- Jeon, Y.W. 1993. Pine and our culture. Sumun Publishing House. pp205.
- Jeong, J.Y., Koo, G.S., Lee, C.H. and Kim, C.S. 2002. Regional Physicochemical Characteristics of Forest Soils in Korea. Journal of the Korean Forestry Society

91(6): pp694-700.

- Jeong, T.H., Do, B.C., Lee, D.B. and Lee, H.J. 1937. Chosun Botanical Hyangmyung Collection. Korean Museum Research Association.
- Jin, H.O., Lee, M.J., Shin, Y.O., Kim, J.J. and Jeon, S.G. 1994. Forest Soilology. Hyangmunsa. pp156-185.
- Kang, S.J. 1984. Regeneration Process of Subalpine Coniferous Forest in Mt. Jiri Journal of Ecology and Environment 7(4): pp185-193.
- Kim C.S., S.W. Lee and J.G. Koh. 2007. Korean Fir in Mt. Halla. Jeju Special Self-Governing Province Hallasan Research Institute.
- Kim Y.S., Chang C.S. and Kim C.S, Gardner M. 2011. *Abies koreana*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- Kim, C.S. 2006. Characteristics of Distribution and Taxonomy of *Abies koreana*. Report of Survey and Study of Hallasan Natural Reserve 2006. Research Institute for Mt. Halla, Jeju, pp451-471.
- Kim, D.G. and Oh, J.G. 2016. Analysis of the location of sub-alpine *Abies koreana* forests in national parks using GIS-For *Abies koreana* - Ecology and environment 49(3) pp236-243.
- Kim, D.S., Lee. Y.D., Jwa, M.E. and Nam, Y.W. 2020b. Occurrence status of cone insects on Korean fir (*Abies koreana*) in Mt. Halla Journal of the Korean Society of Applied Entomology 59(4) pp417-420.
- Kim, E.S. 1994. Decline of tree growth and the changes of environmental factors on high altitude mountains .The Korea Science and Engineering Foundation Research Report KOSEF921-1500-081-2, pp89.
- Kim, E.S., H.B. Cho, D.Y. Heo, N.S. Kim, Y.S. Kim, K.S. Lee, S.H. Lee and J.H. Ryu. 2019. Precision monitoring of radial growth of trees and micro-climate at a Korean fir(*Abies koreana* Wilson) forest at 10 minutes interval in 2016 on Mt. Hallasan National Park, Jeju Island, Korea. J. Ecol. Environ. 43(1): pp23.

- Kim, G.N., S.H. Han and G.S. Park. 2014. Differences on Growth, Photosynthesis and Pigment Contents of Openpollinated *Pinus densiflora* Families Under Elevated Temperature and Drought. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 16(4): pp228-1859.
- Kim, G.T. and G.C. Choo. 2000. Comparison of growth condition of *Abies koreana* Wilson by Districts. J. Ecol. Environ. 14 (1): pp80-87.
- Kim, G.T., Choo, G.C. and T.W. Um. 2007. Studies on the structure of *Abies koreana* Community at Subalpine Zone in Hallasan. Kor. J. Env. Eco. 21(2): pp161-167.
- Kim, H.J. 2016. Community Structure of Arthropods inside Korean Fir (*Abies koreana*) Snags on Mt. Halla National Park, Jeju Island, Korea. Department of Biology The Graduate School of Seoul Women's University.
- Kim, H.J., Yang. H.M., Jin. G.Z., Lee. W.S. and Kang. S.K. 2001. The Aspect of Natural Regeneration for Major Tree Species in the Natural Deciduous Forest. Journal of Forest Science Vol.17.
- Kim, H.S., Lee, S.M. and Song, H.K. 2010. A study on the vegetation structure around Hyangjeokbong Peak in Deogyusan National Park. Journal of the Korean Society of Environmental Ecology 24(6); pp708-722.
- Kim, J.E. and Kim, M.H. 2001. Study on the Native Plants Preferably Fed by the Roe Deer(*Capreolus pygargus tianschanicus*) in Mt. Halla. The Journal of Basic Science Jeju National University. Vol.14 No.1.
- Kim, J.G., J.G, Koh, H.T. and 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). pp549-556.
- Kim, J.G., J.G, Koh, H.T. and Yim, D.S, Kim. 2019. Changes of Spatial Distribution of Korean Red Pine Forest in Hallasan National Park. Korean Journal of Environment and Ecology 33(5). pp578-586.
- Kim, J.W. and B.K. Choi. 2012. Discovering the essence of the Korean vegetation for

