



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](#)

농학박사학위논문

제주지역 곰솔림의 임분관리에 관한 연구

박 길 동

강원대학교 대학원

산림경영학과

2016년 2월

최정기 교수지도
농학박사학위논문

제주지역 곰솔림의 임분관리에 관한 연구

Studies on Forest Stand Management of *Pinus*
thunbergii in Jeju Island

강원대학교 대학원

산림경영학과

박길동

박길동의 농학박사 학위논문을
합격으로 판정함

2015년 12월

심사위원장

차 두 송



위 원

최 정 기



위 원

최 인 화



위 원

조 현 국



위 원

이 정 수



제주지역 곰솔림의 임분관리에 관한 연구

박길동

강원대학교 대학원 산림경영학과

본 연구는 제주지역특성을 고려한 곰솔의 수고추정식을 개발하고, 형상비와 임분밀도를 고려한 곰솔림 관리방안을 제시하였으며, GIS 공간분석기능을 이용한 곰솔림피해목의 시·공간적 분포특성의 파악을 목적으로 하였다.

제주지역 내 곰솔림의 흉고직경에 대한 수고추정식을 개발하기 위하여 Exponential, Modified Logistic, Chapman-Richards, Weibull 모델이 사용되었다. 분석결과, 모든 수고추정식은 0.01% 유의수준에서 유의적인 것으로 나타났으며, 모든 모델은 유사한 패턴으로 나타났다. 검정통계량 결과, 최종적으로 Exponential 모델이 최적모델로 나타났으며, 각 모델별 선행연구와의 비교결과 비이상적인 패턴은 나타나지 않았다.

제주지역 곰솔림의 형상비를 통한 임분밀도 분석을 위하여 제주도 애월읍 애월리 해안가부터 한라산 일대까지 34개소의 조사구를 설치하고, 평균흉고직경과 평균수고를 이용하여 형상비와 임분의 과밀도 여부를 분석하였다. 분석결과 한라산국립공원 내 표준지의 형상비와 국립공원 외 애월읍 표준지의 형상비는 차이가 있는 것으로 나타났다.

상대밀도를 분석한 결과, 한라산국립공원 내 위치한 표준지는 임분밀도가 과밀한 것으로 나타났으며, 국립공원 외 애월읍에 위치한 표준지는 임분밀도가 상대적으로 적정한 것으로 분류되었다. 따라서 한라산국립공원 지역의 목표본수밀도를 위하여 본수조절이 필요한 것으로 나타났다.

곰솔림피해목의 분포변화를 분석하고자 2013년부터 2015년까지 발생한 소나무재

선충병 피해목의 정보를 이용하여 피해목의 연도별 재적을 분석한 결과, 2013년에는 22,785m³, 2014년에는 18,662m³, 2015년에는 29,273m³의 피해가 나타나 효과적인 방제가 시급한 것으로 사료되었다.

재선충병 피해목의 분포특성을 확인하기 위하여 K-means 기법을 이용한 군집분석을 실시하여 도로 및 주거지의 접근성, 피해목 본수 밀도, 피해목 단면적 비율과의 관계를 파악할 수 있었으며, 행정구역별 재선충병 피해목의 분포특성 및 패턴을 파악할 수 있었다.

본 연구는 제주도의 곰솔림 임분관리를 목적으로 수행되었으며, 본 연구의 제주도 내 곰솔의 흉고직경을 이용한 수고추정, 형상비를 이용한 임분밀도관리 및 GIS의 공간적 평가와 패턴 분석결과는 곰솔림 관리의 기초자료로 활용될 것으로 사료된다.

주제어: 곰솔, 수고추정식, 임분밀도, 재선충병, 지리정보시스템

목 차

I. 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 제주도의 자연환경	2
1) 지리적 위치	2
2) 지질	3
3) 지형	3
4) 기후	4
3. 우리나라 곰솔의 입지환경 및 분포현황	5
1) 생육환경	5
2) 분포현황	6
3) 우리나라 남부지역 곰솔의 자원현황	7
II. 연 구 사	11
III. 곰솔림의 수고추정 모델 개발	12
1. 서론	12
2. 자료 및 방법	13
1) 공시재료	13
2) 추정모델 및 검증방법	13
3. 결과 및 고찰	15
1) 모델개발 결과	15
2) 모델검증	16
3) 모델비교	17

IV. 형상비를 통한 임분밀도 분석 및 평가	20
1. 서론	20
2. 자료 및 방법	20
1) 연구대상지 및 자료수집	20
2) 분석방법	22
3. 결과 및 고찰	26
1) 임분밀도에 따른 생장특성	26
2) 상대밀도표에 의한 과밀도 추정	29
3) 형상비와 임관의 높이에 따른 목표본수밀도 분석	31
V. 곰솔림 피해목의 공간적 분포변화 모니터링	33
1. 서론	33
2. 재료 및 방법	35
1) 연구대상지	35
2) 연구자료	38
3) 연구방법	40
3. 결과 및 고찰	49
1) 통계적 분석방법을 이용한 재선충병 피해목의 공간적 패턴분석	49
2) 통계적 기법을 이용한 재선충병 피해목의 공간적 분포특성	55
3) 소나무재선충병 피해목의 재적추정	67
4) 공간스케일에 따른 재선충병 피해목의 다양성 지수 분포	69
5) Cluster 분석을 이용한 재선충병 피해목의 특성분석	89
VI. 결론	105
VII. 인용문헌	108

표 목차

표 1. 곰솔, 소나무 지역별 면적 및 임목축적	8
표 2. 곰솔 영급별 경급별 면적	8
표 3. 곰솔 영급별 경급별 임목축적	9
표 4. 곰솔 지역별 피해유형별 면적 및 임목축적	10
표 5. 곰솔 데이터의 통계요약표	13
표 6. 곰솔의 수고추정을 위한 비선형 성장모델	14
표 7. 곰솔 수고추정식의 파라미터와 검정통계량	16
표 8. 곰솔 데이터의 입목 통계요약표	21
표 9. 곰솔 데이터의 표준지별 통계요약표	22
표 10. 일본의 흉고직경과 임관고에 따른 과밀현황 조건표	23
표 11. 임관의 높이에 대응한 목표본수밀도	25
표 12. 과밀현황 조건표 따른 표준지별 과밀도 판정여부	30
표 13. 곰솔림의 공간분석을 위한 GIS 자료	38
표 14. 곰솔의 재적추정을 위한 적용수고모델	43
표 15. 흉고직경과 수고를 이용한 곰솔재적추정식	43
표 16. 연도별 애월읍의 행정구역에 따른 재선충병 피해목 발생분포	51
표 17. 연도별 직경급에 따른 재선충병 피해목 분포	52
표 18. 시계열에 따른 표준편차타원체의 행정구역별 면적분포	57
표 19. 연도별 평균중심점 방향분포	64
표 20. 연도별 소나무재선충병 피해목의 재적 및 임목분포	67
표 21. 경급별 소나무재선충병 피해목의 재적 및 임목분포	68
표 22. 연도별 공간 스케일에 따른 Shannon-Weaver	69
표 23. 공간 스케일에 따른 Simpson's Index	74
표 24. 공간 스케일에 따른 Evenness Index	79

표 25. 공간 스케일에 따른 Dominance Index	84
표 26. 행정구역별 클래스의 면적분포	91
표 27. 2013년 행정구역별 클래스의 면적비율	93
표 28. 2014년 행정구역별 클래스의 면적비율	97
표 29. 2015년 행정구역별 클래스의 면적비율	101

그림 목차

그림 1. 우리나라 곰솔(<i>Pinus thunbergii</i> Parl.)분포도	7
그림 2. 곰솔의 흉고직경에 대한 수고의 산점도와 수고추정식	15
그림 3. Chapman-Richards 수고추정식 비교	17
그림 4. Weibull 수고추정식 비교	18
그림 5. Exponential 수고추정식 비교	18
그림 6. Modified Logistic 수고추정식 비교	19
그림 7. 임분밀도 분석을 위한 제주곰솔 표준지 위치도	21
그림 8. 표준지별 임분밀도와 평균 흉고직경의 관계	26
그림 9. 표준지별 임분밀도와 평균수고의 관계	27
그림 10. 표준지별 임분밀도와 형상비의 관계	28
그림 11. 표준지별 임분밀도에 따른 상대밀도	29
그림 12. 표준지별 형상비 60에 따른 상대밀도	31
그림 13. 표준지별 형상비 70에 따른 상대밀도	32
그림 14. 재선충병 피해 연구대상지	35
그림 15. 연구대상지 임상분포도	36
그림 16. 연구대상지 영급분포도	37
그림 17. 연구대상지 영급별 임상분포	37
그림 18. 재선충병 피해목 발생 분포도	39
그림 19. 재선충병 피해지의 특성분석방법	40
그림 20. 표준편차타원체 분석방법의 개념도	41
그림 21. 평균중심점 분석방법의 개념도	42
그림 22. 피해특성 분석을 위한 공간스케일 설정	44
그림 23. 피해목 공간분석방법의 개념도	48
그림 24. 시계열에 따른 재선충병 피해목 발생분포	50

그림 25. 도로접근성에 따른 재선충병 피해목 분포	53
그림 26. 주거지접근성에 따른 재선충병 피해목 분포	54
그림 27. 시계열에 따른 표준편차타원체의 형태분석	56
그림 28. 2013년도 표준편차 타원체 공간분포도	58
그림 29. 2014년도 표준편차 타원체 공간분포도	59
그림 30. 2015년도 표준편차 타원체 공간분포도	60
그림 31. 시계열에 따른 표준편차 타원체의 형태 및 면적 변화량 (2013년~2014년)	61
그림 32. 시계열에 따른 표준편차 타원체의 형태 및 면적 변화량 (2014년~2015년)	62
그림 33. 방위별 중심점 평균이동거리 분포	65
그림 34. 시계열에 따른 피해목 평균 중심점 이동특성 분석	66
그림 35. 연도별 소나무재선충병 피해목의 재적분포	67
그림 36. 경급별 소나무재선충병 피해목의 재적분포	68
그림 37. 연도별 Shannon-Weaver 분포	70
그림 38. 공간스케일에 따른 Shannon-Weaver 분포 (2013년)	71
그림 39. 공간스케일에 따른 Shannon-Weaver 분포 (2014년)	72
그림 40. 공간스케일에 따른 Shannon-Weaver 분포 (2015년)	73
그림 41. 연도별 Simpson's Index 분포	75
그림 42. 공간스케일에 따른 Simpson's Index 분포 (2013년)	76
그림 43. 공간스케일에 따른 Simpson's Index 분포 (2014년)	77
그림 44. 공간스케일에 따른 Simpson's Index 분포 (2015년)	78
그림 45. 연도별 Evenness Index 분포	80
그림 46. 공간스케일에 따른 Evenness Index 분포 (2013년)	81
그림 47. 공간스케일에 따른 Evenness Index 분포 (2014년)	82
그림 48. 공간스케일에 따른 Evenness Index 분포 (2015년)	83
그림 49. 연도별 Dominance Index 분포	85
그림 50. 공간스케일에 따른 Dominance Index 분포 (2013년)	86
그림 51. 공간스케일에 따른 Dominance Index 분포 (2014년)	87
그림 52. 공간스케일에 따른 Dominance Index 분포 (2015년)	88
그림 53. K-means를 이용한 군집분포도	90

그림 54. 군집분석을 이용한 인자의 특성분석	92
그림 55. 2013년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (A)	94
그림 56. 2013년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (B)	95
그림 57. 2013년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (C)	96
그림 58. 2014년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (A)	98
그림 59. 2014년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (B)	99
그림 60. 2014년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (C)	100
그림 61. 2015년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (A)	102
그림 62. 2015년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (B)	103
그림 63. 2015년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (C)	104

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

곰솔(*Pinus thunbergii* Parl.)은 소나무류 중에서 초기의 생장이 빠르고 염해에 강한 특징을 나타내어 남부와 해안 부근에 군락을 형성하고 있다. 해발 3,500m 이상까지 분포하는 소나무와는 달리, 곰솔은 500m 이하의 산지와 해안에서 주로 분포하고 있다. 우리나라에서는 2009년부터 2013년까지 매년 약 421ha의 면적이 조림되어 제주도를 포함한 전라도와 경상도 등 남부지역의 대표적인 조림수종이다(국립산림과학원 2013a).

곰솔은 주로 우리나라 및 일본의 해안선을 따라 분포하는 이엽송 수종으로서 기온의 영향을 받으며 특히 겨울기간의 저온이 곰솔분포에 제한을 주고 있으며, 남부 해안선을 따라 생육하고 있지만 내륙지역에 조림된 지역도 많다. 곰솔은 태풍 등에 강하여 모래땅에 방풍림으로서 기능이 우수하나 내륙지역에서는 산복이상 올라가면 그 분포는 낮은 특성을 갖는다. 따라서 곰솔은 우리나라 서해, 동해, 남해안 지역과 제주, 울릉도에서 자생하는 대표적인 상록침엽수 중의 하나라고 할 수 있다. 특히 우리나라의 남부 해안가에서 생육 가능한 상록침엽수종 중에 곰솔이 가장 적합한 것으로 알려져 있다(국립산림과학원 2013a).

곰솔이 널리 분포하고 있는 제주도의 산림면적은 88,247ha로 행정면적 184,905ha의 약 47.7%를 차지하고 있으며(산림청 2015), 침엽수림 23,341ha, 활엽수림 30,638ha, 혼효림 11,089ha, 무입목지 23,906ha로 보고되었다(제주특별자치도 2014). 이 중 곰솔단순림은 15,721ha, 곰솔혼효림은 7,974ha로 곰솔의 분포면적은 제주도 산림면적의 27%로 높은 비율을 차지하고 있다.

넓은 면적의 분포를 가지고 있는 제주지역 곰솔림은 산림경영을 위하여 지속적으로 관리를 해야 하지만 매년 산지개발 등에 의해 일부 산림이 훼손 및 타용도로 전환되고 있다. 특히 곰솔은 제주지역에서 소나무 재선충병에 의해 심각하게 피해를 입고 있어 산림자원보호 및 경영의 필요성이 대두되고 있다.

임분을 관리함에 있어서 흉고직경과 수고는 주요한 변수로 인식되어 왔으며, 이

인자들의 측정들은 반드시 수반되어야 한다. 하지만 흉고직경에 비해 수고의 측정은 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 수고는 흉고직경과의 함수관계를 통한 추정방법이 널리 이용되고 있다(Avery and Burkhart 2002). 또한, 체계적인 시업관리를 통한 임분밀도와 같은 임지환경의 개선은 소나무재선충병에 의한 피해확산을 방지하고, 해안방재림의 수목에 의한 피해를 줄여줄 수 있어 적절한 밀도관리가 필요하다.

제주도는 소나무재선충병 피해가 극심 피해지역으로 분류되어 있으며, 2013년부터 적극적인 방제활동을 하고 있지만, 계속되는 확산으로 인하여 어려움을 겪고 있다. 특히, 소나무 재선충병은 인위적·자연적 요인으로 이동이 가능하여 피해확산의 예측이 어려운 실정이다. 또한, 피해목의 공간적 분포특성도 발생초기에는 개체목을 중심으로 점상으로 산재하여 발생하기 때문에 정확한 피해 확산정도 및 예측이 어려운 실정이다(김동윤 2008).

따라서 본 연구는 제주지역특성을 고려한 곱술의 수고추정식을 개발하고, 형상비와 임분밀도를 고려한 곱술림 관리방안을 제시하며, GIS 공간분석기능을 이용한 소나무재선충병의 시·공간적 분포특성을 파악하고자 한다.

2. 제주도의 자연환경

1) 지리적 위치

제주도는 한반도의 남해상에 위치하고 있으며 우리나라 남해안에서 보면 남서쪽으로 치우쳐져 있다. 제주도의 북쪽 목포까지의 거리가 149km, 북동쪽 부산과의 거리는 302km이며, 서울과는 469km 이다. 제주도의 주변해역은 북쪽 한반도 남해안과 사이에 제주해협을 포함하는 남해가 있으며, 남쪽으로는 동중국해가 있어 제주도가 남해와 동중국해의 경계가 된다. 제주도의 지도를 거꾸로 보면 한반도의 작은 섬인 제주도가 태평양을 향하는 우리나라의 전진기지가 되는 것을 알 수 있다. 즉, 주변에 위치한 한국, 중국, 일본의 중앙부에 제주도가 위치하고 있어 예로부터 지정학적으로 매우 중요한 위치를 점하고 있는 곳이다(제주특별자치도 2015a).

제주도는 동경 126° 08' ~ 126° 58', 북위 33° 06' ~ 34° 00' 에 속한다. 제주도의 남단은 마라도로서 마라도는 우리나라의 최남단에 해당되며, 서단은 한경면 차귀도, 동단은 우도 연평리의 비양등대, 북단은 추자도의 시루여이다. 2013년 기준으로 제주도의 총면적은 1,849.3km²로 전국의 1.9%에 지나지 않으며 551.78km의 해안선과 8개의 유인도, 71개의 무인도를 포함하고 있다.

2) 지질

제주도는 화산도로서 주로 알카리성 용암류의 연속적인 분출에 의해서 만들어진 순상화산체이다. 섬 중앙에는 해발 1,950m의 한라산이 위치하고 있으며 한라산 산록에는 368개의 소화산체인 오름(기생화산)이 분포되어 있어 특이한 경관을 창출하고 있다(제주특별자치도 2015a).

제주화산도의 지질구조는 신생대 제4기초의 서귀포층, 제4기 후기에 형성된 화산쇄설성퇴적층인 성산층과 신양리층 등의 퇴적암층과 현무암, 조면암질 안산암, 조면암등의 화산암류, 기생화산에서 분출된 화산쇄설물 등으로 구성되어 있다.

제주도의 화산활동은 크게 보아 5단계의 화산활동기 및 퇴적기로 구분되며 적어도 100회 이상에 달하는 용암분출이 노두에서 관찰된다. 분출순서에 의하여 구분된 현무암류는 광물조성과 화학조성으로 보아 대체로 현무암질로서 침상장석감람석현무암, 반상휘석현무암, 비현정질현무암, 하와이아이트, 뮤지어라이트, 솔레아이트 등으로 이들은 본도 전면적의 90% 이상을 차지한다.

3) 지형

제주도는 장축인 동북동(ENE)~서남서(WSW) 방향성을 보이는 반타원형의 화산도로서 순상화산(shield volcano)의 지형특성을 보이고 있다. 본 도는 평면상으로 장축의 방향이 N70°E이며, 장경 73km, 단경 31km로서 섬 주위는 낮은 경사의 화산대지를 보이나 중앙부로 갈수록 경사가 급해지며 중앙부에 1,950m의 한라산이 위치하고 있다(제주특별자치도 2015a).

한라산 정상 분화구의 서측 외륜은 돔(dome) 형태의 조면암으로 구성되어 있고

절벽을 보이며, 동측 외륜은 현무암으로 구성되어 있어 완만한 경사를 보여주고 있다. 특히 한라산 정상부의 백록담 분화구의 돛형 분화구 아래의 정상산록은 거의 평탄한 용암대지(lava plateau) 지형을 보이고 있으며, 송이(scoria)로 구성된 소규모의 화산체인 오름(기생화산)들이 발달하여 있다.

한라산체를 벗어난 제주도의 저변지역은 경사 5°이내의 평탄한 저지대를 이루고 있으며 분석구(scoria cone or cinder cone)들이 여러군데 발달하여 있다. 이 분석구들은 정상부에 화구가 있거나 혹은 형성되어 있지 않은 스킨리아구(scoria mound), 그리고 화구 일부분에서 용암이 하부로 흘러내려 한쪽면이 침식된 소위 말굽형(horse-shoes type) 화구가 많으며, 전체적인 용암의 분포를 추적해 볼 때 혀를 내민 모양(tongue-like)의 지형을 나타내는 분석구들로 구분하고 있다.

4) 기후

제주도는 기후분류학상 아열대성 기후권에 속하는 한반도 남부에 위치한 화산도로서 사면이 바다로 둘러싸여 있어 연중 온난 습윤한 해양성 기후특성을 보여준다. 이는 제주도가 따뜻한 쿠로시오 해류(Kuroshio current)의 지류인 쓰시마난류(Tsushima warm current)의 영향을 직접적으로 받는 곳에 위치하고 있기 때문이다.

제주도의 연평균기온은 11.7℃로 서귀포 지역이 가장 높고 한라산 정상부가 가장 낮다. 같은 위도상에 위치한 세계의 다른 지역과 비교해 보면 제주도의 연평균기온이 가장 낮은 것을 알 수 있다. 이는 제주도가 대륙 동안의 해양도서로서 겨울에는 대륙의 영향을 깊게 받아 저온이 되고 여름은 이와 정반대로 해양의 영향을 받아 고온이 되지 않기 때문이다. 최근 30년간 제주도의 연평균기온을 보면 제주시가 15.2℃, 서귀포시가 15.9℃로 나타났다(제주특별자치도 2015a).