- field excursion. Seoul: World Science.
- Kim, K.M., Kim, C.M. and Jun, E.J. 2009. Study on the Standard for 1:25,000 Scale Digital Forest Type Map Production in Korea. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. v.12, no.3, pp143-151.
- Kim, K.S., Han, S.P., Yang, S.N., Yang, S.H. and Ko, J.G, 2020a. A Study on the Conservation Power of the Hallasan *Abies koreana* - Identification of the Cause of Decline through the Age Analysis of Dead Trees-. Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Headquarters Research Report No. 19: pp397-409.
- Kim, M.H., Shin, H.G. and Han, G.J. 1982. A Plant Sociological Study of Forest Vegetation in Jeju Island: 1. On the Natural Forest of Pine Trees, Jeju National University Proceedings 14: pp129-138.
- Kim, N.S. and H.C. Lee. 2013. A Study on Changes and Distributions of Korean Fir in Sub-Alpine Zone. J. Korean Env. Res. Tech. 16(5): pp49-57.
- Kim, T.G., Cho, Y.H., and Oh, J.G. 2015. Prediction Model of Pine Forests' Distribution Change according to Climate Change. The Korean Society of Limnology. 48(4): pp229-237.
- Kim, T.M., W.K, Lee, S.E. Jong, H.B. Kwak. 2008. Analysis of relationship between spatial distribution of *Pinus densiflora* and topographical factors. The Journal of GIS Association of Korea 16(3). pp359-372.
- Ko, S.H. and T.W. Kang. 2013. Soil. The Natural Resources Research in Mt. Hallasan. Jeju Special Self-Governing Province, Hallasan Research Institute. pp87-103.
- Koh, J.G. 2013. Vegetation. The Natural Resources Research in Mt. Hallasan. Jeju Special Self-Governing Province, Hallasan Research Institute. pp87-103.
- Koh, J.G., Kim, D.S., Kim, J.G. and Koh, Y.J. 2015 Growth status of Mt. Hallasan *Abies koreana* forest, Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Hallasan Research Institute Research Report No. 14.
- Koh, J.G., Kim, D.S., Koh, S.C. and M.H. Kim. 1996. Dynamics of *Abies koreana*

- Forests in Mt. Halla. Society for Jeju Studies. No.13: pp223-241.
- Koh, J.G., Kim, J.G. and Koh, Y.J. 2017. Changes in tree distribution characteristics in the Long-Term Ecology Research Center of the pine forest in the Yeongsil area of Mt. Halla over the past 8 years. Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Headquarters Research Report No. 16.
- Koh, S.H., Koh, J.G., Lee, C.H., Kim, C.S. and Hyeon, H.N. 2010. Soil characteristics by major clinical trials in Hallasan Long-Term Ecology Research Journal. Proceedings of the Korean Society of Environmental Ecology 20(2): pp204-207.
- Kong, W.S. 2004. Species Composition and Distribution of Native Korean Conifers. Journal of the Korean Geographical Society 39(4). pp528-543.
- Kong, W.S. 1998. The distributional patterns of alpine plants of Mt. Halla, Cheju Island, Korea. J. Korean Geogr. Soc. 33(2): pp191-208.
- Kong, W.S. 2006. Biogeography of Native Korean Pinaceae. Journal of the Korean Geographical Society 41(1): pp73-93.
- Kong, W.S., Kim, K.O., Lee, S.G., Park, H.N. and Cho S.H. 2014. Distribution of high mountain plants and species vulnerability against climate change. J Environ Impact Assess ,23: pp19-36.
- Koo, K.A. and D.B. Kim. 2020. Review forty-year studies of Korean fir (*Abies koreana* Wilson). J. Ecol. Environ. 34(5): pp358-371.
- Koo, K.A., J.U. Kim, W.S. Kong, H.C. Jung and G.H. Kim. 2016. Projecting the potential distribution of *Abies koreana* in Korea under the climate change based on RCP scenarios. Kor. J. Env. Res. Tech. 19(6): pp19-30.
- Koo, K.A., W.K. Park and W.S. Kong. 2001. Dendrochronological analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea: Effect of climate change on the growths. Kor. J. Ecol. Environ. 24(5): pp281-288.
- Korea Forest Research Institute. 1999. Pine, Pine Forest. pp22.
- Korea Forest Research Institute. 2012. Economic tree, *Pinus densiflora*. pp250.