제주도에서 기온이 영하로 내려가는 달은 볼 수 없으며 기후학적으로 볼 때 겨울의 기준을 최저기온 0℃로 할 경우 겨울이 없는 반면, 여름은 길고 더운 특징이 있다. 월평균기온이 18℃ 이상의 여름에 해당하는 달이 6, 7, 8, 9월로 4개월이나 되며, 가장 더운 8월에 해안지대에서는 26℃ 내외가 되나 제주도 전역의 월평균기온은 22.4℃로 낮게 나타나고 있다.

최근 30년간 제주도의 연평균강수량은 전체적으로 2,044mm, 해안저지대만 하더라

도 1,560mm로서 한국에서 가장 비가 많이오는 곳이다. 강수의 계절적 분포를 보면 연강수량의 약 43%가 6, 7, 8월인 여름에 내리는데 이것은 서울 60%, 대구 51%에 비해 낮은 편이다. 이와 같이 상대적인 고른 계절별 강수는 봄철과 가을철의 강수량이 많은 결과이다. 특히 여름장마 이전에 소위 '고사리 장마'라고 하는 봄장마가 특징적이다. 봄장마시에는 안개비가 지속적으로 내려 봄철 강수량은 연강수량의 약 23%에 달한다.

3. 우리나라 곰솔의 입지환경 및 분포현황

1) 생육환경

곰솔림은 하천, 부락, 경작지, 산맥, 기타 식생군락 때문에 식생의 연속성을 찾기 힘들다. 곰솔은 토심이 깊고 비옥한 토양에서 생육이 양호하며, 암석지나 건조지, 척박지에서도 생육이 가능하나, 내한성이 약하여 중부이북 산간지방에서는 생육이 불가능하다(하우연 1998).

곰솔자생지의 기상 및 토양의 이화학성을 살펴보면, 주요 자생지의 기상요소는 평균기온 12~14.5℃, 총강수량 1,125~1,500mm 내외, 온량지수 98~111, 한랭지수 -16.4~-4.7 범위로 나타내고 있다. 자생지의 토양 산도(pH)는 5~9, 유기물 함량은 0.34~1.82로 나타났으며, 토양의 물리성은 미사질식양토에서부터 사양토까지 다양하게 보이고 있다(이강녕 1986).

곰솔의 적지는 입지환경인자와 수고생장과의 관계를 분석한 결과 권역별로 차이가 나타난다. 서해안권에서는 국소지형, 토양건밀도, 토양 B층 깊이, 유효인산, 전질소 남해안지역에서는 국소지형, 토양 B층 깊이, 유효토심, 전질소, 동해안에서는 국소지형, 유효토심, 토양형으로 구분되었다. 곰솔의 수고생장과 기상인자에서는 상대습도가 중요한 인자로 판명된 바 있다(손영모 1994).

또한 우리나라에서 곰솔을 입지적 특성과 형태적 특성에 의하여 남해안 동부구, 남해안서부구, 서해안구, 동해안구 등 4개의 권역으로 구분하여 조립권역 설정을 제

시하기도 하였다(이강녕 1986).

2) 분포현황

곰솔은 우리나라를 포함하여 세계적으로 북위 $41^{\circ}34'$ 을 북한계로 남쪽으로는 일본 Takara島의 29° 범위 까지 분포한다(Mirov 1967). 우리나라에서는 해안선을 따라 동해안에서는 강릉, 서해안에서는 백령도, 남해안에서는 제주도 까지 넓게 분포되어 있고 도서와 섬 지역에 대부분 분포하는 것으로 보고되고 있으나 소나무에 비하여 그 분포면적은 매우 좁다.

보통 해안에서 4~8km의 범위 까지 분포하고 있는 것으로 되어 있다. 동해안에서는 부산에서부터 울진까지 연결되어 있으나, 북으로 갈수록 그 분포면적은 줄어들고 해안과의 거리는 짧아지는 것으로 나타났으며, 서해안에서는 목포에서 수원에 이르는 해안에 따라 산포하는 것으로 나타났으며, 수직적 분포로서는 북위 35° 이남에서는 해발 550m 이하, 북위 35° 이북에서는 100m 이하에서 주로 분포한다고 되어 있다(이강녕 1986). 우리나라에서 곰솔의 천연 분포는 인위적인 간섭도 무시할 수 없으며, 인공 조림된 지역도 많다(이강녕 1986).

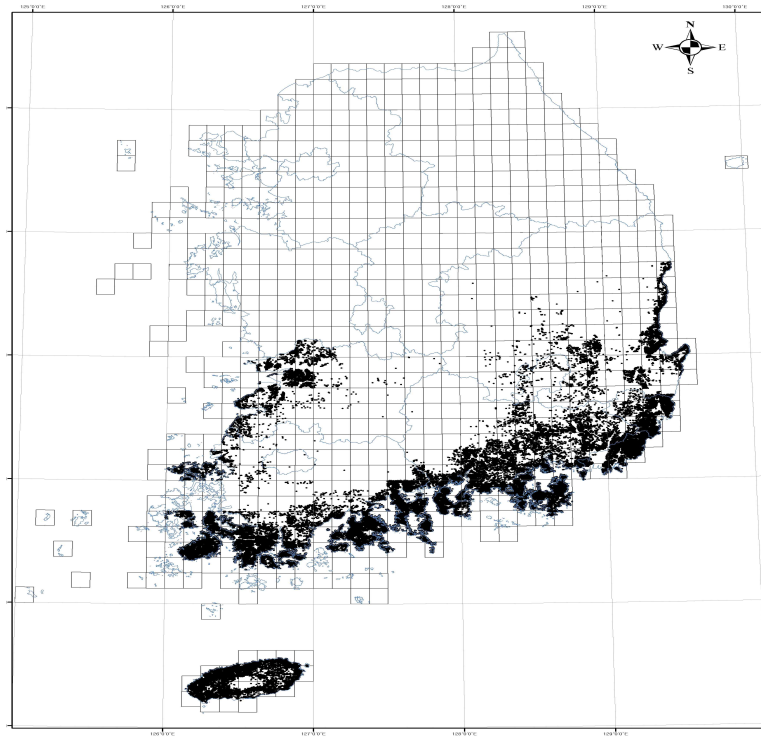


그림 1. 우리나라 곰솔(*Pinus thunbergii* Parl.)분포도

(출처: 국립산림과학원 2013a)

3) 우리나라 남부지역 곰솔의 자원현황

(1) 곰솔 지역별 자원량

우리나라 남부지역의 곰솔 면적은 20,189,866ha이며, 이중 경상남북도가 96,283ha, 전라남북도 78,500ha 그리고 제주도가 15,080ha를 차지하고 있다. 임목축적은 26,484천 m^3 으로서 경상남북도가 16,718천 m^3 , 전라남북도가 7,268천 m^3 , 그리고 제주도 2,498천 m^3 으로 나타났다. 반면에 평균임목축적은 경상남북도 174 m^3 , 제주도 166 m^3 , 전라남북도는 93 m^3 으로 나타났다.

표 1. 곰솔, 소나무 지역별 면적 및 임목축적

곰솔	면적 (ha)	임목축적 (천m ³)	평균임목축적 (m ³ /ha)
경남북	96,283	16,718	174
전남북	78,500	7,268	93
제주	15,083	2,498	166
계	189,866	26,484	139

(출처: 국립산림과학원 2014)

(2) 곰솔 영급 · 경급별 자원량

곰솔의 영급별 면적을 살펴보면, IV영급이 126,007ha로 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, V영급이 35,258ha, III영급이 19,07ha를 차지하고 있다. 경급별 면적은 중경목(흉고직경 18~28cm)이 130,436ha로 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, 소경목(흉고직경 6~16cm)이 50,428ha, 대경목(흉고직경 30cm 이상)이 4,822ha를 차지하고 있다(표 2).

표 2. 곰솔 영급별 경급별 면적

(단위: ha)

영급 \ 경급	치수	소경목	중경목	대경목	합 계
I	4,176	14	-	-	4,190
II	4	3,867	3	0.2	3,874
III	-	18,731	339	-	19,070
IV	-	27,447	98,556	4	126,007
V	-	369	31,513	3,376	35,258
VI	-	-	25	1,395	1,420
VII	-	-	-	20	20
VIII	-	-	-	23	23
IX	-	-	-	4	4
합 계	4,180 (2%)	50,428 (27%)	130,436 (69%)	4,822 (3%)	189,866 (100%)

(출처: 국립산림과학원 2014)

곰솔의 영급별 축적을 살펴보면, IV영급이 14,249,747m³로 가장 많은 축적을 차지하고 있으며, V영급이 9,454,102m³, III영급이 1,885,710m³를 차지하고 있다. 경급별 축적은 중경목(흉고직경 18~28cm)이 20,801,429m³로 가장 많은 축적을 차지하고 있으며, 소경목(흉고직경 6~16cm)이 3,615,022m³, 대경목(흉고직경 30cm 이상)이 1,851,232m³를 차지하고 있다(표 3).

표 3. 곰솔 영급별 경급별 임목축적

(단위: m³)

영급 \ 경급	치수	소경목	중경목	대경목	합 계
I	216,334	768	-	-	217,102
II	230	239,465	362	165	240,222
III	-	1,814,249	71,461		1,885,710
IV	-	1,542,823	12,703,584	3,340	14,249,747
V	-	17,717	8,021,506	1,414,879	9,454,102
VI	-	-	4,516	411,244	415,760
VII	-	-	-	13,936	13,936
VIII	-	-	-	5,226	5,226
IX	-	-	-	2,442	2,442
합 계	216,564 (1%)	3,615,022 (14%)	20,801,429 (79%)	1,851,232 (7%)	26,484,247 (100%)

(출처: 국립산림과학원 2014)

(3) 곰솔 피해유형별 자원량

피해유형은 병해충(재선충병피해지, 솔껍질깍지벌레), 덩굴, 산불, 태풍, 산림작업 등으로 구분하였으며, 피해유형별 자원량 분석 결과 전체적으로 피해 유형별 면적 중 병해충 피해가 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 그 다음 덩굴피해>산림작업 순으로 나타났다. 또한 권역별 피해 유형별 임목축적은 경남북과 제주의 경우 병해충 피해>덩굴피해>태풍피해>산림작업 순으로 나타났으며, 전남북의 경우 덩굴피해>병해충 피해>산림작업 순으로 나타났다.

표 4. 곰솔 지역별 피해유형별 면적 및 임목축적

피해유형	경남북		전남북		제주		계	
	면적 (ha)	임목축적 (m ³)	면적 (ha)	임목축적 (m ³)	면적 (ha)	임목축적 (m ³)	면적 (ha)	임목축적 (m ³)
덩굴피해	14,309	2,172,787	12,226	1,270,417	817	27,709	27,352	3,470,913
병해충 피해	18,677	3,698,242	16,150	877,748	1,934	500,468	36,761	5,076,458
산림작업	1,753	294,737	3,853	274,368	483	25,951	6,089	595,056
산불피해	293	53,204	57	2,450	23	860	373	56,514
야생동물 피해	-	-	62	1,391	101	28,965	163	30,356
태풍피해	-	-	49	1,765	1,008	198,436	1,057	200,201
기타	8,335	1,696,237	7,854	693,638	4,367	782,389	20,556	3,172,264
소 계	43,367	7,915,207	40,252	3,121,776	4,367	782,389	87,986	11,819,372

(출처: 국립산림과학원 2014)

II. 연 구 사

곰솔림을 대상으로 많은 연구가 이루어져왔으나 이는 분포, 생장특성(조희두 1988; 정영관과 박명숙 1999; 박종민 등 2009; 김현필 등 2012; 박준형 등 2013) 및 임분구조(이강영 1988; 김석환과 최송현 2007; 천광일 등 2012; 박준형 등 2013; 김찬범 등 2014)등 이러한 연구들은 모두 생태학적 측면에서 접근한 것으로, 곰솔림의 밀도조절을 위한 시업체계 또는 관리방안 등에 대하여 구체적으로 검토한 사례는 없다.

또한, 흉고직경을 이용한 많은 수고생장식들이 국·내외에서 개발되었으며, 실용적인 모델들이 많은 선진국에서 지역 주요 수종을 대상으로 개발되어졌다(Huang et al. 1992; Soares and Tomé 2002; Sánchez-González et al. 2007). 우리나라의 경우에도 Chapman-Richards, Weibull 등 주요 생장함수식을 이용하여 주요수종에 대하여 연구되어 왔지만(이우균 1996; 곽두안 등 2004; Lee et al. 2009; Lumbres et al. 2011; 서연옥 등 2011; Lee et al. 2014), 제주지역의 주요수종인 곰솔의 수고추정식에 관한 연구는 부족한 실정이다.

지금까지 소나무재선충병 피해지의 분포특성에 관련된 연구를 보면, 김준범 등 (2003, 2004)은 IKONOS 영상과 항공사진을 이용하여 소나무 재선충병 발생 지역을 추출하였으며, 안철호 등(1988)은 Landsat TM영상을 이용하여 솔잎혹파리 지역을 추출하였다. 또한, 김응남과 김대영(2008)은 근적외선 디지털 카메라를 이용하여 소나무 재선충병 피해를 조사하였으며, 이정빈 등(2014)은 지상용 초분광 카메라를 이용하여 소나무재선충병 감염목의 추출을 연구하였다. 그러나 지금까지의 연구는 원격탐사 자료를 활용하여 대면적 이나 일부 지역에 대한 소나무재선충병의 피해지역을 추출하고 분석하는 방법이 대부분을 차지하고 있으며, GIS 공간분석기능을 이용한 소나무재선충병의 시·공간적 분포특성에 관한 연구는 부족한 실정이다.

III. 곰솔림의 수고추정 모델 개발

1. 서론

곰솔은 소나무류 중에서 초기의 생장이 빠르고 염해에 강한 특징을 나타내어 남부와 해안 부근에 군락을 형성하는 것으로 보고되었다. 곰솔은 2009년부터 2013년까지 매년 약 421ha의 면적이 조림되어 전라도와 경상도의 대표적인 조림수종이다(산림청 2014b). 그러나 곰솔은 제주지역에서 소나무 재선충병에 의해 심각하게 피해를 입고 있어 산림자원 보호의 필요성이 대두되고 있다(제주특별자치도 2015b).

흉고직경과 수고는 산림자원을 이해함에 있어 주요한 변수로 인식되어 왔다. 따라서 이러한 측정들은 반드시 수반되어야 한다. 하지만 흉고직경에 비해 수고의 측정은 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 수고는 흉고직경과의 함수관계를 통한 추정방법이 널리 이용되고 있다(Avery and Burkhart 2002).

많은 수고생장식들이 세계 도처에서 개발되었으며, 실용적인 모델들이 많은 선진국에서 지역 주요 수종을 대상으로 개발되어졌다(Huang et al. 1992; Soares and Tomé 2002; Sánchez-González et al. 2007). 우리나라의 경우에도 수고생장식을 이용하여 주요수종에 대하여 연구되어 왔다(이우균 1996; 곽두안 등 2004; Lee et al. 2009; Lumbres et al. 2011; 서연옥 등 2011; Lee et al. 2014).

하지만 곰솔에 대한 수고생장모델은 부족한 실정이며, 특히 지역특성을 고려한 추정식은 개발되지 못하고 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 제주지역 곰솔에 대한 최적 비선형 수고생장식을 추정하고 선행연구와 비교분석하고자 실시하였다.

2. 자료 및 방법

1) 공시재료

본 연구에서는 제주도 내 표준지에서 측정된 곰솔을 대상으로 개발되었다. 분석에 이용된 흉고직경은 최소 6cm에서 최대 100cm로, 평균 29.2cm이었으며, 수고는 최소 4m에서 최대 32m로, 평균 12.1m 이었다. 분석에 이용된 전체 입목수는 1,977본 이었다(표 5).

표 5. 곰솔 데이터의 통계요약표

통계량	흉고직경 (cm)	수고 (m)
평균	29.2	12.1
최대값	100	32
최소값	6	4
표준편차	16.7	4.2

2) 추정모델 및 검증방법

본 연구에서는 곰솔의 수고추정의 위하여 4개의 비선형 성장모델이 이용되었다. 이용된 모델들은 Exponential, Modified Logistic, Chapman-Richards, Weibull 모델식이다(Richards 1959; Chapman 1961; Yang et al. 1978; Ratkowsky and Reedy 1986; Ratkowsky 1990; Huang et al. 1992).

각 모델의 파라미터는 SAS 9.4 통계소프트웨어의 PROC NLIN 프로시저를 이용하여 산출하였다(SAS Institute Inc. 2013). 각 모델의 파라미터를 산출한 후, 선행연구의 모델 파라미터와의 비교검증을 실시하였다(Lumbres et al. 2011; 손영모 등 2013).

표 6. 곰솔의 수고추정을 위한 비선형 생장모델

모델명	함수식
Exponential	$HT = 1.2 + a \times e^{\frac{b}{(DBH+c)}}$
Modified Logistic	$HT = 1.2 + \frac{a}{1 + b^{-1} \times DBH^{-c}}$
Chapman-Richards	$HT = 1.2 + a(1 - e^{-bDBH})^c$
Weibull	$HT = 1.2 + a(1 - e^{-bDBH^c})$

*HT = 총수고 (m); DBH = 흉고직경 (cm); 1.2 = 흉고직경 측정높이 (m) a, b, c = 식의 파라미터; e = 자연로그의 밑

최적 모델을 결정하기 위하여 4개의 검정통계량이 평가되었다. 이용된 통계량은 결정계수 (R^2), 평균제곱근오차 (RMSE), 평균편차 (MD), 절대평균편차 (MAD)이며, 그 식은 아래와 같다.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \right]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2 / n}$$

$$MD = \sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i) / n$$

$$MAD = \sum_{i=1}^n |H_i - \hat{H}_i| / n$$

H_i = i번째 나무의 측정수고

$\hat{H}_i$ = i번째 나무의 추정수고

$\bar{H}$ = 측정된 임목들의 평균수고

n = 모델검정에 이용된 전체 관측자료 수

3. 결과 및 고찰

1) 모델개발 결과

흉고직경을 이용한 수고생장모델 결과, 모든 모델의 파라미터 값은 95% 신뢰수준에서 유의하였으며, 모든 모델식 또한 유의적이었다. 전체 식들의 형태는 점근선에 수렴하는 형태를 나타내고 있었다.

4개의 흉고직경-수고 생장 곡선은 모두 유사하였으며, 흉고직경에 따른 큰 수고차이는 나타나지 않았다. 모델의 적합성을 점검하기 위하여 본 연구의 파라미터를 선행연구와 비교하였다(Lumbres et al. 2011). 그 결과, 모든 파라미터들은 유사하였으며, 비이상적인 수치는 나타나지 않았다.

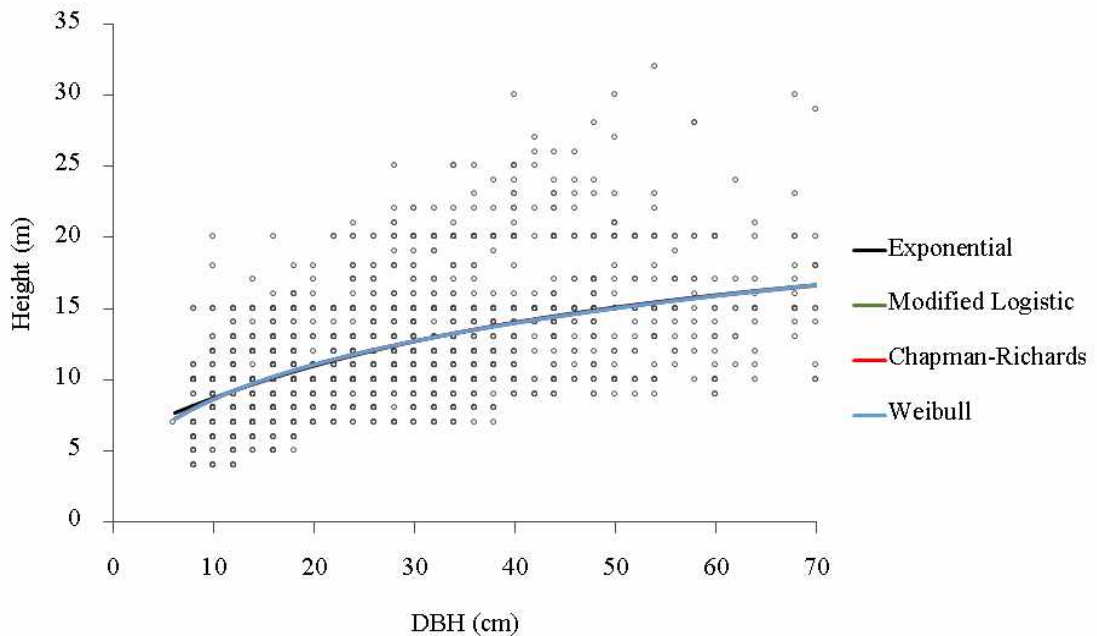


그림 2. 곰솔의 흉고직경에 대한 수고의 산점도와 수고추정식

2) 모델검증

흉고직경-수고 생장모델결과, 각 모델들의 검정통계량들은 유사하였다. 결정계수의 범위는 0.9258~0.9259, 평균제곱근오차의 범위는 2.2178~3.4945, 평균잔차는 -0.0289 ~0.0019, 절대평균잔차는 0.8413~2.7075의 범위를 나타냈다. 모든 검정통계량을 고려한 결과, Exponential 모델식이 최적모델로 선정되었으며, 결정계수는 0.9259, 평균제곱근오차는 2.2178, 평균편차는 -0.0289, 절대평균편차는 0.8413로 나타났다(표 7).