- Korea Forest Service. 2014. Statistical annual report of Forestry sector. pp496.
- Korea Forest Service. 2016. 2015 Forest Basic Statistics Forest Service. pp33.
- Korea Forest Service. 2021. Basic Forest Statistics for 2020. pp28.
- Korea Metrological Administration (<https://www.weather.go.kr>).
- Korea National Arboretum. 2014. Forest of Korea(I). Conservation of Korean fir (*Abies koreana*) in a changing environment. Sumeunkil Pub. Co., Korea.
- Korea National Park Service (KNPS). 2014. Developing Monitoring System for Assessing The Impact on Ecosystem according to Climate Change.
- Kwon, J.O. 2003. A study on the application of the ecological evaluation for the nature-friendly residential site development planning. PhD Dissertation Seoul University, Seoul, Korea.
- Kwon, M.J. 2006. A study on the cause of the decline of the *Abies koreana* community in Mt. Halla. University of Seoul Graduate School Master's Thesis.
- Laiju, N.D. Otieno, E.Y. Jung, B.R. Lee, J. Tenhunen, J.H. Lim, J.H. Sung, and S.K. Kang, 2012: Environmental controls on growing-season sap flow density of *Quercus serrata* Thunb in a temperate deciduous forest of Korea. Journal of Ecology and Field Biology 35(3), pp213-225.
- LaMarche, V.C., D.A. Jr. Graybill., H.C. Fritts, and M.R. Rose, 1984: Increasing atmospheric carbon dioxide. Tree ring evidence for growth enhancement in natural vegetation. Science 225, pp1019-1021.
- Larsen C.P.S., and G.M. Macdonald. 1995. Relations between tree-ring widths, climate, and annual area burned in the boreal forest of Alberta. Canadian Journal of forest research 25(11): pp1746-1755.
- Lee, C.S. and Kim. H.E. 1989. Ecological Study for Natural Regeneration by Selfsown of *Pinus densiflora* Forest. Agricultural Science Research Institute Vol.7 No. 2.
- Lee, C.S., J.H. Kim, H. Yi and Y.H. You. 2004. Seedling establishment and regeneration