표 7. 곰솔 수고추정식의 파라미터와 검정통계량

모델명	파라미터			검정통계량				
	a	b	c	R ²	RMSE	MD	MAD	Pr>F
Exponential	22.7684	-35.6355	22.2943	0.9259	2.2178	-0.0289	0.8413	<0.0001
Modified Logistic	45.145	0.0634	0.4963	0.9258	2.2231	-0.0291	0.8420	<0.0001
Chapman-Richards	20.8576	0.00991	0.4355	0.9258	3.4945	0.0019	2.7075	<0.0001
Weibull	27.9373	0.1009	0.4892	0.9258	2.2221	-0.0287	0.8415	<0.0001

3) 모델비교

본 연구에서 추정된 수고모델과 선행연구와의 수고모델을 비교하였다. 본 연구의 수고추정식과 Lumbres et al. (2011) 연구와 Park et al. (2015) 연구의 수고추정식이 비교되었다. 비교된 모델식은 Chapman-Richards, Weibull, Exponential, Modified Logistic 모델이며, 다음 그림과 같다. 선행 연구와의 비교 결과, 수고곡선에 큰 차이는 나타나지 않았다.

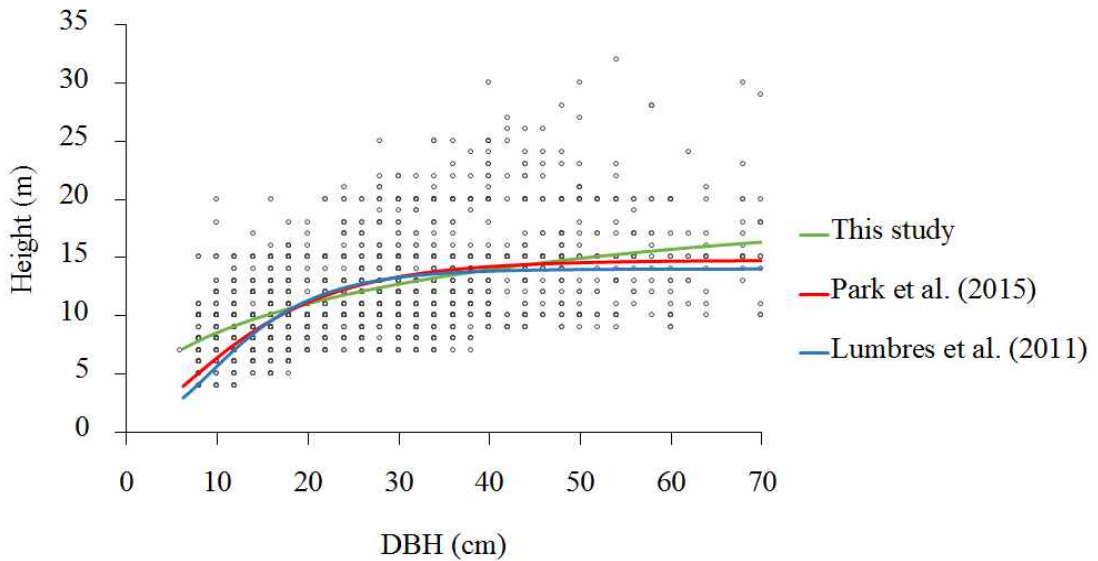


그림 3. Chapman-Richards 수고추정식 비교

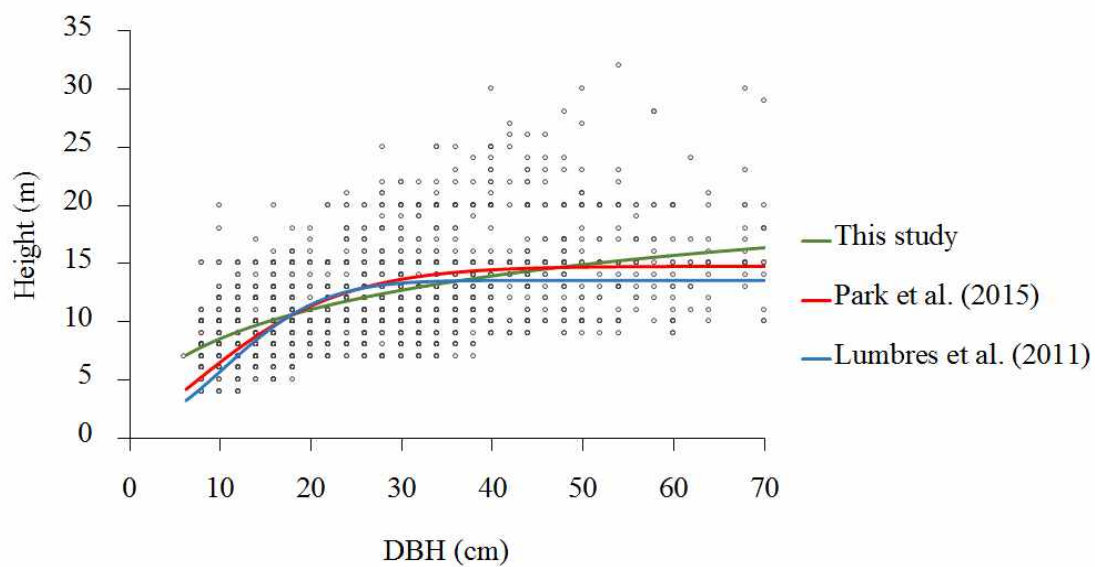


그림 4. Weibull 수고추정식 비교

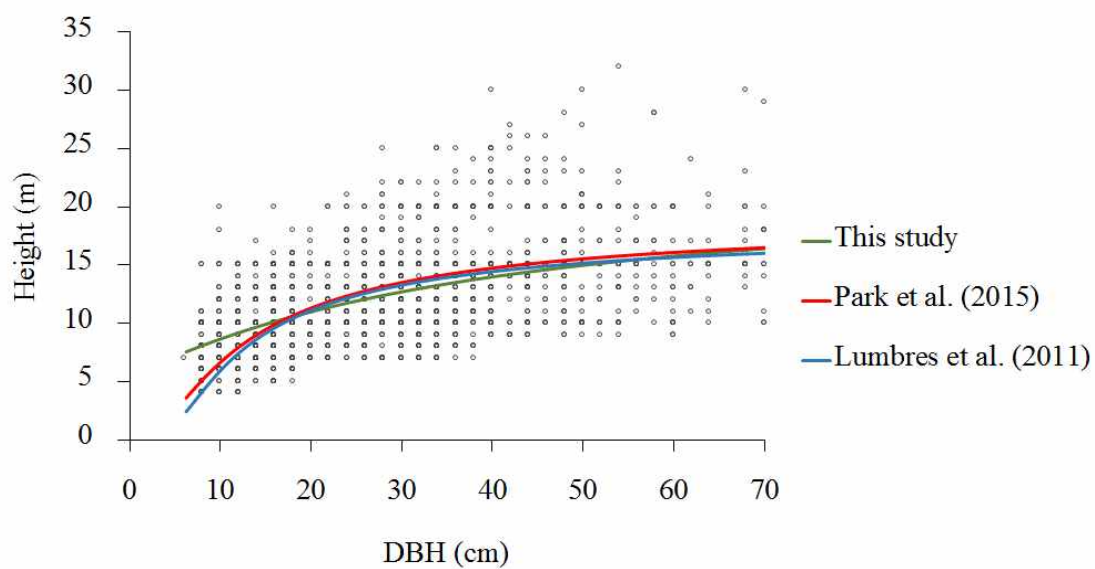


그림 5. Exponential 수고추정식 비교

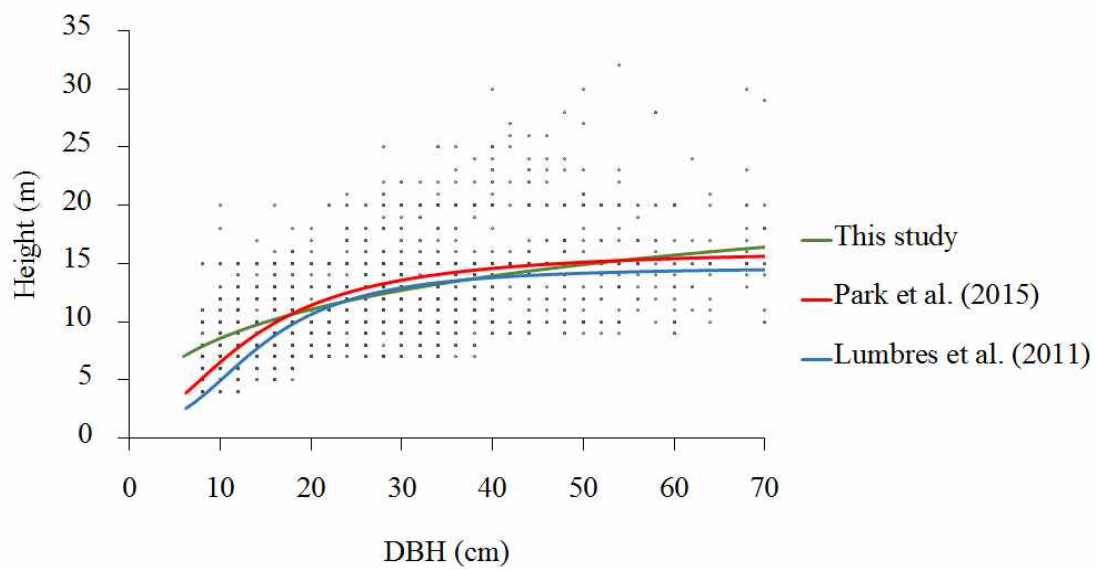


그림 6. Modified Logistic 수고추정식 비교

IV. 형상비를 통한 임분밀도 분석 및 평가

1. 서론

우리나라 해안방재림의 교목층은 대부분 곰솔 단순림을 이루고 있다(국립산림과학원 2012; 2013b). 따라서 소나무재선충병이나 솔껍질깍지벌레에 의한 피해가 확산될 경우 방재기능의 상실로 이어질 수 있기 때문에 체계적인 시업·관리를 통한 임분환경의 개선이 필요하다(박문섭 등 2008).

또한 해안방재림의 임목밀도가 높을 경우는 쓰나미 내습 시 오히려 수목에 의한 피해를 가중시킬 수 있으므로(Laso Bayas et al. 2011) 적절한 밀도관리가 중요하다. 밀도조절은 건전한 임분뿐만 아니라 교란임지에 대해서도 가장 기본적인 관리방안이다.

그러나 현재 우리나라에서는 해안방재림을 지속적으로 조성하고 있지만 사후관리는 미흡한 실정이며, 관련 지침 또한 마련되어 있지 않다. 향후 해안림의 방재기능 증진을 위한 건전한 수형(형상비) 및 밀도 관리방안, 나아가 복층림으로 유도하기 위한 활엽수 도입방법 등이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 제주지역 내 곰솔표준지를 설정하여 일본의 밀도관리 지침(Forestry and Forest Products Research Institute 2011)과 비교함으로써 형상비를 고려한 해안방재림의 적정밀도관리를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

1) 연구대상지 및 자료수집

사전 자료 조사 및 현장답사를 통해 제주도 애월읍 곰솔의 임상에 있어 차이를 확인하고 조사 구역을 설정하기 위해, 애월읍 애월리 해안가 곰솔림부터 애월읍 광령리, 조천읍 교래리 한라산 일대 까지 34개소의 조사구를 20m × 20m의 크기로 설정하였다(그림 7). 그 중 19개 표준지는 애월읍 지역 내에, 15개 표준지는 한라산 국립공원 내에 위치하고 있다.

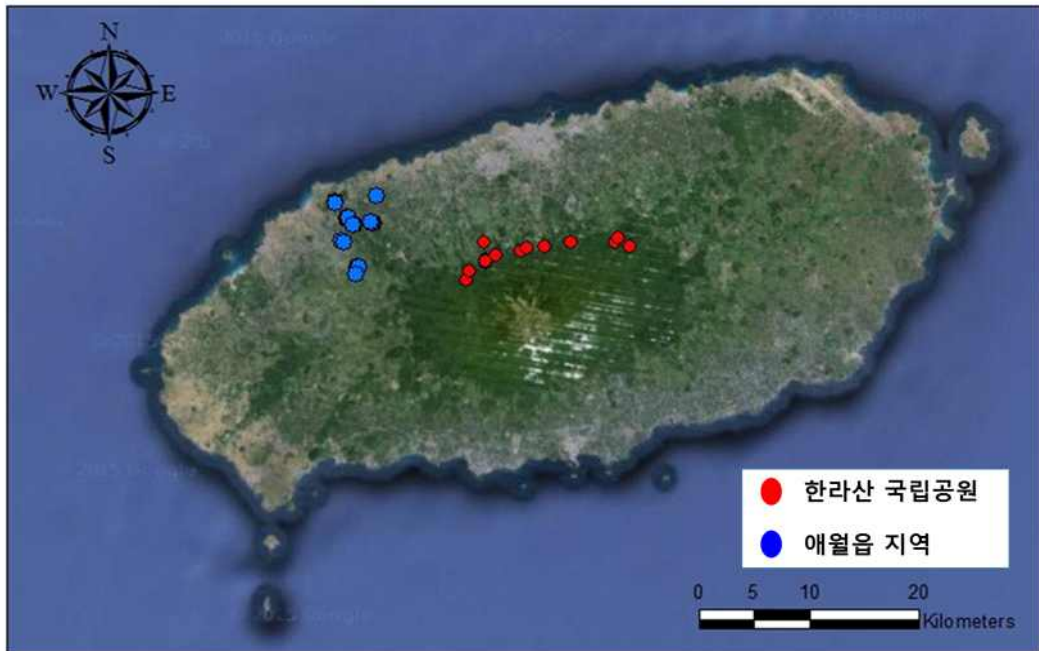


그림 7. 임분밀도 분석을 위한 제주곰솔 표준지 위치도

표준지 조사 및 데이터 분석을 통해 애월읍의 대표성을 띤다고 판단되는 애월읍 어음리 빌레못동굴 일원 495ha(해발고도 200m~450m)의 구역내의 곰솔 1,977본의 흉고직경 및 수고를 각각 직경테이프와 순토측고기를 이용하여 조사하였다(표 8). 분석에 이용된 표준지 수는 총 34개으로써 표준지별 평균 흉고직경은 23.0cm, 평균수고 16.0m, 임목밀도 522trees/ha로 나타났다(표 9).

표 8. 곰솔 데이터의 임목 통계요약표

통계량	평균 흉고직경(cm)	평균 수고(m)
평균	29.2	12.1
최대값	100.0	4.0
최소값	6.0	32.0
표준편차	16.7	4.2

표 9. 곰솔 데이터의 표준지별 통계요약표

통계량	평균 흉고직경(cm)	평균 수고(m)	입목밀도(trees/ha)
평균	23.0	16.0	522
최대값	96.0	29.0	1225
최소값	6.0	6.0	125
표준편차	12.9	5.0	283

2) 분석방법

(1) 표준지의 형상비

일반적으로 형상비(수고/흉고직경)가 높아지면 기상피해를 받기 쉬워지는 것으로 보고되고 있다(김석우 2015, 전근우 등 2013). 예를 들어 일본에서金子 (1984)는 곰솔 해안림에서 발생한 관설피해 조사결과로부터, 관설피해를 회피하기 위해 형상비 70을 목표로, 80을 상한으로 하는 관리방안을 제안하였다. 이에 따라 본 연구에서도 입목밀도와 형상비의 관계를 분석하여 곰솔임분의 관리방안을 제시하고자 하였다.

(2) 과밀현황 조건표에 의한 상대밀도 분석

일본에서 선행연구된 상대밀도 관리표를 토대로 본 연구의 결과와 비교분석을 실시하였다(小田 1984; 1992a; 1992b, Forestry and Forest Products Research Institute 2011). 원래의 상대밀도 관리표는 평균흉고직경과 상대밀도로부터 입목본수밀도를 구하는 형태로 되어 있지만, 여기서는 평균흉고직경과 입목본수밀도로부터 상대밀도를 구하는 형태를 취하고 있다(표 10). 예를 들어 입목본수밀도가 2,000본/ha, 평균흉고직경이 10cm일 경우, 상대밀도는 50%가 된다. 또한 형상비별로 평균흉고직경을 상층수고(임관의 높이)로 대체하도록 하고 있다. 예를 들어 임관의 높이가 4.9m인 경우는 3,500본/ha이면 적정하지만, 4,500본/ha에서는 본수 조정을 검토할 필요가 있으며, 6,000본/ha에서는 과밀상태이다. 마찬가지로 임관의 높이가 9.8m인 경우는 1,250본/ha이면 적정하지만, 1,500본/ha에서는 본수 조정을 검토할 필요가 있으며, 2,000본/ha에서는 과밀상태이다.

과밀현황 조건표에서 상대밀도가 60미만이면 본수 조정을 곧바로 실시할 필요는 없지만, 60~70인 경우(열은 회색)는 다소 과밀하므로, 조속히 본수 조정을 계획·실행할 필요가 있다. 또한 상대밀도가 70을 넘는 경우(진회색)는 과밀임분이다. 대상 곰솔림이 적정한 본수밀도인지 상대밀도지표를 통해 판정할 수 있고, 국내에서도 조건표에 의해 상대밀도의 대략적인 기준을 마련할 것으로 사료된다.

표 10. 일본의 흉고직경과 임관고에 따른 과밀현황 조건표

흉고 직경 (cm)	임관의 높이 (m)	상대밀도 (%)											
24	16.8												80
23	16.1											94	75
22	15.4											88	70
21	14.7											80	64
20	14.0									95		76	61
19	13.3									87		69	56
18	12.6								96	80		64	51
17	11.9								88	74		59	47
16	11.2								79	66		53	42
15	10.5							95	71	60		48	38
14	9.8							84	63	53		42	34
13	9.1						95	76	57	48		38	30
12	8.4						83	67	50	42		33	27
11	7.7						88	73	59	44		37	29
10	7.0					88	75	63	50	38		31	
9	6.3					74	64	53	42	32		26	
8	5.6				80	62	53	44	36	27			
7	4.9			86	64	50	43	36	29				
6	4.2		86	69	51	40	36	29					
5	3.5	85	64	51	38	30	29						
4	2.8	60	45	36	27	21							
임분밀도 (trees/ha)		10,000	7,500	6,000	4,500	3,500	3,000	2,500	2,000	1,500	1,250	1,000	800

출처: Forestry and Forest Products Research Institute 2011

(3) 형상비와 임관의 높이에 따른 목표본수밀도 분석

일본의 선행연구사례를 토대로 상대밀도 관리표에 의해 평균흉고직경에 대응한 목표본수를 파악하였다(小田 1984, 1992a; 1992b; Forestry and Forest Products Research Institute 2011). 즉, 각각의 형상비별로 상대밀도 관리표의 평균흉고직경을 상층수고(임관의 높이)로 대체하여 임관의 높이에 따른 목표본수를 예측하고 국내 곰솔임분 관리를 위한 기준을 제시하고자 하였다.

본수밀도를 임관의 높이 따라 제시한 표 11과 같이, 상대밀도 55%에 대응한 입목 본수밀도를 목표로 하고 있으며, 최대 상대밀도가 65%를 초과하지 않도록 본수 조정을 실시하게 되어 있다. 그리고 통상 형상비를 70으로 하는 경우를 주로 사용하지만, 형상비 60으로 할 경우의 값도 제시하였다.