- of Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) forests in Korea in relation to soil moisture. *Forest Ecology and Management* 199: pp423-432.
- Lee, C.S., W.K, Lee, J.H, Yoon and C.C, Song. 2006 Distribution Pattern of *Pinus densiflora* and *Quercus Spp.* Stand in Korea Using Spatial Statistics and GIS. *Journal of the Korean Forest society* 95(6). pp663-671.
- Lee, D.G., Kim,Y.S., and Shin, H.T. 2011. Environmental and Ecological Characteristics of *Ilex crenata* var. *microphylla* Max. Subpopulations Habitats in the East-West Slopes in Mt. Halla National Park. *Journal of the Environmental Sciences.* 25(4): pp562-572.
- Lee, G.G. and Yang, B.E. A Determinant Model for Methods to Calculate the Weighted Value of Each Indicator for Environmental Evaluation. *Journal of Environmental Impact Assessment.* V10(1) pp59-71.
- Lee, J.H. 2006. Pine Culture in Korea, *Journal of Environmental Society of Korea*, 10(1), pp226-233.
- Lee, J.W., Choi, I.J., Lee, S.H., Lim, W.T., Kim, J.W. and Kang, S.Ho. 2019. A Study on the Occurrence of Seedlings and Saplings of Korean fir(*Abies koreana* E.H. Wilson) on the East slope of Mt. Hallasan National Park. *The Korean Journal of Plant Resources.*
- Lee, K.J. 1993. *Tree Physiology.* Seoul National University Publishing Department pp504.
- Lee, K.J., C.H, Ryu and S.H, Choi. 1992. The Structure of Plant Community On Orimok, Yongsil and Donnaeko Area in Mt. Halla. *Korean Journal of Environment and Ecology* 6(1). pp25-43.
- Lee, N.Y. and Choi, I.Y. 2013. Seasonal Changes in Micrometeorological Factors of a Costal Sand Dune Grassland Ecosystem in Hakampo, Taeanhaean National Park, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 15, No. 1, pp 9-16.

- Lee, S.C., Hong, S.H., Kim, D.P., Choi, S.H. and Ahn, M.Y. 2018. A Study for Growth Density on the *Pinus thunbergii* and *Pinus densiflora* Communities in area of Busan, Korea Korean J. Environ. Ecol. 32(2): pp215-224.
- Lee, S.T., Park, M.S., Jun, H.M., Park, J.Y. and Cho, H.S. 2008. The Effects of Climatic Factors on the Tree Ring Growth of *Pinus densiflora*. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 10, No. 4, pp177-186.
- Lee, T.B. 1970. *Abies koreana* and Its New Forms Discovered. Journal of Korean forestry society 10: pp5-6.
- Lee, Y.W. and Hong, S. C. 1995. Ecological studies on the vegetation characteristics of the *Abies koreana* forest, J. Korean For. Soc., 84, pp247-257.
- Lee, Y.D. 2012. Spatial and Temporal Distribution of Coleopteran Insects in Halla Mountain, Jeju. Jeju National University Graduate School (Master).
- Lee, E.Y. 2013. A Study on the Changes of Vegetation Structure of the *Pinus densiflora* S. et. Z Forest in Yeongsil, Hallasan Mountain National Park for Twenty-two Years(1990~2012), Korea Department of Landscape Architecture Graduate School of Urban Science University of Seoul.
- Lim, J.H., S.Y. Woo, M.J. Kwon, J.H. Chun and J.H. Shin. 2006. Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean fir in Mt. Halla. J. Korean For. Soc. 19(4):pp415-425.
- Lim, K.B. 1985. Fundamental of Silviculture. Hayngmoon Press. pp 327.
- Ma, S.G. 1999. Pine trees are disappearing - Pine trees and our culture. Sumun Publishing House, pp205.
- Moon, H.S. 2001. A study on the structure of forest vegetation in the sub-alpine regions of Deogyusan. Agricultural Life Science Research 35; pp47-54.
- Murray, F.W. 1967. On the Computation of Saturation Vapor Pressure. Journal of Applied Meteorology 6(1), pp203-204.
- Na, S.H. 2020. Species diversity and dynamic pattern of spatio-temporal changes of

- Macro-moths on Mt. Hallasan National Park, South Korea. Department of Biology Graduate School of Mokpo National University.
- Na, Y.N., Kim, Y.H., Kim, S.G., So, J.I. and Kwon. Y.D. 2007. Outbreak of Scleroderris canker of Korean Pine(*Pinus koraiensis*) in Korea. Korea Forestry Society Summer General Conference Academic Presentation. pp53-56.
- Nam, J.W. 2014. The Study for the Community Structures of the Korean Fir(*Abies koreana*) Deadwooddwelling Beetles on Mt. Halla National Park, Jeju Island, Korea. Department of biology The Graduate School of Seoul Women's University.
- National Forest Science Academy. 2020. Living Area Tree Pest Encyclopedia.
- National Institute of Ecology. 2017. Study on the management and conservation of sensitive ecosystems to climate changes : threats and conservation of *Abies koreana* in the subalpine ecosystems.
- National Institute of Ecology. 2018. Insect pests of urban trees and shrubs.
- Oh, J.G. 2013. The Natural Resources Research in Mt. Hallasan. Jeju Special Self-Governing Province Hallasan Research Institute. pp195-228.
- Park, H.C., J.H. Lee, G.G. Lee and G.J. Um. 2015. Environmental features of the distribution areas and climate sensitivity assessment of Korean fir and Khinghan Fir. J. Environ. Impact Assess. 24(3): pp260-277.
- Park, I.H. and Kim, G. D. 1986. Forest structure, biomass, and net production in a natural forest ecosystem at Mt.Baekun Area, J. Korea For. Ener., 6, pp1-45.
- Park, J.C., Choi, K.J. and Song, S.H. 2014. Prediction of Drought by Slope and Elevation of Jeju Island according to Future Climate Change Korean Society of Environmental Sciences 23(4) pp549-660.
- Park, J.H. 1990. Phytosociological study on the *Abies koreana* forest in Banyabong of Mt. Chiri, Korea. Master's Thesis, Chung-Ang University, Seoul, Korea.
- Park, W.K. and J.W. Seo. 1999. A dendroclimatic analysis on *Abies koreana* in Cheonwang-bong area of Mt. Chiri, Korea. Kor. J. Quaternary Research 13(1):

pp25-33.

- Peterson, M.R. and H.Strand gaard. 1994. Individual variation in food intake among Danish roe deer (*Capreolus capreolus*). Proceedings of the 2nd European Roe Deer Meeting, 27-30, Brixen, South Tyrol, Italy, pp69-76.
- Rural Development Administration, Agricultural Science and Technology Institute. 2000. Soil and Plant Analysis Methods. pp35-131.
- Seo, D.J., Oh, C.Y., Woo, K.S. and Lee, J.C. 2013. A Study on Ecological Niche of *Pinus densiflora* Forests according to the Environmental Factors. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 15(3): pp153-160.
- Seo, J.W., Choi, E.B., Park, J.H., Kim, Y.J. and Lim, H.I. 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(9), pp1135.
- Seo, J.W., Kim, Y.J., Choi, E.B., Park, J.H. and Kim, J.H. 2019. Investigation of death years and inter-annual growth reduction of Korean firs (*Abies koreana*) at Yeongsil in Mt. Halla. Kor. J.Env. Res. Tech. 22(3): pp1-14.
- Shin, J.S. 1978. Composition and Genesis of Volcanic Ash Soils derived from basaltic material in in Jeju Island(Korea), Ph.D. Thesis. State Univ.of Ghent, Belgium.
- Shin, M.Y., Jeong, S.J. and Lee, D.K. 2001. The relationship between microclimate estimation and diameter growth by location type of natural broadleaf forests - Focusing on national forests in Pyeongchang, Gangwon-do. Journal of the Korean Society for Agricultural and Forestry Meteorology 3(1): pp44-54.
- Shin, Y.M., J.W. Nam, D.K., Kim, B.K. Byun and I.K. Kim. 2018. Two lepidopteran pests and damage on the cones of *Abies koreana*(Pinaceae) in Jeju Island, Korea. J. Asia-Pacific Biodiversity 11(1): pp80-86.
- Sin, H.G. 1981. Ecological Studies on *Pinus densiflora* S. et Z Communities in Mt. Halla, Korea. Univ. of Jeju National, Jeju, pp12-15.
- Song, K.M. 2011. Vegetation Structure and Dynamics of *Abies koreana* Forests on