표 11. 임관의 높이에 대응한 목표본수밀도

임 관 의 높 이 (m)	평 균 흉 고 직 경 (cm)	형 상 비 70		평 균 흉 고 직 경 (cm)	형 상 비 60	
		입 목 본 수			입 목 본 수	
		상 대 밀 도			상 대 밀 도	
		55% (trees/ha)	65% (trees/ha)		55% (trees/ha)	65% (trees/ha)
3.0	4.3	8,300	9,800	5.0	6,500	7,700
3.5	5.0	6,500	7,700	5.8	5,100	6,000
4.0	5.7	5,300	6,200	6.7	4,100	4,900
4.5	6.4	4,400	5,200	7.5	3,400	4,100
5.0	7.1	3,700	4,400	8.3	2,900	3,400
5.5	7.9	3,200	3,800	9.2	2,500	3,000
6.0	8.6	2,800	3,300	10.0	2,200	2,600
6.5	9.3	2,400	2,900	10.8	1,920	2,300
7.0	10.0	2,200	2,600	11.7	1,710	2,000
7.5	10.7	2,000	2,300	12.5	1,530	1,810
8.0	11.4	1,770	2,100	13.3	1,390	1,640
8.5	12.1	1,610	1,900	14.2	1,260	1,490
9.0	12.9	1,470	1,740	15.0	1,150	1,360
9.5	13.6	1,350	1,590	15.8	1,060	1,250
10.0	14.3	1,240	1,470	16.7	980	1,150
10.5	15.0	1,150	1,360	17.5	900	1,070
11.0	15.7	1,070	1,270	18.3	840	990
11.5	16.4	1,000	1,180	19.2	780	930
12.0	17.1	930	1,100	20.0	730	870
12.5	17.9	880	1,040	20.8	690	810
13.0	18.6	820	970	21.7	650	760
13.5	19.3	780	920	22.5	610	720
14.0	20.0	730	870	23.3	570	680
14.5	20.7	690	820	24.2	540	640
15.0	21.4	660	780	25.0	520	610
15.5	22.1	620	740	25.8	490	580
16.0	22.9	590	700	26.7	470	550
16.5	23.6	570	670	27.5	440	520
17.0	24.3	540	640	28.3	420	500
17.5	25.0	520	610	29.2	400	480
18.0	25.7	490	580	30.0	390	460

출처: Forestry and Forest Products Research Institute 2011

3. 결과 및 고찰

1) 임분밀도에 따른 생장특성

(1) 임분밀도와 평균 흉고직경의 관계분석

본 연구에서 수집된 표준지별 평균흉고직경과 임분밀도의 관계를 파악하고자 산점도를 도시하여 패턴을 파악하였다. 그 결과 한라산국립공원 내 위치한 표준지와 국립공원 외 애월읍에 위치한 표준지 간의 평균 흉고직경 차이가 나타났다.

전체적으로 표준지의 임분밀도는 125 ~ 1,225본/ha의 범위가 나타났으며, 한라산 국립공원의 경우 표준지별 평균 흉고직경의 범위가 18.9 ~ 66.3cm로 나타났으며, 국립공원 외 애월읍 표준지의 경우 14.9 ~ 32.9cm로 나타났다. 전체적으로 두 지역간 임분밀도에 대하여 평균 흉고직경 패턴이 차이가 나타났다.

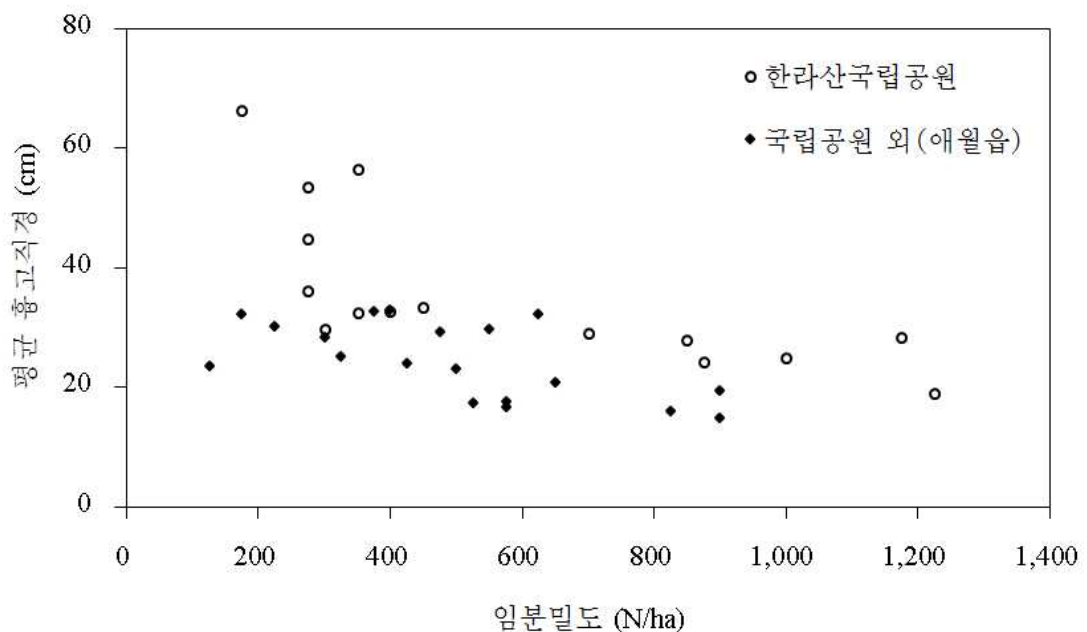


그림 8. 표준지별 임분밀도와 평균 흉고직경의 관계

(2) 임분밀도와 평균수고의 관계분석

추가적으로 표준지별 평균수고와 임분밀도의 관계를 파악하고자 산점도를 도시하고 패턴을 파악하였다. 그 결과 한라산국립공원 내 위치한 표준지와 국립공원 외 애월읍에 위치한 표준지 간의 평균수고의 차이가 나타났다.

전체적인 표준지의 임분밀도 범위(125 ~ 1,225본/ha)에 대하여 한라산 국립공원의 경우 표준지별 평균수고의 범위가 13.4 ~ 26.0m로 나타났으며, 국립공원 외 애월읍 표준지의 경우 10.8 ~ 19.3m로 나타났다. 전체적으로 두 지역간 임분밀도에 대하여 평균수고 패턴이 차이가 나타났다.

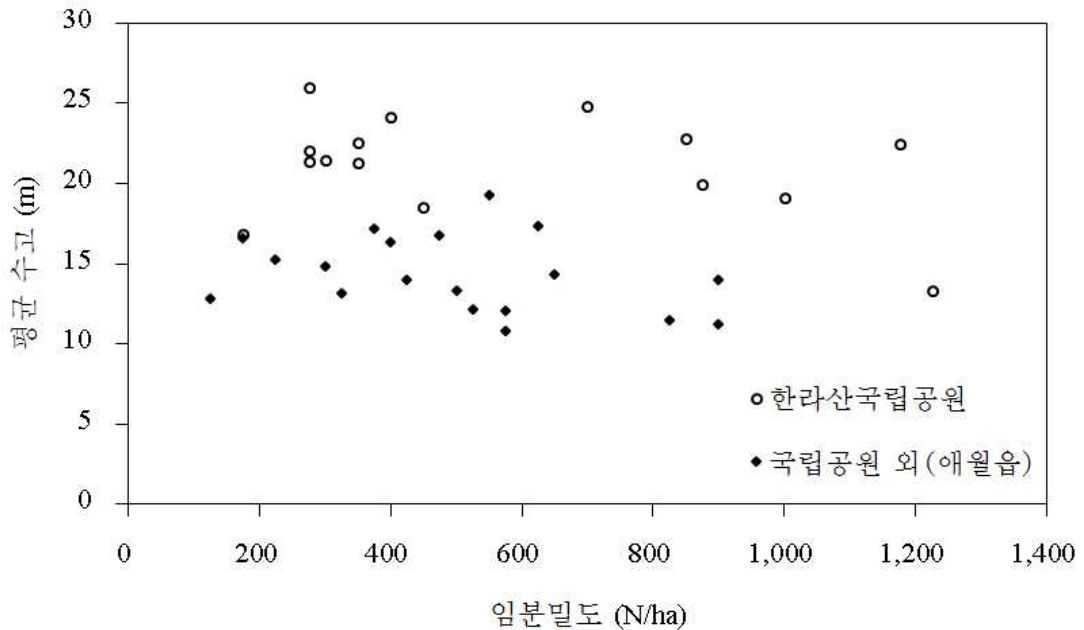


그림 9. 표준지별 임분밀도와 평균수고의 관계

(3) 임분밀도와 형상비의 관계분석

마지막으로 표준지별 형상비와 임분밀도의 관계를 산점도로 도시하여 패턴을 파악하였다. 그 결과 한라산국립공원 내 위치한 표준지와 국립공원 외 애월읍에 위치한 표준지 간의 형상비의 차이가 나타났다.

형상비를 지역별로 살펴본 결과, 한라산국립공원의 경우 26.4 ~ 88.6이었으며, 국립공원 외 애월읍 표준지의 경우 50.7 ~ 83.3으로 나타났다. 임분밀도에 대해 형상비를 가장 잘 설명하는 회귀식을 선정하여 비교분석한 결과, 한라산 국립공원의 경우 형상비 회귀선의 설명력은 0.6641이었으며, 국립공원 외 애월읍 표준지의 경우 0.5278이었다.

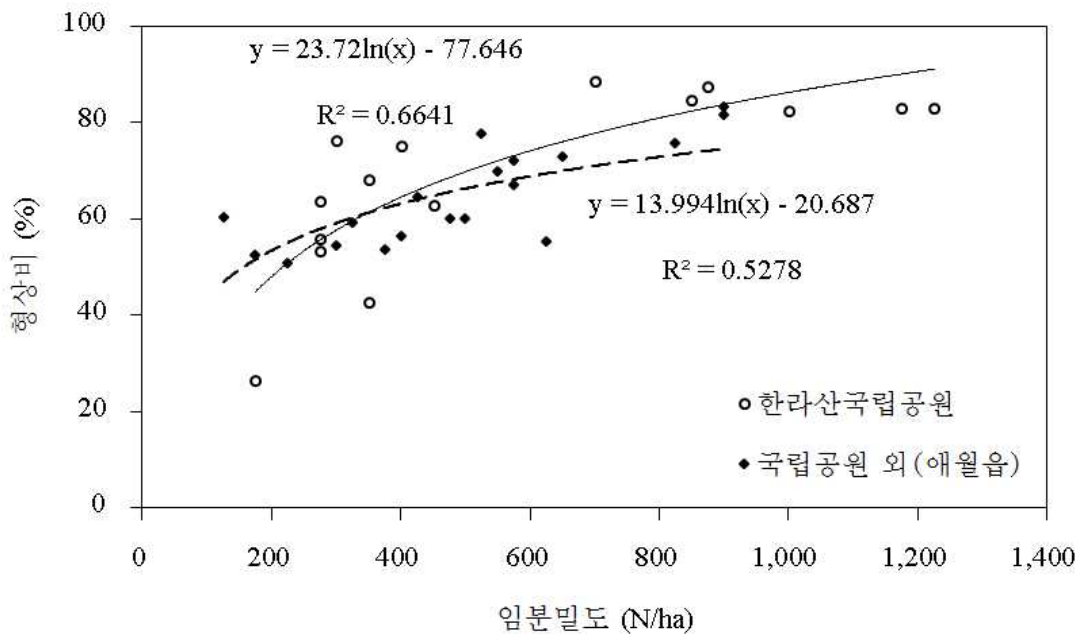


그림 10. 표준지별 임분밀도와 형상비의 관계

2) 상대밀도표에 의한 과밀도 추정

제주도 곰솔림의 흉고직경과 임목밀도와의 관계를 파악하여 곰솔림 표준지의 상대밀도를 분석하였다. 실선은 상대밀도가 적정으로 판단되는 상대밀도 60% 미만 기준선이다. 점선은 상대밀도가 밀한 것으로 판단되는 상대밀도 60~69%의 기준선이며, 파선은 상대밀도가 과밀한 것으로 판단되는 지역이며, 상대밀도 70% 이상에 대한 기준선이다.

분석결과, 한라산국립공원 내 위치한 표준지는 임분밀도가 과밀한 것으로 나타났으며, 국립공원 외 애월읍에 위치한 표준지는 임분밀도가 상대적으로 적정한 것으로 분류되었다.

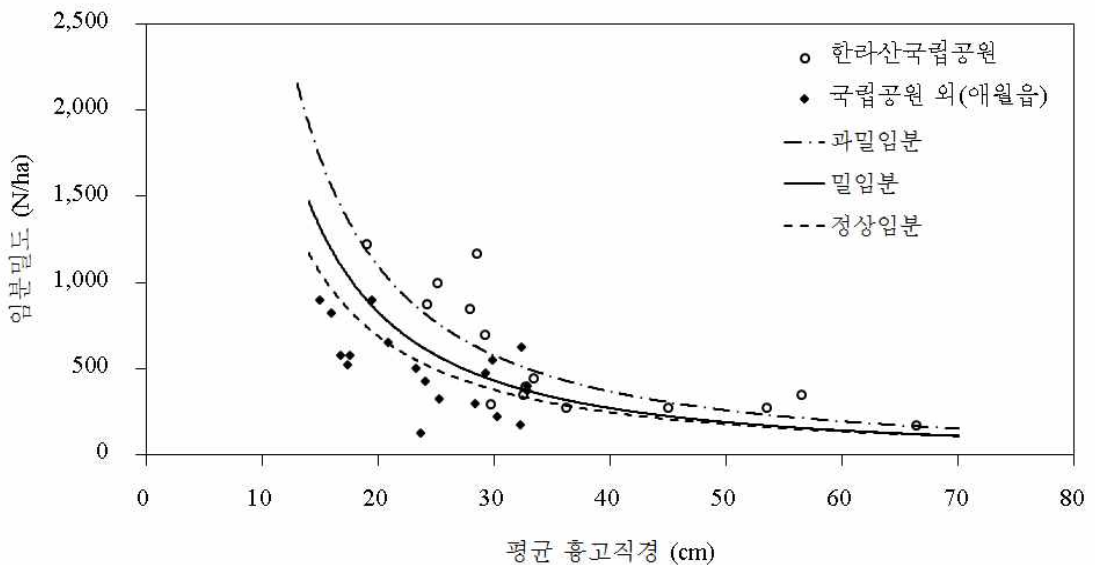


그림 11. 표준지별 임분밀도에 따른 상대밀도

표 12. 과밀현황 조건표 따른 표준지별 과밀도 판정여부

구분	흥고직경 (cm)	수고 (m)	형상비	임분밀도	과밀도 판정
한라산 국립공원	29	25	89	700	과밀
	28	23	85	850	과밀
	53	26	53	275	과밀
	32	21	68	350	적정
	33	24	75	400	밀
	30	22	76	300	적정
	24	20	88	875	과밀
	19	13	83	1225	과밀
	28	22	83	1175	과밀
	25	19	82	1000	과밀
	33	19	63	450	밀
	45	22	56	275	밀
	56	23	43	350	과밀
	66	17	26	175	과밀
	36	21	64	275	적정
국립공원 외 애월읍	30	15	51	225	적정
	32	17	52	175	적정
	23	13	60	500	적정
	24	14	64	425	적정
	30	19	70	550	밀
	28	15	54	300	적정
	19	14	82	900	밀
	21	14	73	650	적정
	17	11	67	575	적정
	24	13	60	125	적정
	32	17	55	625	과밀
	33	17	54	375	밀
	33	16	56	400	밀
	16	12	76	825	적정
	15	11	83	900	적정
	29	17	60	475	밀
	25	13	59	325	적정
	17	12	78	525	적정
	18	12	72	575	적정

3) 형상비와 임관의 높이에 따른 목표본수밀도 분석

(1) 형상비 60기준 목표본수밀도

목표본수밀도 분석에 대하여 일본의 선행연구를 참고하여 비교분석을 실시하였다. 상대밀도 관리표에 의하여 산출된 목표본수를 비교하였으며, 형상비와 임관의 높이에 따라 분석하였다. 분석된 결과를 토대로 형상비·임관의 높이별 목표본수를 예측하였다.

표준지별 형상비 60을 기준으로 목표본수밀도를 도시하였다. 도시된 점선은 상대밀도 55%에 대한 기준선이며, 실선은 65%에 대한 기준선이다. 분석결과, 한라산국립공원 지역의 표준지들의 목표본수밀도를 위하여 본수조절이 필요한 것으로 나타났다.

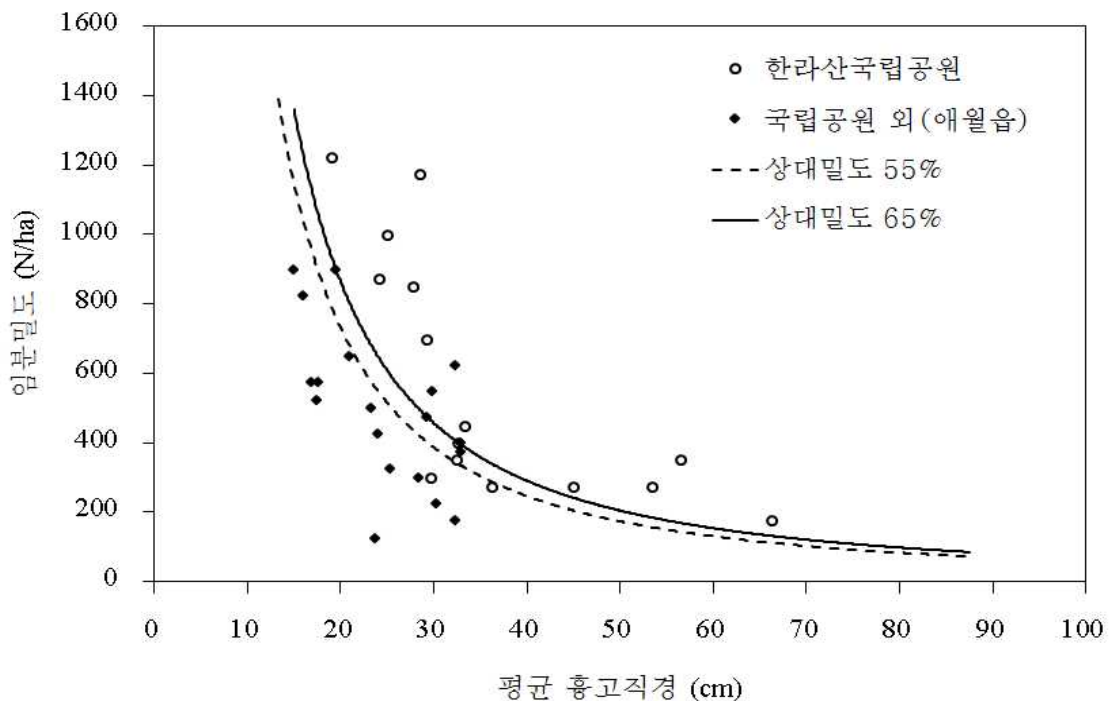


그림 12. 표준지별 형상비 60에 따른 상대밀도

(2) 형상비 70기준 목표본수밀도

또한 표준지별 형상비 70을 기준으로 목표본수밀도를 도출하였다. 도출된 점선은 상대밀도 55%에 대한 기준선이며, 실선은 65%에 대한 기준선이다. 형상비 60일때와 유사한 패턴의 목표본수밀도 기준선이 도출되었다. 본수조절이 필요한 것으로 나타난 표준지 또한 형상비 60기준과 마찬가지로 한라산국립공원 지역의 표준지로 나타났다.

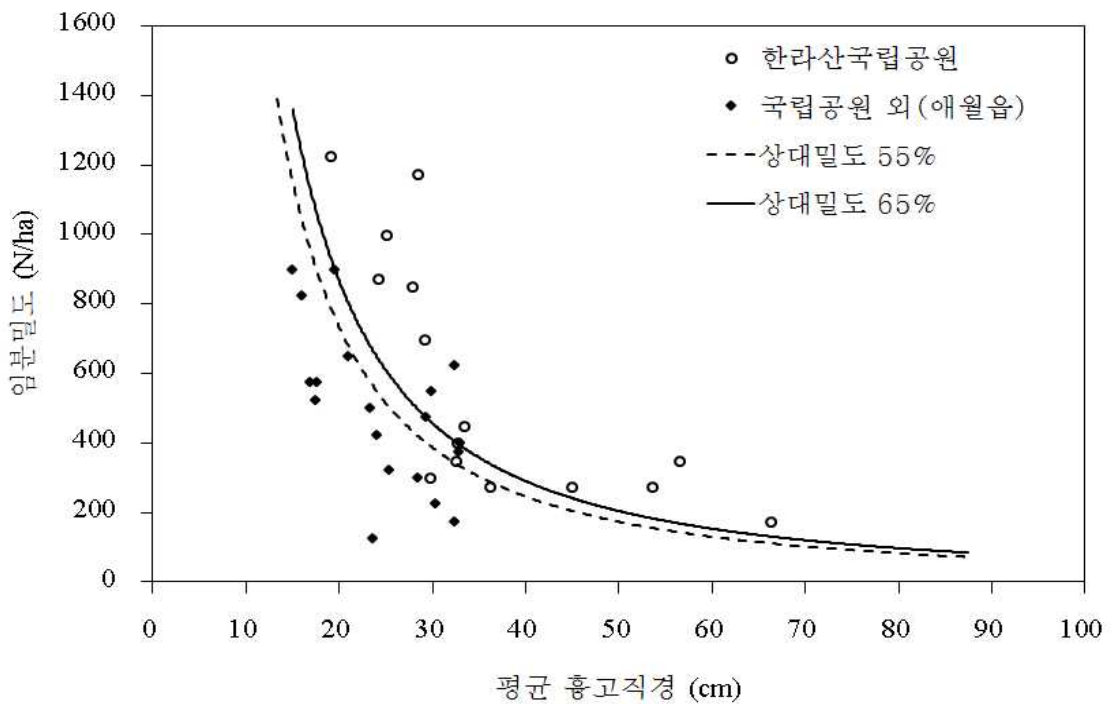


그림 13. 표준지별 형상비 70에 따른 상대밀도

V. 곰솔림 피해목의 공간적 분포변화 모니터링

1. 서론

소나무재선충병(Pine Wit Disease)은 전세계적으로 어떤 산림 병충해보다 큰 피해를 입히고 있으며, 피해증상이 6일 이내에 나타나고, 1년 이내에 감염목 중 80%가 고사할 정도로 확산속도가 빠르고 피해규모가 확대되고 있다(정영진 2002; 김소라 등 2013). 우리나라는 1998년 부산 금정산 지역 일대에 발생하여 전국 80개 시·군에 급속하게 확산되었으며, 2014년 10월 말 기준, 총 802만 본의 임목이 고사하였다(산림청 2014a). 2005년에는 「소나무재선충병 방제특별법」을 제정·시행하여 적극적인 방제활동으로 재선충병 피해가 점차 감소하였으나, 최근 2011년 다시 급증하고 있는 추세이다(문일성 2014). 제주도는 2014년 기준 소나무재선충병 감염목이 약 31만 본으로 제주도 전체 소나무림이 약 40%가 피해를 입었으며, 전국 17개 시·도에서 두 번째로 소나무재선충병 피해가 심각한 지역이다(이요한 등 2014). 제주도는 재선충병 피해가 극심 피해지역으로 분류되어 있으며, 2013년부터 적극적인 방제활동을 임하고 있지만, 계속되는 확산으로 인하여 어려움을 겪고 있다(숲과 문화 2015). 특히, 소나무 재선충병은 인위적·자연적 요인으로 인하여 이동이 가능하여 피해확산의 예측이 불가능하다. 또한, 피해목의 공간적 분포특성도 발생초기에는 단목을 중심으로 점상으로 산재하여 발생하기 때문에 정확한 피해 확산정도 및 예측이 불가능한 실정이다(김동운 2008).

지금까지 재선충병 피해지의 분포특성에 관련된 연구를 보면, 김준범 등(2003, 2004)은 IKONOS 영상과 항공사진을 이용하여 소나무 재선충병 지역을 추출하였으며, 양경락(1989)은 Landsat TM영상을 이용하여 솔잎혹파리 지역을 추출하였다. 또한, 김응남과 김대영(2008)은 근적외선 디지털 카메라를 이용하여 소나무 재선충병 피해를 조사하였으며, 이정빈 등(2014)은 지상용 초분광 카메라를 이용하여 소나무 재선충병 감염목의 추출을 연구하였다. 그러나 지금까지의 연구는 원격탐사 자료를 활용하여 대면적 이나 일부 지역에 대한 소나무재선충병의 피해지역을 추출하고 분석하는 방법이 대부분을 차지하고 있다. 소나무 재선충병은 점상의 형태로 산림에

서 산재하여 발생하기 때문에 원격탐사자료를 이용한 피해지 파악은 참조자료로 활용이 가능하지만, 직접적인 공간분포 및 패턴 파악에는 어려움이 있다.

따라서, 본 연구는 실제 제주도의 애월읍에서 발생한 2013년부터 2015년 까지 소나무재선충병 피해목 조사정보를 이용하여 피해목의 다양성 분석 및 GIS 공간분석 기능을 이용한 소나무재선충병의 시·공간적 분포특성의 파악을 목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

1) 연구대상지

(1) 일반현황

본 연구는 제주도의 북서쪽에 위치한 애월읍의 재선충병 피해지 중 애월 1사업구와 애월 3사업구를 대상으로 하였다. 애월읍은 제주도의 12개 읍·면 중 면적이 가장 넓으며, 제주시와 인접하여 도시와 농촌의 성격을 동시에 지니고 있다(정광중 2013).

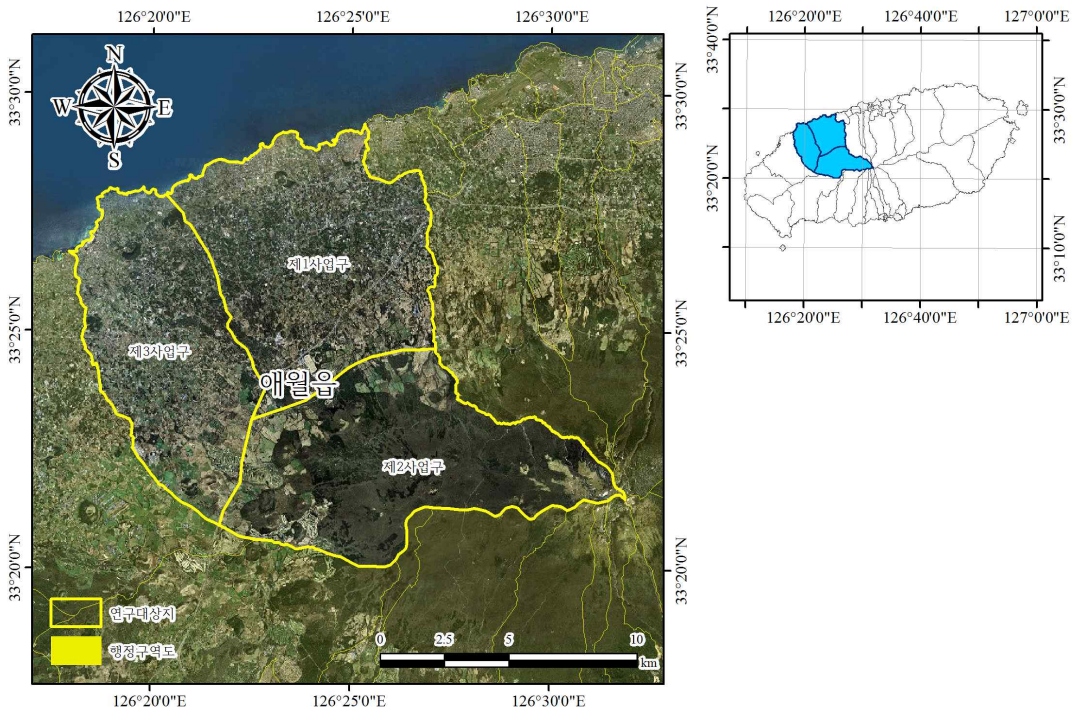


그림 14. 재선충병 피해 연구대상지

(2) 산림현황

애월읍의 산림면적은 약 7,920ha로 애월읍 전체 면적의 약 39%를 차지하며, 제주도 전체 산림의 약 9%를 차지하여 산림의 비율이 높다. 임상분포는 활엽수림이 약 51%로 가장 높았으며, 침엽수림과 혼효림의 순으로 분포하였다. 또한, 영급분포는 V영급이 약 42%로 가장 높았으며, IV영급과 V영급의 면적이 전체 산림면적의 약 83%를 차지하여 매우 높았다(임업진흥원 2015).

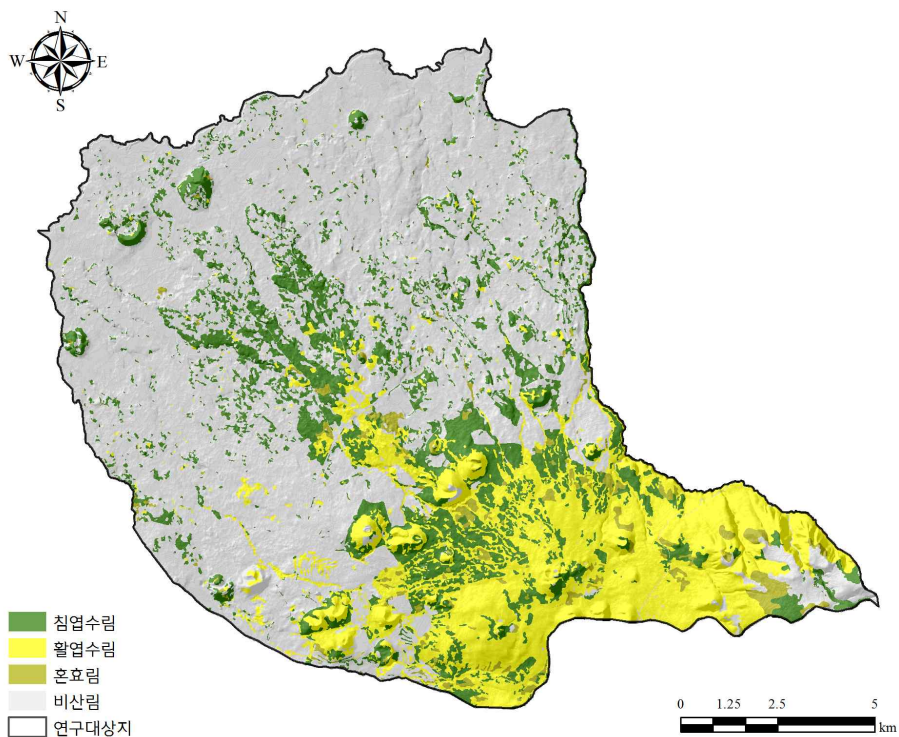


그림 15. 연구대상지 임상분포도

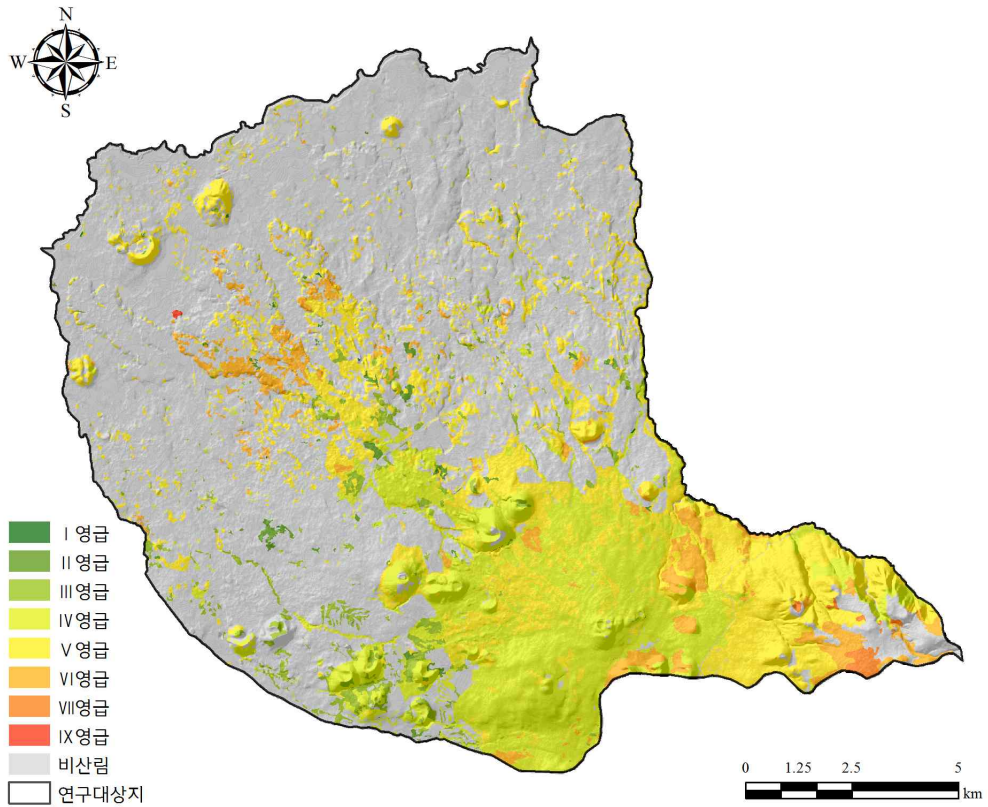


그림 16. 연구대상지 영급분포도

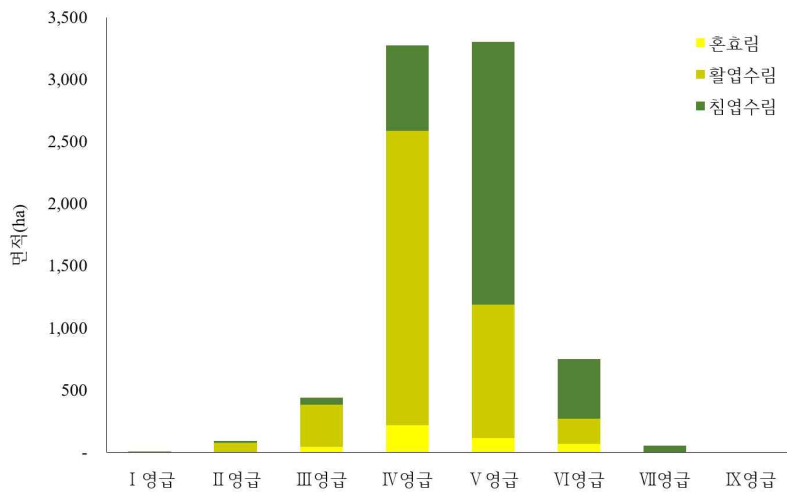


그림 17. 연구대상지 영급별 임상분포

2) 연구자료

(1) GIS 자료

GIS 자료는 산림청에서 제공받은 수치지형도, 행정구역도를 이용하였으며, 도로망도는 국가교통정보센터로부터 제공받았다(표 13). 수치지형도는 1:25,000 축척으로 제작된 GIS 정보로 지면의 기복, 형태, 지명 등의 정보를 문자나 기호, 속성정보를 이용하여 제작된 자료이다. 1:25,000의 수치지형도는 국토개발, 토지이용, 산림개발 등 다양한 분야에서 지리정보의 분석을 위하여 활용되고 있다. 행정구역도는 행정구역을 나타낸 지도로 지역코드가 같은 필지끼리 통합하여 제작되었다. 본 연구에서는 제주도의 읍·면단위의 행정구역도와 리단위의 행정구역도를 사용하였다. 도로망도는 GIS로 구축된 도로정보로 고속도로, 일반국도, 지방도의 정보가 기록되어 있다.

표 13. 곰솔림의 공간분석을 위한 GIS 자료

구분	자료	비고
GIS 자료	수치지형도	산림청
	행정구역도	
	도로망도	국가교통정보센터

(2) 현장조사 자료

현장조사 자료는 2013년부터 2015년까지 직접 조사한 애월읍의 소나무재선충병 피해로 인하여 제거된 임목의 데이터를 사용하였다. 현장조사는 피해목의 수종과 경급정보를 측정하였으며, GPS 장비를 이용하여 피해목의 위치정보를 측정하였다. 애월읍의 재선충병에 의한 피해로 제거된 임목은 총 106,815본이며, 경급은 평균 33.8cm로 경급이 큰 대경목에서 많이 발생하였다(그림 18).

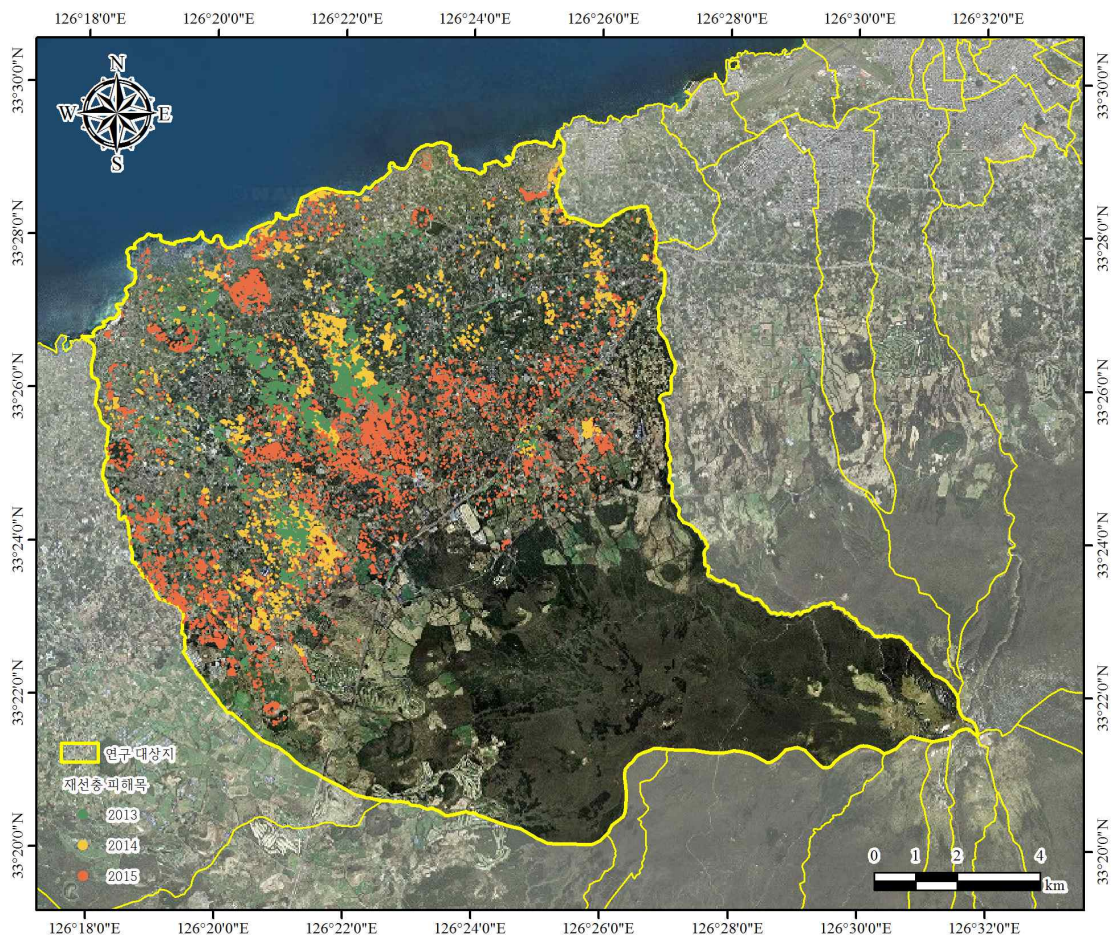


그림 18. 재선충병 피해목 발생 분포도

3) 연구방법

재선충병 피해목의 GIS DB는 재선충병 피해목 현장조사 정보의 피해목 위치와 경급정보를 이용하였으며, 통계적 분석방법을 이용하여 재선충병 피해목의 공간적 분포특성을 분석하였다. 또한, 도로망도와 행정구역도를 이용한 공간스케일에 따른 재선충병 피해목의 다양성 평가를 실시하였다. 재선충병 피해목의 다양성 평가는 Shannon- Weaver Index, Simpson Index, Evenness Index, Dominance Index를 사용하였으며, 다양성 지수는 공간스케일을 변화하여 분석하였다. 마지막으로 Cluster 분석을 이용하여 지역별 재선충병 피해목의 분포특성을 분석하였으며, 분석방법은 비계층적 군집분석 중 널리 사용되는 K-means 기법을 적용하였다.