- Mt. Halla. Ph. D. Dissertation, Univ. of Jeju National, Jeju, pp96.
- Song, K.M., C.S. Kim, J.G. Koh, C.H. Kang and M.H. Kim. 2010. Vegetation Structure and Distributional Characteristics of *Abies koreana* Forests in Mt. Halla. Journal of the Environmental Sciences. 19(4): pp415-425.
- Song, K.M., C.S. Kim, M.O. Moon and M.H. Kim. 2012. A Change and Distribution in *Pinus densiflora* Forest of Mt. Hallasan. Journal of the Environmental Sciences. 21(1): pp41-47.
- Song, K.M., Kim, J.H. and Choi, H.S. 2020. Growth Changes in *Abies koreana* Seedlings of the Hallasan Mountain Over a 10year Period. Journal of Environmental Science International. 29(3); pp209-218.
- Song, K.M., Kim, J., Kang, Y.J., Choi, H.S., Jung, S.C., Lee, S.Y., Lee, J.H., Koh, J.G., Kim, J.G., Lee, K.H., Hong, Y.P., Lm, J.H. and C.S. Kim. 2016. Korea Fir Hallasan Mountain, Why Are They Dying?. National Institute of Forest Service.
- Song, K.M., Y.J. Kang and H.J. Hyeon. 2014. Vegetation Structure at the Slope Direction and Characteristics of Seedlings of *Abies koreana* in Hallasan Mountain. Journal of Environmental Science International 23(1): pp39-46.
- Suzuki, S. and Komai, F. 1984. Microlepidoptera feeding on conifer trees in Hokkaido. Bull. Forest. Exp. Stn. 22, pp85-129.
- Toshiya, Y. 2019. An international symposium material book for the preparation of a conservation strategy for Mt. Hallasan *Abies koreana*.
- Uhm, K.B. 1962. Altitudinal zones of Mt.Halla according to Coniferac distribution. Kor. Jour. Bot. V(2):pp17-20.
- Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do. 2015. Pine Tree Humanities Dictionary. pp18.
- Wildi, B, and C. Lutz.1996. Antioxidant composition of selected high alpine plant species from different altitudes. Plant Cell and Environment 19: pp138-146.
- Xia, T.T. and Kang, T.H. 2017. The Evaluation Indexes' Selection of the Degree of Danger from Big and Old Trees. J. KILA. Vol 45(4) pp54-61.

- Yamazaki, T. 1983. Outline of Biology (Higher Plants A1). Nakayama sho. Tokyo. pp79-96.
- Yim, Y.J., Park, K.S. and Lee, N.J. 1990. The Vegetation of Mt.Halla. Chung-Ang Univ.Press, Seoul. pp291.
- Yoon, Y.S., Ahn, W.S. and Kim, D.S. 2021. Establishment of Jeju Island Natural Resources GIS. Jeju Special Self-Governing Province World Heritage Headquarters Research Report No. 20.
- Yoshioka, K. 1973. Plant Geogeaphy. Konglip Publishing Co. Tokyo. pp10-19.
- Youn, J.H. 2003. Characteristics and change prediction of spatial distribution of *Pinus densiflora* stands in Korea : Emphasis on impacts of topography, climate, and soil factors. Dissertation for the Degree of Doctor, the Graduate School University of Korea, pp4.
- Yu, J.E. 2015. A Study on Disaster Risk Assessment in the Urban Open Spaces. J. KILA. Vol 43(5) pp13-27.
- Yunyun Li, Hongyan Liu, Xinrong Zhu, Yongyu Yue, Jiabin Xue, Liang Shi. 2021. How permafrost degradation threatens boreal forest growth on its southern margin. Science of the Total Environment 762: pp143-154.
- Zahner, R. 1968. Water deficits and growth of trees, in Water deficits and Plants growth, T.T. kozlowski, ed., Academic Pree, New York. Vol 2, pp191-254.
- Zhang D., Katsuki T. and Rushforth K. 2013. *Abies sachalinensis*. The IUCN Red List of Threatened Species: e.T42298A2970610. Available at: <https://doi.org/>.
- Zobel. B.J. and J.P.van Buijtenen. 1989. Wood variation : Its Causes and Control. Springer Verlag. Berlin.
- 河田. 1989. 森林土壤學原論. 友社. pp399.

감사의 글

2013년 8월 무더웠던 여름날 제주도와 한라산을 불혹의 나이에 마주한 첫 만남으로 시작하여 어느덧 또 다른 시작점에 도착하였습니다. 지금의 저를 이 자리에 있게 한 것은 많은 분의 격려와 관심으로 열매를 맺을 수 있어 감사를 전합니다.

먼저 항상 용기와 격려로 참된 배움의 결실을 얻을 수 있도록 지도해 주신 김동순 교수님께 깊은 감사와 존경의 마음을 전하고 싶습니다.

또한 본 논문을 위해 바쁘신 일정에도 불구하고 세심히 심사해주시고 지도해 주신 전용철 교수님과 항상 관심과 격려해주신 김주성 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 부족한 논문을 심사를 맡아 끝까지 논문이 완성되기까지 부족한 저를 이끌어주신 고정균 과장님과 논문의 완성도를 위해 격려와 조언을 해주신 난대아열대 이광수 박사님께 감사의 마음을 전합니다. 학사 일정을 챙겨준 이종훈, 이희선 선생님께도 감사 드립니다.

한라산과 인연으로 직장과 학위과정을 마칠 수 있도록 격려와 응원을 해주신 신창훈 부장님, 늘 곁에서 연구의 방향성과 고민을 같이 해주신 김대신 과장님께 감사 드립니다.

응원과 조언을 해주신 오장근 박사님, 윤영석 박사님, 안웅산 박사님, 현장 조사와 사무실 업무를 도와주신 김수경님, 정현미님, 송영기에게 감사의 마음을 전합니다. 연구 업무를 같이 고민해주신 한태완연구사님, 고석형 박사님, 양승훈연구사님, 전용문 박사님, 김권수연구사, 이영돈연구사, 한승필연구사와 영문 번역에 도움을 주신 장광섭팀장님께도 감사의 마음을 전합니다.

공간정보라는 새로운 분야에 도전할 수 있게 도움을 준 대학 동기 임형택 사장에게도 감사의 마음을 전합니다. 또한 공직생활과 한라산을 가르쳐 주신 고윤정주사님과 휴일이면 한라산의 모든 것을 공유해주신 부재윤팀장님께도 이 자리를 빌려 감사의 인사를 드립니다.

항상 조언과 격려로 학위과정에 도움을 주신 한정우과장님, 한라생태숲에서 생태이야기를 연재하는 고유경과 산림휴양과 직원들께도 감사의 마음을 전합니다.

아울러 학위과정을 하면서 같은 시간을 보낸 곤충학 실험실분들에게도 감사를 드립니다.

또한 한라산연구부와 세계유산본부 직원분들 모두에게 고마움을 전하며 저를 이 자리까지 오게 해주신 모든 분에게 다시 한번 고개 숙여 감사 인사 전합니다.

못난 아들을 그리워 하며 하늘로 가신 아버지, 늘 한결같은 사랑으로 걱정하시는 어머니, 그리고 항상 믿어주시고 힘이 되어주신 조치원 부모님 사랑합니다.

늘 응원과 격려해주는 막내누야, 형, 삼천포 가족들과 힘든 시간을 보내고 있는 형님과 처형, 농사일에 힘든 조치원 가족들에게 감사와 사랑의 마음을 전합니다.

마지막으로 금강석처럼 단단하게 자라는 제주 아이 강이와 뭐든 하고 싶고 갖고 싶은 것이 많은 밤뜰 율이, 늘 옆에서 힘이 되어준 사랑하는 아내 홍선애에게도 깊은 고마움과 사랑을 전합니다.