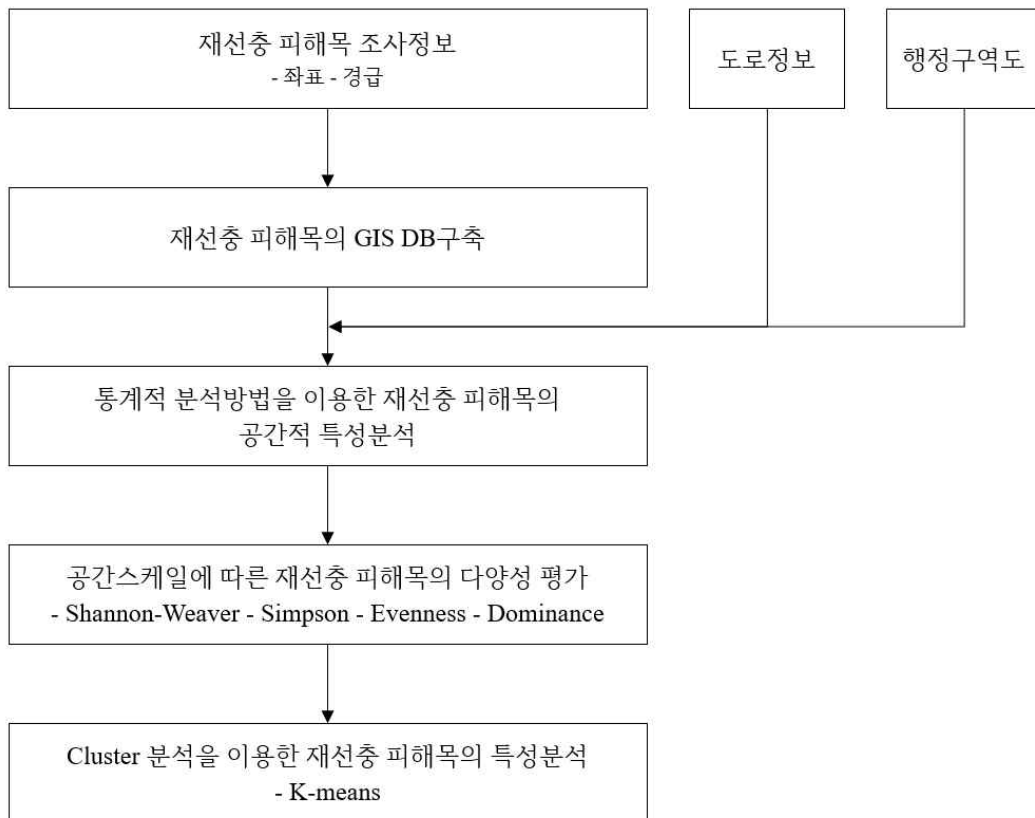


그림 19. 재선충병 피해지의 특성분석방법

(1) 통계적 분석방법을 이용한 재선충병 피해목의 공간적 패턴분석

수집된 재선충병 피해목은 Point 형태의 데이터로 공간적인 분포 패턴을 분석하기 위하여 공간통계분석을 실시하였다. 본 연구는 공간통계분석에서 널리 활용되고 있는 표준편차타원체(Standard deviational ellipse)와 평균중심점(Mean center)분석을 이용하였다.

(1) 표준편차타원체 분석(Standard deviational ellipse)

표준편차 타원체 분석은 점 데이터들의 거리간의 산술적 평균과 표준편차 거리를 이용하여 타원체를 도식화하는 방법으로 데이터들의 중심화 경향, 분산 및 방향성을 파악할 수 있다(차경현 등 2014). 본 연구에서는 표준편차타원체 분석을 통하여 지역별 소나무 재선충병 피해목의 집중도 및 방향성을 파악하였다.

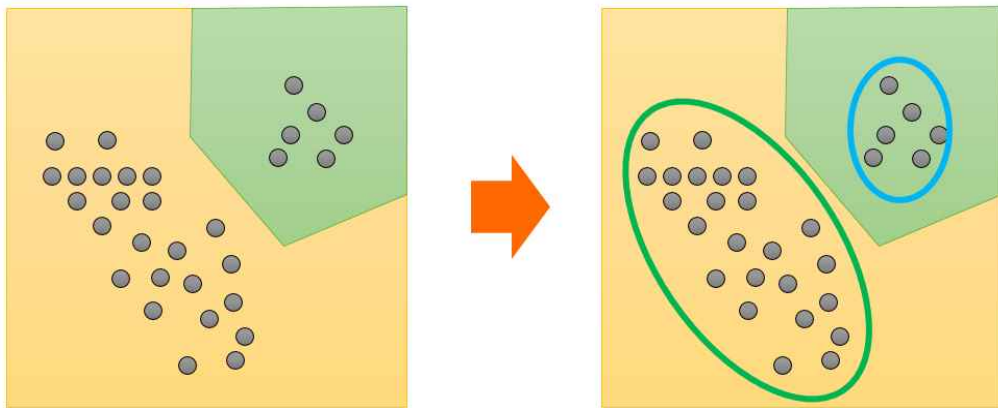


그림 20. 표준편차타원체 분석방법의 개념도

(2) 평균중심점(Mean center)분석

평균중심점 분석은 일반적으로 공간적 패턴의 집중정도를 분석하기 위하여 널리 사용되고 있다. 분석방법은 측정된 데이터의 X, Y 좌표의 평균을 산출하는 방법으로 산재되어 있는 점들의 위치를 파악 할 수 있다(김정희 2012). 본 연구에서는 평균중심점 분석을 통하여 시계열에 따른 소나무 재선충병의 분포 패턴을 파악하였다.

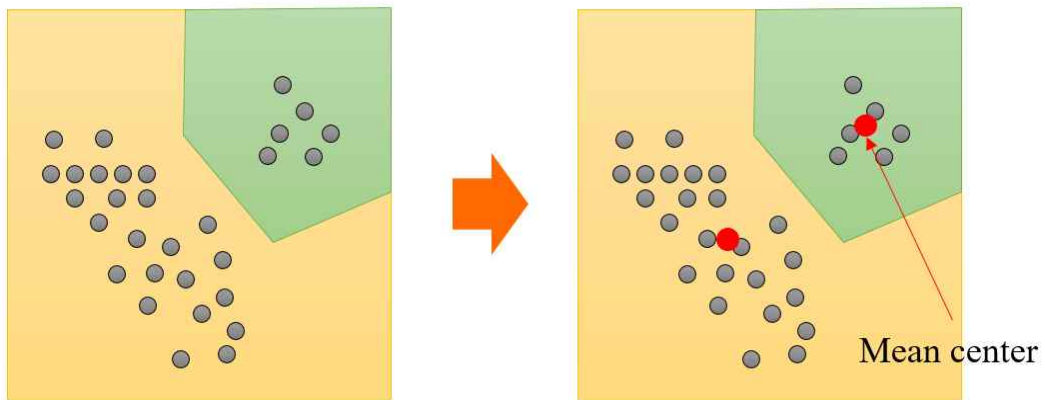


그림 21. 평균중심점 분석방법의 개념도

(2) 소나무재선충병 피해목의 재적추정

소나무재선충병 피해목의 재적추정을 위하여 측정된 입목의 흉고직경과 수고를 사용하였다. 흉고직경은 현장에서 수집된 경급정보를 이용하였으며, 수고는 본 연구에서 개발된 수고추정식 중 적합성이 가장 높았던 Exponential 모델식을 적용하여 수고를 계산하였다.

표 14. 곰솔의 재적추정을 위한 적용수고모델

모델명	함수식
Exponential	$HT = 1.2 + 22.7684 \times e^{\frac{-35.6355}{(DBH + 22.2943)}}$

곰솔의 재적은 흉고직경과 수고를 이용하여 국립산림과학원에서 개발된 이변수 재적식을 적용하였다(산림청 1998). 이변수 재적식은 4-10cm 직경급과 12cm 이상의 직경급 구간으로 나누어 개발된 식을 적용하였다.

표 15. 흉고직경과 수고를 이용한 곰솔재적추정식

구분	재적식
4-10cm	$0.00006172 \times DBH^{1.8113} \times HT^{0.9345}$
12cm 이상	$0.00006803 \times DBH^{1.8708} \times HT^{0.9149}$

(3) 공간스케일에 따른 재선충병 피해목의 다양성 지수 산출

(1) 공간스케일 설정

공간스케일은 대상의 기준점에서 X, Y축을 따라 생성되는 공간의 단위를 말하며, 어떠한 대상을 연구하기 위하여 하나의 스케일만 분석하는 것이 아니라 다양한 스케일의 분석을 통하여 연구대상의 공간적 구조를 파악할 수 있다. 공간스케일이 증가 할수록 세부적인 내용이 사라지지만, 큰 스케일에서 대상의 구조를 파악하기 용이하다(Lindeberg 1994). 본 연구의 공간스케일은 5 by 5, 7 by 7, 9 by 9의 총 3가지 스케일로 설정하였다. 공간스케일은 10m × 10m의 격자 셀로 구성되어 있으며, i+n, j+n행렬에서 중심 점 i,j의 값을 구하기 위해 병렬방식으로 계산하였다. 다양성 지수를 산출하기 위해 i^2 의 셀이 사용되며, 스케일면적은 5 by 5의 경우, 약 0.25ha, 가장 큰 스케일인 9 by 9 스케일의 경우, 약 0.81ha이다.

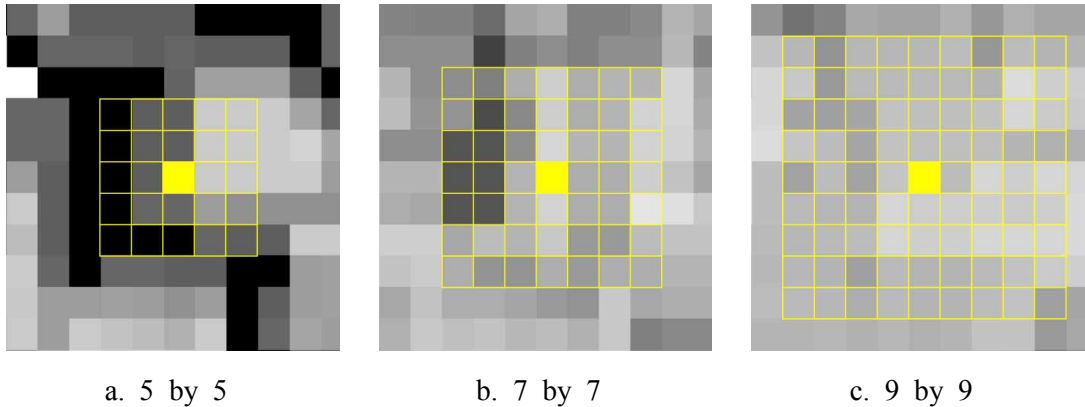


그림 22. 피해특성 분석을 위한 공간스케일 설정

(2) 다양성 지수 산출

생물다양성의 평가를 위한 지수는 크게 종의 수를 바탕으로 군집의 상태를 나타내는 종 풍부도(Rechiness), 각 지수의 최대치에 대한 실제치의 비율로서 표현되는 균등도(Evenness), 표본점에서 종의 편중정도를 나타내는 우점도(Dominance) 등이 있다(김성훈 등 2007). 본 연구에서는 피해목의 다양성을 평가하기 위하여 가장 널리 이용되고 있는 Shannon-Weaver Index, Simpson's Index, Evenness Index (균등도), Dominance Index (우점도)를 이용하였다.

(가) Shannon-Weaver Index

Shannon-Weaver Index(1964)는 Margalef(1958)의 정보이론(Information theory)에 의하여 개발된 지표이며, 생물군집의 종 풍부도와 개체수의 상대적 균형성을 뜻하는 것으로 군집의 복잡성을 나타낸다(김귀곤과 조동길 2004).

$$-\sum(P_i \times \log P_i) \dots\dots\dots (식1)$$

P_i : 표본점에서 종 i의 개체 수/표본점에서 모든 종의 총 개체 수

(나) Simpson's Index

Simpson's Index(1949)는 1949년 Edward H. Simpson에 의하여 개발된 지표로 어떤 집단에서 임의로 선택된 두 개체가 같은 유형에 속할 확률을 나타낸다. Simpson's Index는 0은 무한한 다양성, 1은 비다양성을 나타낸다(고은정과 안건혁 2014).

$$1 - \left(\frac{\sum n(n-1)}{N(N-1)} \right) \dots\dots\dots(\text{식2})$$

n : 특정 종의 총 개체수
 N : 총 종수

(다) Evenness Index (균등도)

균등도는 각 지수의 최대치에 대한 실제치의 비로 산출되며, 각 다양도 지수는 군집내 모든 종의 개체수가 동일할 때 최대가 되므로 결국 균등도 지수는 군집 내 종구성의 균일한 정도를 나타내는 지표이다(Pielon 1975).

$$\frac{H'}{\log S} \dots\dots\dots(\text{식3})$$

H' : Shannon-Wiener의 최대 종 다양성지수
 S : 총 종수

(라) Dominance Index (우점도)

우점종이 군집에서 가지는 상대적인 비를 산출한 지표이며, 각 조사지점별 개체수의 현존량에 의하여 우점도를 산출한다(McNaughton 1967; 전일권 등 2010).

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (n_i) \dots\dots\dots (식4)$$

n_i : i 번째 종의 개체수
 N : 총 개체수

(4) Cluster 분석을 이용한 재선충병 피해목의 특성분석

클러스터 분석(Cluster Analysis)는 대상들이 가지고 있는 다양한 속성의 유사도(Similarity)를 바탕으로 유사한 특성을 가지는 집단끼리 묶어주는 방법이며, 이 방법은 다수의 대상을 몇 개의 집단으로 구분하여 집단 내에 속해 있는 공통적인 특성을 순석할 수 있다는 장점을 가진다(송민경과 장훈 2010). 특히, 클러스터 분석은 원격탐사 등의 분야에서 화상데이터를 해석할 때, 무감독분류라고 하는 분류방법의 하나로 영상의 화소값에 기초하여 그룹을 짓는 처리과정이다(Lo and Yeung 2002). 본 연구는 재선충병 피해목의 분포특성을 분석하기 위하여 무감독분류 방법 중 K-means 방법을 군집분석을 실시하고 지역별 분포특성을 분석하였다.

(1) 인자선정

군집분석을 위한 인자는 재선충병 피해목의 도로 및 주거지로부터의 거리, 피해목 분수밀도, 피해목의 단면적밀도를 이용하여 분석하였다. 도로 및 주거지로부터의 거리는 산림청(2007)에서 제시한 주요 예찰장소 정보를 고려하여 선정하였다. 모든 인자의 정보는 30m × 30m의 래스터 정보로 변환하여 이용하였다.

(2) 표준화

재선충병 피해목의 클러스터 분석을 위한 인자는 서로 다른 단위와 형태를 가지고 있어 0~1까지의 값을 가지도록 표준화를 실시하였다. Z 는 표준화된 값이며, x_{ij} 는 래스터 파일에서 i, j 위치의 표본의 값을 의미한다.

$$Z = \frac{x_{ij} - \text{Min}(x_{ij})}{\text{Max}(x_{ij}) - \text{Min}(x_{ij})} \dots\dots\dots (식5)$$

(3) K-means 분석

K-means 알고리즘은 군집분석에 가장 일반적으로 사용되는 알고리즘이다. K-means는 대상의 패턴이 속하는 클러스터의 중심과의 평균 거리를 최소화하는 방법이다(McQueen 1967). K-means 방법의 절차는 다음과 같다. 먼저, 일정한 규칙에 의하여 Krodml 클러스터의 중심 또는 초기분할을 랜덤으로 선택하고, 이들의 각각의 그룹의 대표로 선정한다. 각 객체에서 K개의 군집 중심좌표와의 거리를 산출하여 가장 가까운 군집에 그 객체를 배정하고, 새로운 군집에 대한 중심좌표를 산출한다. 마지막으로 새로 산출된 중심의 좌표값과 이전 좌표값을 비교하여 중심이 더 이상 변하지 않을 때 까지 반복한다(이신원과 이원휘 2011). 본 연구에서는 클러스터의 K값을 6개로 지정하고, 30번을 반복하여 분류를 실시하였다.

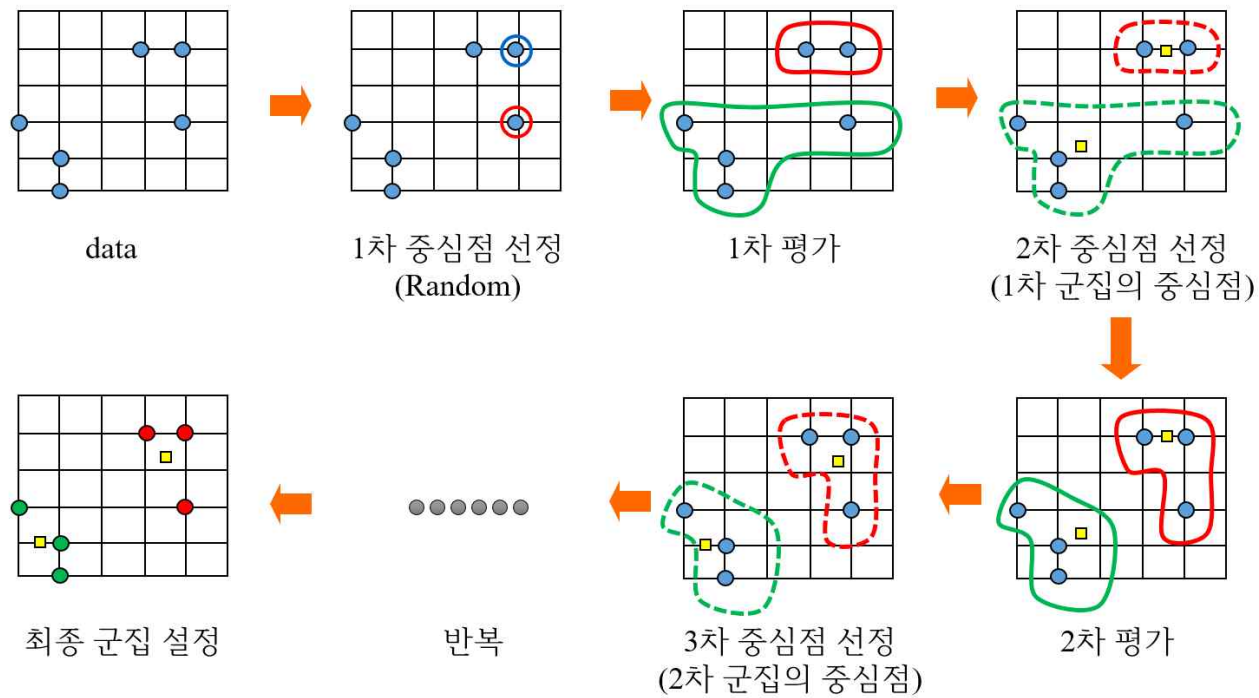


그림 23. 피해목 공간분석방법의 개념도

3. 결과 및 고찰

1) 통계적 분석방법을 이용한 재선충병 피해목의 공간적 패턴분석

(1) 재선충병 피해목의 분포특성

(1) 행정구역별 피해목 분포

2013년부터 2015년까지 제주 애월읍의 재선충병 피해목은 약 10만본이며, 2015년 발생한 피해목은 전체 피해목의 약 47%로 가장 높았다. 2015년 발생한 피해목은 2013년 대비 약 2.1배가 증가하였으며, 2013년부터 꾸준히 증가하고 있다. 행정구역(리)별 분포를 보면, 상가리는 전체 피해목 대비 약 18%로 가장 높았으며, 다음으로 어음리, 봉성리의 순으로 분포하였다. 특히, 2015년 봉성리에서 발생한 피해목은 같은 지역 2013년 대비 약 8.6배가 증가하여 재선충병에 의한 피해가 극심한 것으로 판단된다(그림 24, 표 16).

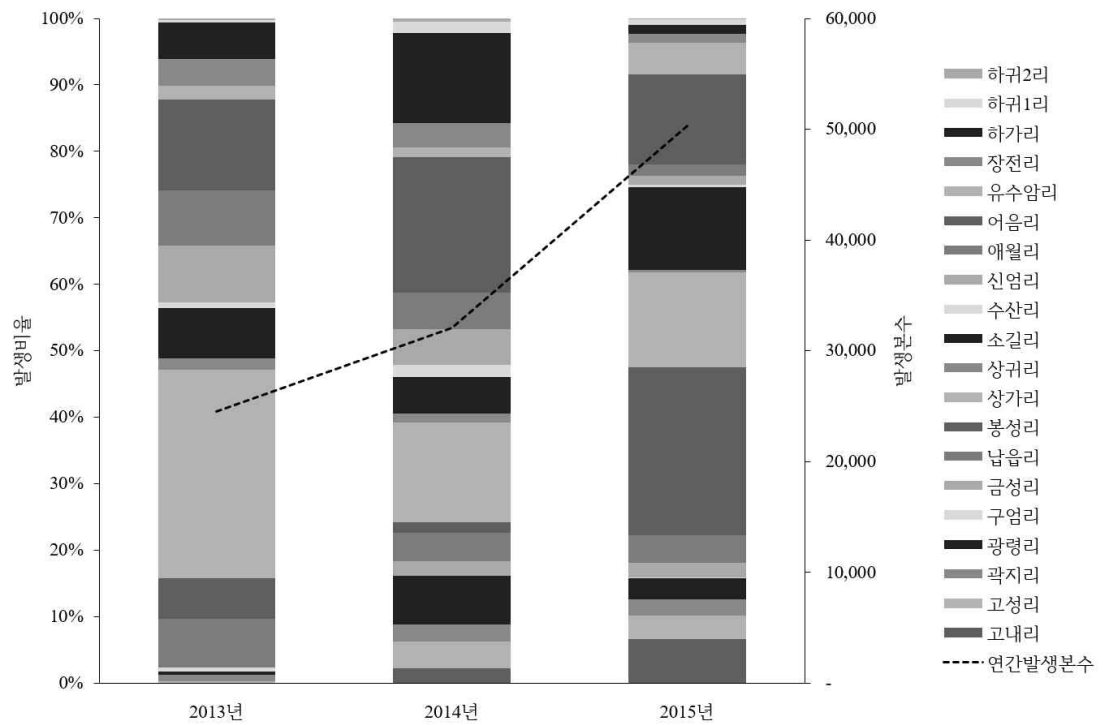


그림 24. 시계열에 따른 재선충병 피해목 발생분포

표 16. 연도별 애월읍의 행정구역에 따른 재선충병 피해목 발생분포

(단위 : 본)

행정구역(리)	2013년	2014년	2015년	합계
고내리	-	706	3,357	4,063
고성리	57	1,281	1,740	3,078
곽지리	235	837	1,266	2,338
광령리	147	2,337	1,557	4,041
구엄리	142	11	54	207
금성리	1	718	1,129	1,848
납읍리	1,785	1,342	2,062	5,189
봉성리	1,487	506	12,747	14,740
상가리	7,694	4,836	7,155	19,685
상귀리	421	413	171	1,005
소길리	1,875	1,776	6,273	9,924
수산리	214	582	196	992
신엄리	2,068	1,690	633	4,391
애월리	2,044	1,760	866	4,670
어음리	3,345	6,542	6,821	16,708
유수암리	515	489	2,434	3,438
장전리	991	1,146	656	2,793
하가리	1,362	4,360	670	6,392
하귀1리	75	527	452	1,054
하귀2리	59	165	35	259
합계	24,517	32,024	50,274	106,815

(2) 직경급에 따른 피해목 분포

직경급에 따른 피해목 분포는 20~30cm의 직경급에서 전체 피해목 발생분수의 약 25%를 차지하여 가장 높았으며, 다음으로 30~40cm, 40~50cm의 순으로 분포하였다. 재선충병 피해목은 대경목 이상의 우량한 임목에서 피해가 많이 발생하였으며, 특히, 직경 80cm 이상의 임목에서도 780본이 발생하였다(표 17).

표 17. 연도별 직경급에 따른 재선충병 피해목 분포

(단위 : 본)

직경급(cm)	2013년	2014년	2015년	합계
10 이하	116	71	347	534
10 ~ 20	2,089	6,414	10,160	18,663
20 ~ 30	4,763	8,676	13,529	26,968
30 ~ 40	5,281	6,605	11,512	23,398
40 ~ 50	5,241	6,266	8,343	19,850
50 ~ 60	3,536	2,550	4,014	10,100
60 ~ 70	2,157	1,079	1,608	4,844
70 ~ 80	880	268	530	1,678
80 ~ 90	330	95	178	603
90 ~ 100	84	-	33	117
100 이상	40	-	20	60
합계	24,517	32,024	50,274	106,815

(3) 도로접근성에 따른 분포

도로접근성에 따른 재선충병 피해목의 발생분포는 도로로부터 100m 이하의 지역에서 전체 피해목발생의 약 22%로 가장 높았으며, 100~200m, 200~300m의 순으로 분포하였다. 재선충병 피해목은 도로로부터 접근성이 높을수록 피해목이 발생이 높았다. 또한, 연도별 발생 분포를 보면, 2013년은 900m 이상의 지역에서 피해목의 발생이 없었으나, 2014년 이후부터 1km 이상의 지역에서도 피해목이 발생하여 재선충병 피해목이 점차 확산되고 있는 것으로 판단된다(그림 25).

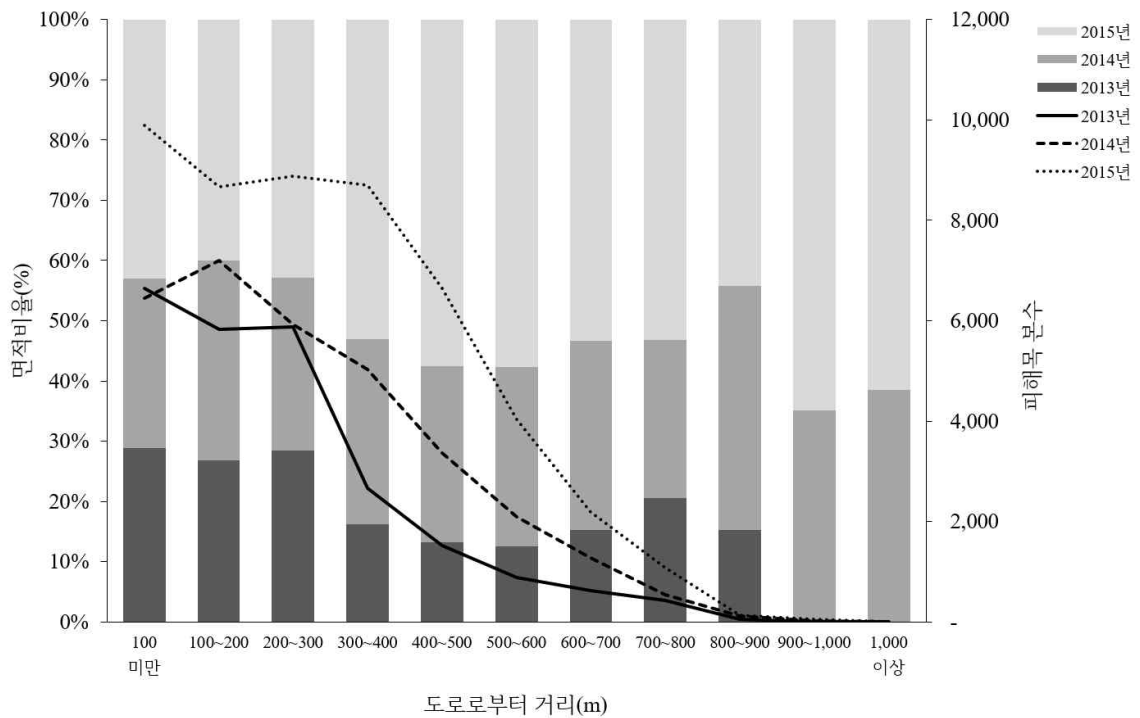


그림 25. 도로접근성에 따른 재선충병 피해목 분포

(4) 주거지접근성에 따른 분포

주거지접근성에 따른 피해목의 분포는 주거지로부터 100~200m 지점에서 전체 피해목 발생의 약 26%가 발생하여 가장 높았으며, 10m 미만, 200~300m 지역의 순으로 분포하였다. 특히, 주거지로부터 500m 이하의 지역에서 전체 발생의 약 81%를 차지하여 주거지로부터 접근성이 높은 지역에 피해목이 많이 발생하였다. 또한, 연도별 발생분포를 보면, 2013년은 1km 이상의 지역에서 326본이 발생하였으나, 2014년이 1,767본, 2015년이 3,671본이 발생하여 도로로부터 접근성과 유사하였다. 도로와 주거지의 접근성 분석을 통하여 재선충병 피해목이 점차 넓은 지역으로 확산되고 있는 것으로 판단된다(그림 26).

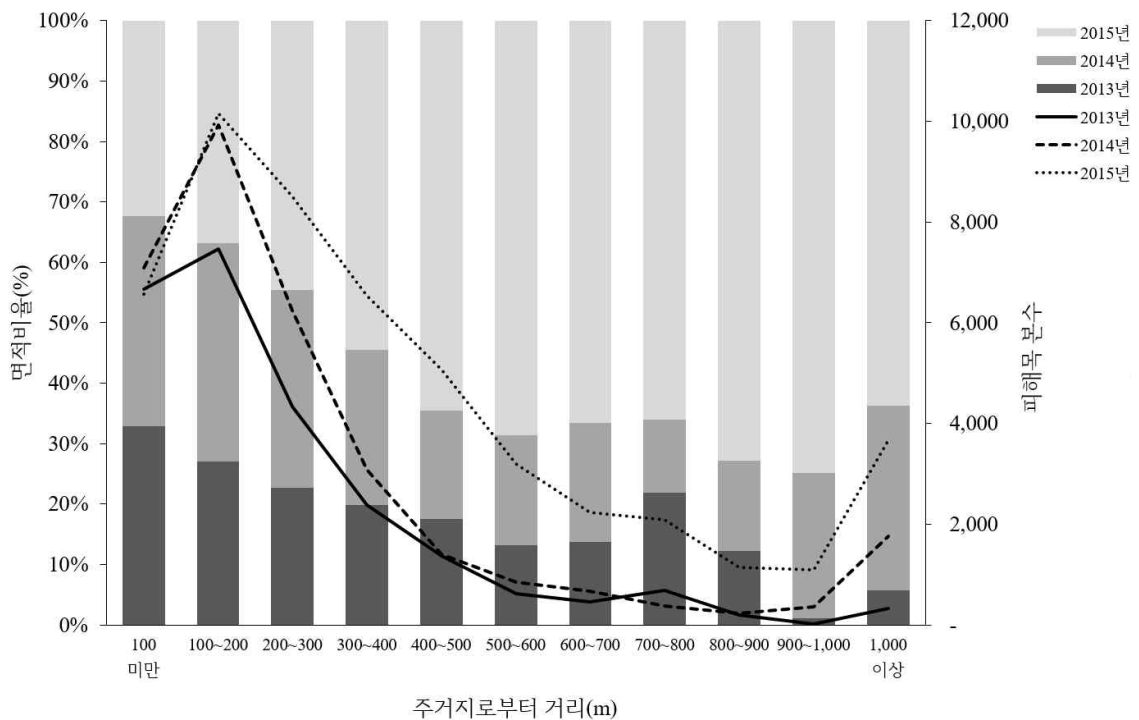


그림 26. 주거지접근성에 따른 재선충병 피해목 분포

2) 통계적 기법을 이용한 재선충병 피해목의 공간적 분포특성

(1) 표준편차타원체 분석을 이용한 행정구역별 분포특성

표준편차 타원체 분석을 이용하여 재선충병 피해목의 분포를 분석한 결과, 타원체의 넓이의 합은 2015년이 약 4,664ha로 가장 높았으며, 2013년부터 증가하였다. 또한, 2013년에서 2014년은 약 320ha가 증가하였으나, 2014년에서 2015년 사이에 약 1,514ha가 증가하여 2014년과 2015년 사이에 피해목이 급격하게 증가하였다. 시계열에 따른 행정구역단위(리)로 분석한 결과, 2013년은 평균면적이 약 150ha의 면적 분포를 보였으며, 봉성리와 고성리를 제외한 대부분의 지역이 폭이 좁고 타원체의 크기가 작아 재선충병의 피해가 좁은 지역에서 발생한 것으로 판단되다. 2014년은 평균면적이 약 158ha로 2013년과 비교하여 면적과 분포특성이 유사하였다. 한편, 2015년은 평균면적이 약 233ha로 2014년과 비교하여 약 1.5배 넓어졌으며, 표준타원체의 모양이 기존의 좁고 가는 타원체에서 완만하고 둥근 모양으로 면적이 넓게 분포하였다. 2015년 재선충병 피해목의 분포가 넓은 지역에서 균일하게 분포한 것으로 판단되다.

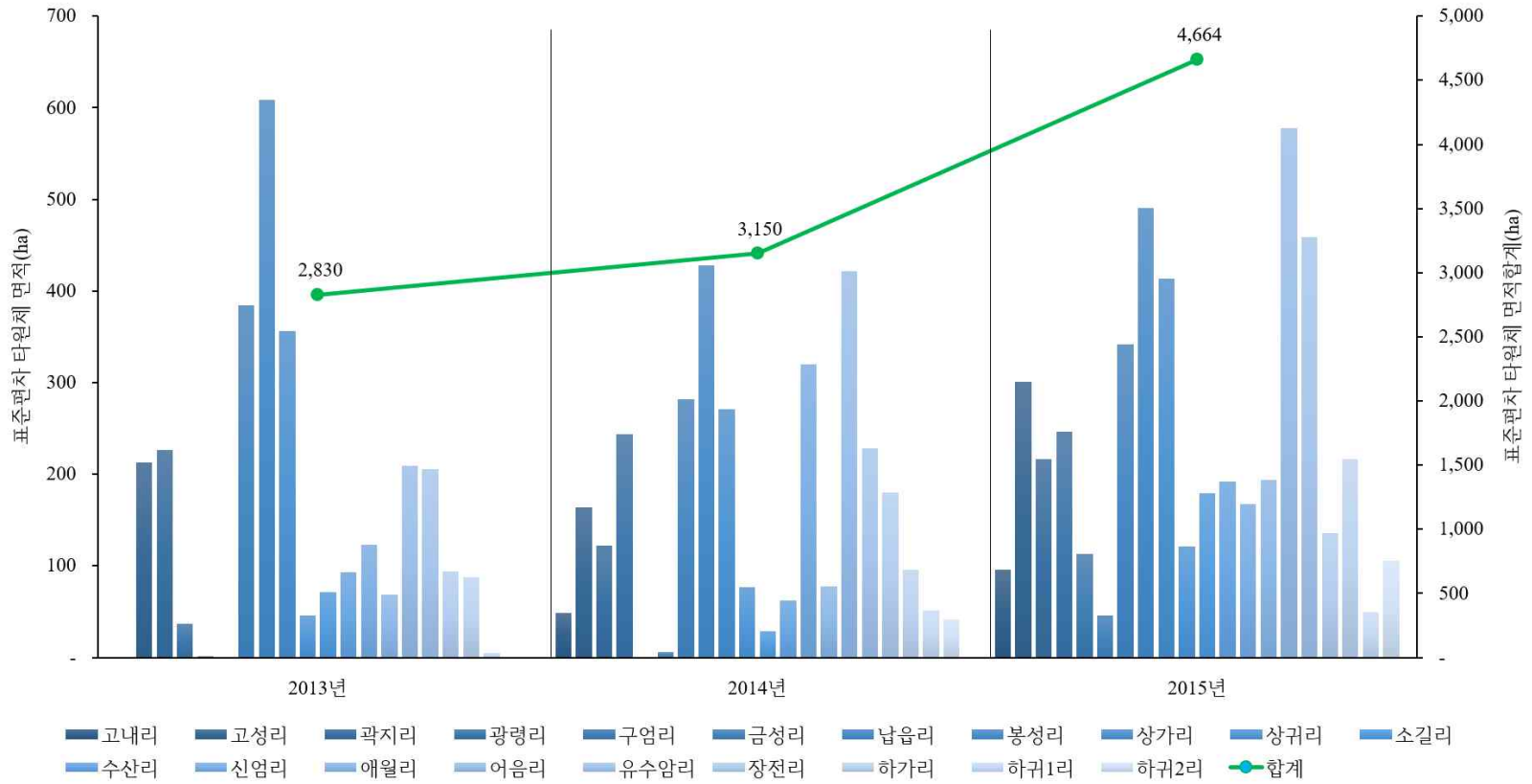


그림 27. 시계열에 따른 표준편차타원체의 형태분석

표 18. 시계열에 따른 표준편차타원체의 행정구역별 면적분포

행정구역(리)	2013년	2014년	2015년
고내리	-	48	96
고성리	213	164	301
곽지리	226	122	217
광령리	37	244	247
구엄리	1	0.02	113
금성리	-	6	46
남읍리	384	282	342
봉성리	609	428	490
상가리	357	271	414
상귀리	46	77	121
소길리	71	29	180
수산리	93	62	192
신엄리	123	320	168
애월리	69	77	194
어음리	209	422	578
유수암리	205	228	458
장전리	94	181	136
하가리	87	96	217
하귀1리	5	51	49
하귀2리	0.4	42	106

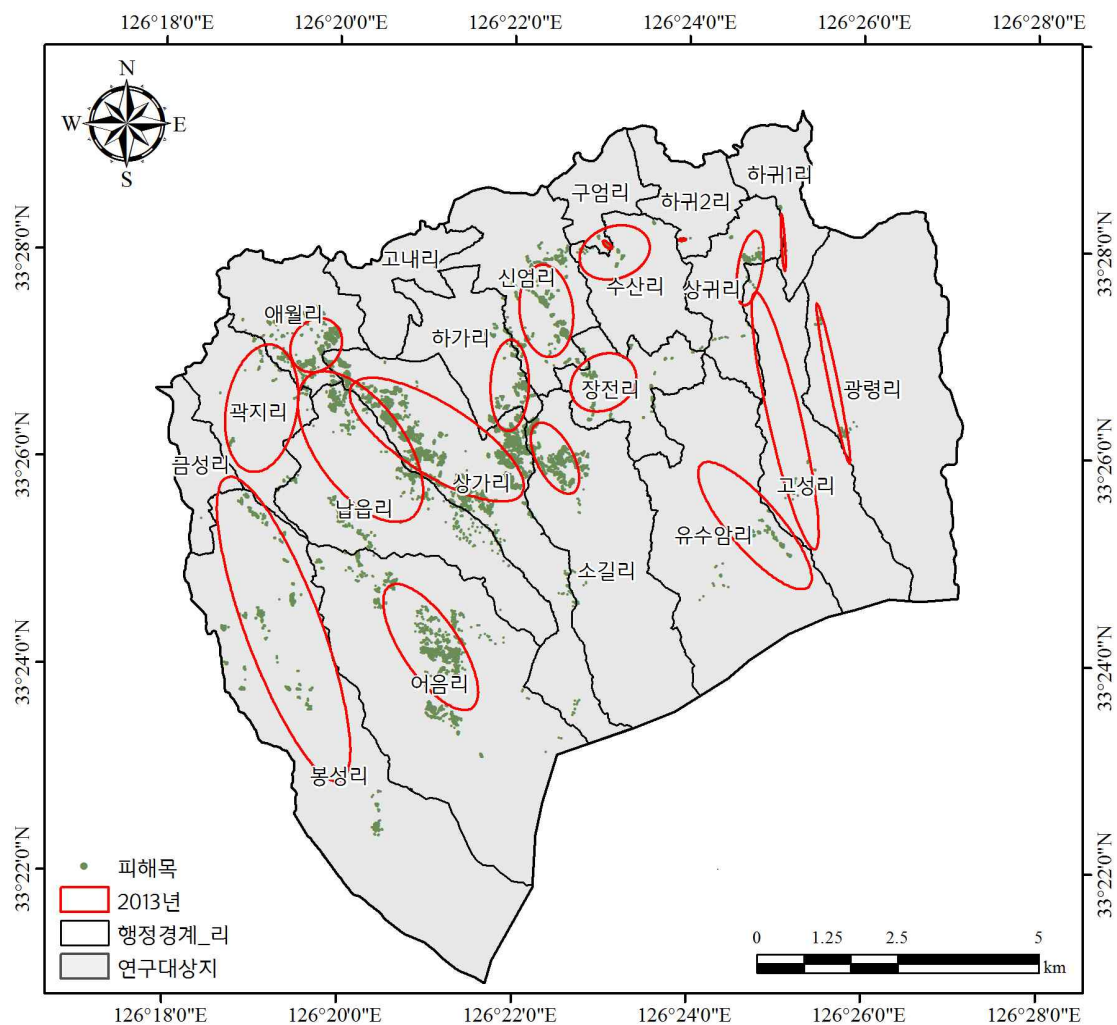


그림 28. 2013년도 표준편차 타원체 공간분포도

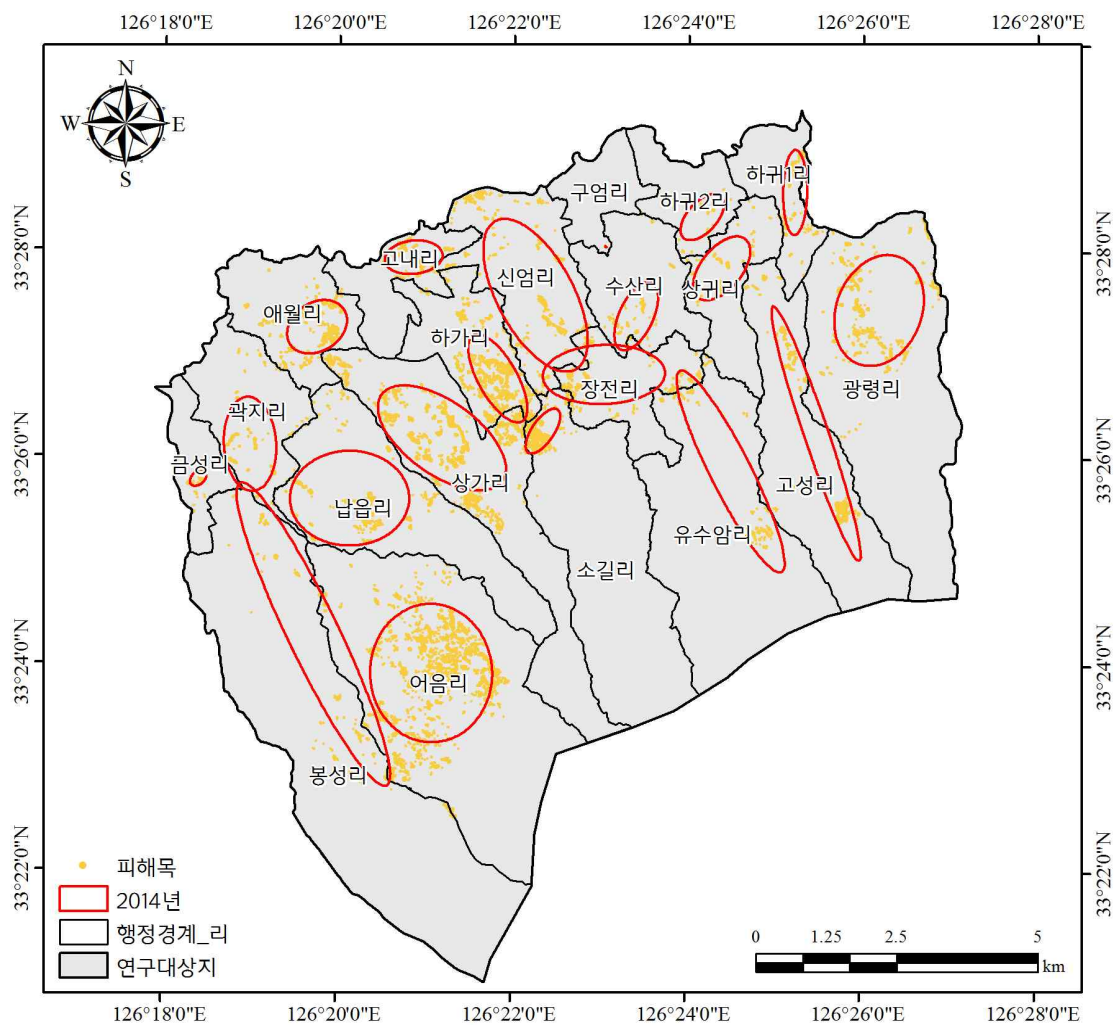


그림 29. 2014년도 표준편차 타원체 공간분포도

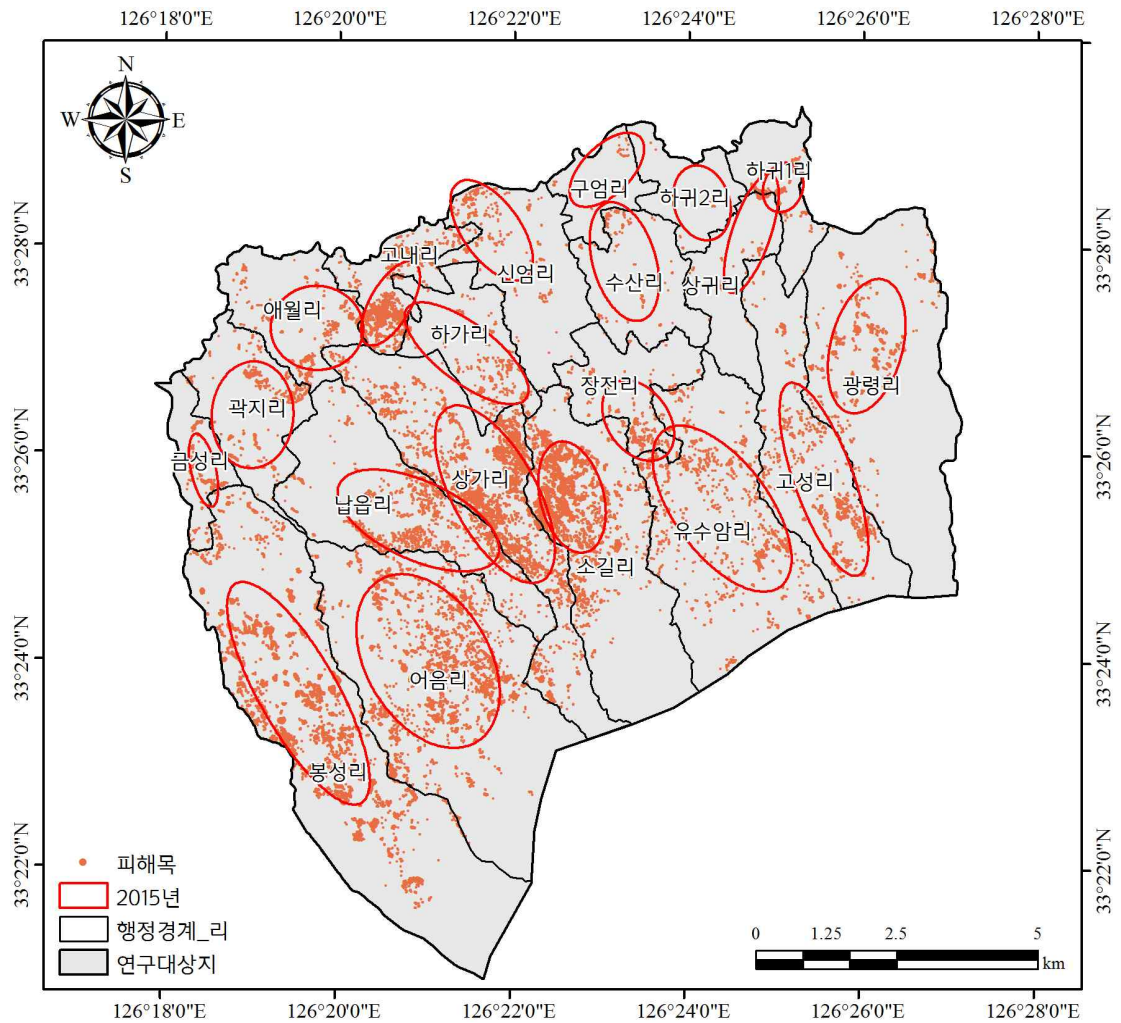


그림 30. 2015년도 표준편차 타원체 공간분포도

(2) 시계열에 따른 행정구역별 표준편차 타원체의 면적 변화

(1) 2013년 ~ 2014년 변화량

2013년 ~ 2014년의 표준편차 타원체의 면적변화를 분석한 결과, 20개의 리 중 12개의 리가 표준편차 타원체의 넓이가 넓어졌으며, 평균 16ha가 증가하였다. 어음리, 신엄리, 광령리는 약 200ha가 증가하여 재선충병 피해목의 분포가 넓게 확산되고 있었으며, 봉성리는 약 180ha가 감소하여 재선충병 피해목의 분포가 축소되면서 면적 분포가 작아진 것으로 판단된다.

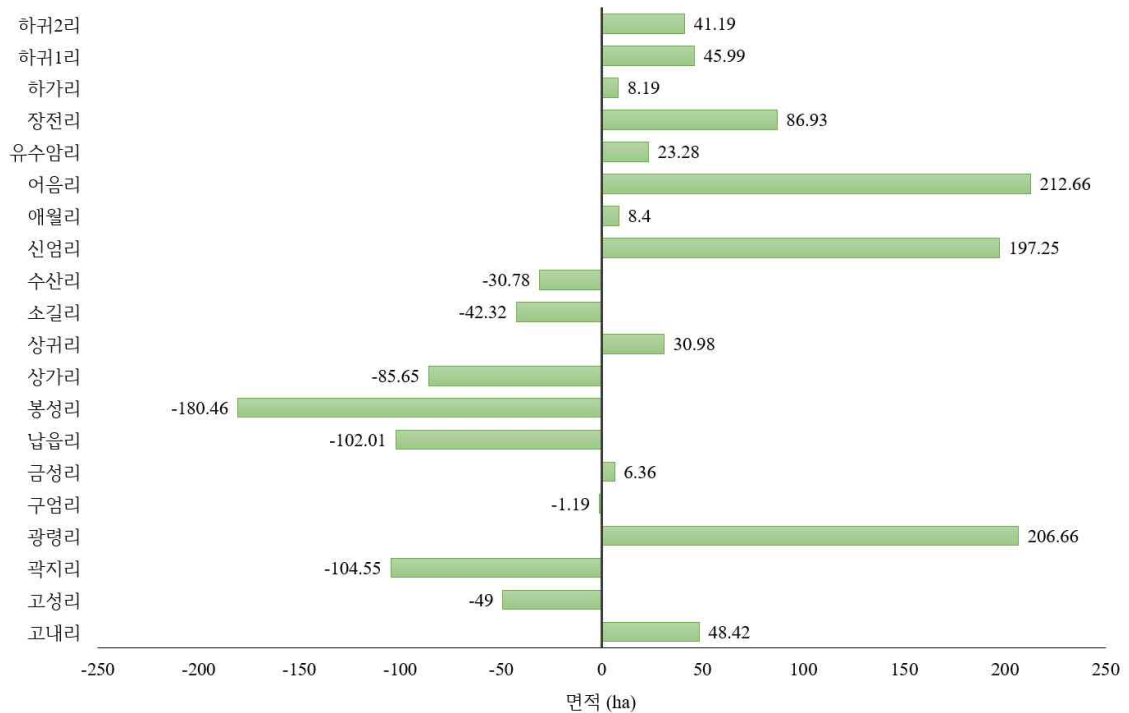


그림 31. 시계열에 따른 표준편차 타원체의 형태 및 면적 변화량 (2013년~2014년)

(2) 2014년 ~ 2015년 변화량

2014년 ~ 2015년의 표준편차 타원체의 면적변화를 분석한 결과, 20개의 리 중 17개의 리가 표준편차 타원체의 넓이가 넓어졌으며, 평균 75ha가 증가하였다. 유수암리는 2014년 대비 약 230ha가 증가하여 재선충병 피해목의 분포가 넓게 확산되었으나, 신엄리는 약 152ha가 감소하였다. 신엄리는 2014년과 비교하여 해안으로 피해목의 분포가 집중되어 재선충병 피해목의 분포가 축소되었다.

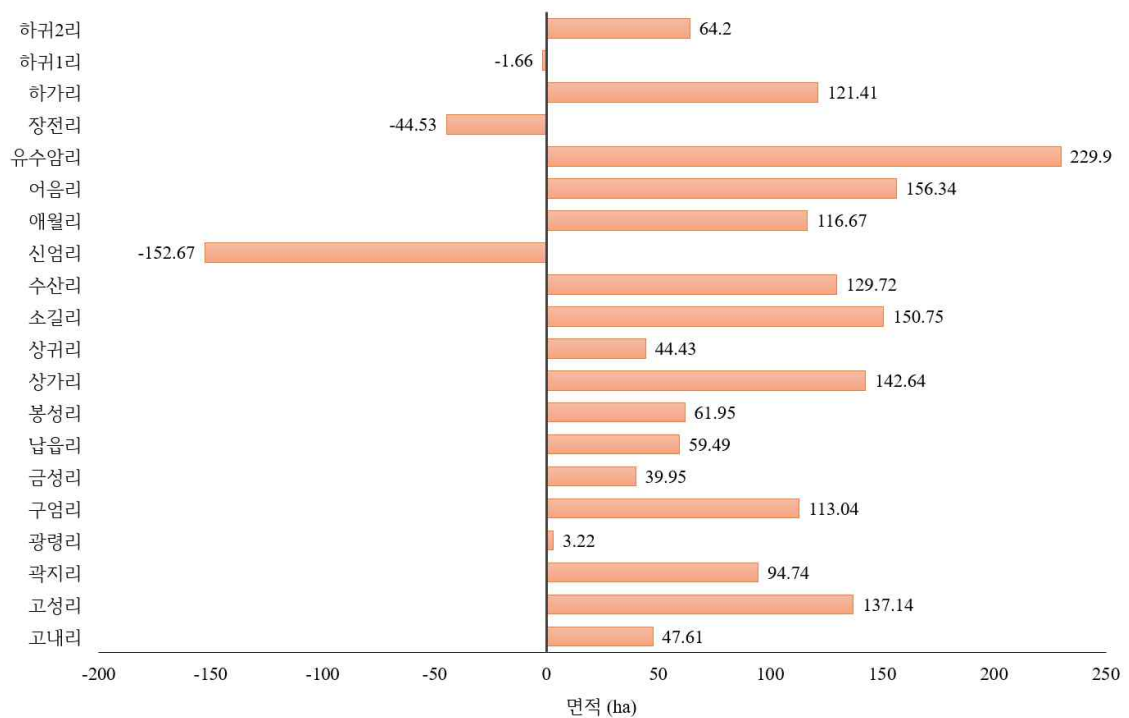


그림 32. 시계열에 따른 표준편차 타원체의 형태 및 면적 변화량 (2014년~2015년)

(3) 평균중심점 분석을 이용한 시·공간적 분포특성

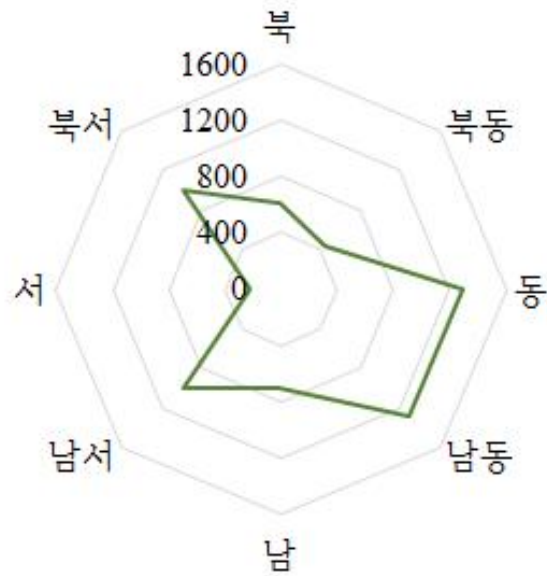
평균중심점 분석을 이용하여 중심점들의 이동을 분석한 결과, 2013년에서 2014년의 중심점 이동은 평균 약 602m 이동하였으며, 북동, 남, 남동 방향으로 이동이 높았다. 2014년에서 2015년의 중심점 이동은 평균 789m 이동하여 동, 남동, 남서, 북서방향으로 이동이 높았다. 행정구역별 이동 분포를 분석한 결과, 2013년에서 2014년까지의 경우, 광지리, 구엄리, 남읍리, 수산리, 어음리, 고성리는 남, 남동향으로의 이동이 진행되어 재선충병 피해목의 분포가 내륙(한라산) 방향으로 진행되었다. 또한, 금성리, 애월리, 장전리, 하귀1리, 하귀2리, 광령리, 소길리, 신엄리, 유수암리, 하가리는 북, 북동, 북서방향으로의 이동이 진행되어 재선충병 피해목의 분포가 해안 방향으로 진행되었다. 2014년에서 2015년까지의 경우, 고성리, 광령리, 봉성리, 애월리, 유수암리, 상가리, 소길리, 장전리, 고내리는 남, 남동, 남서향으로의 이동이 진행되어 재선충병 피해목의 분포가 내륙(한라산) 방향으로 진행되었다. 광지리, 구엄리, 수산리, 어음리, 하귀2리, 금성리, 상귀리, 신엄리, 히가리는 북, 북동, 북서방향으로의 이동이 진행되어 재선충병 피해목의 분포가 해안방향으로 진행되었다. 재선충병 피해목은 1136 지방도를 중심으로 남쪽에 분포하는 리는 내륙(한라산)쪽으로 이동하는 경향을 나타내었으며, 북쪽에 분포하는 리는 해안쪽으로 이동하는 경향을 나타내었다.

표 19. 연도별 평균중심점 방향분포

행정구역 (리)	2013년 ~ 2014년			2014년 ~ 2015년		
	거리(m)	방향(°)	방위(8방위)	거리(m)	방향(°)	방위(8방위)
고내리	-	-	-	985	205	남서
고성리	640	114	남동	863	172	남
곽지리	664	196	남	460	6	북
광령리	1,526	33	북동	729	198	남
구엄리	40	194	남	1,290	360	북
금성리	713	357	북	116	55	북동
납읍리	933	190	남	1,288	111	동
봉성리	578	104	동	1,104	195	남
상가리	115	78	동	1,425	139	남동
상귀리	492	268	서	768	43	북동
소길리	511	338	북서	1,345	157	남동
수산리	1,212	161	남	930	348	북
신엄리	333	327	북서	1,319	325	북서
애월리	329	6	북	94	184	남
어음리	478	176	남	191	339	북
유수암리	1,047	337	북서	730	193	남
장전리	138	14	북	1,077	145	남동
하가리	229	303	북서	669	304	북서
하귀1리	919	15	북	215	275	서
하귀2리	542	43	북동	185	359	북



a. 2013년 ~ 2014년



b. 2014년 ~ 2015년

그림 33. 방위별 중심점 평균이동거리 분포 (단위 : m)

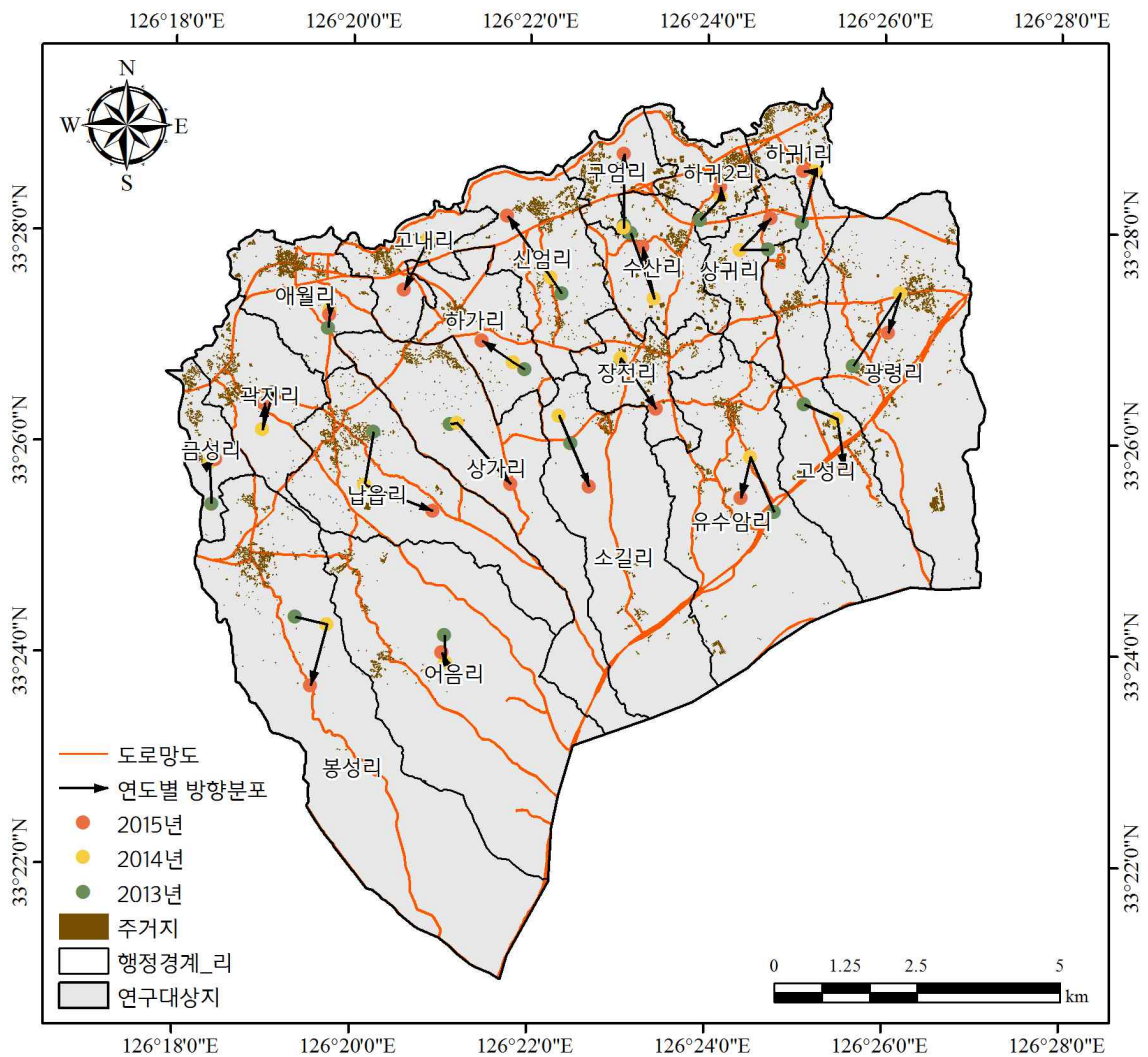


그림 34. 시계열에 따른 피해목 평균 중심점 이동특성 분석

3) 소나무재선충병 피해목의 재적추정

(1) 소나무재선충병 피해목의 연도별 재적 피해분포

소나무재선충병 피해목의 연도별 재적피해 결과, 2013년에는 22,785m³, 2014년에는 18,662m³, 2015년에는 29,273m³의 피해가 발생하였다.

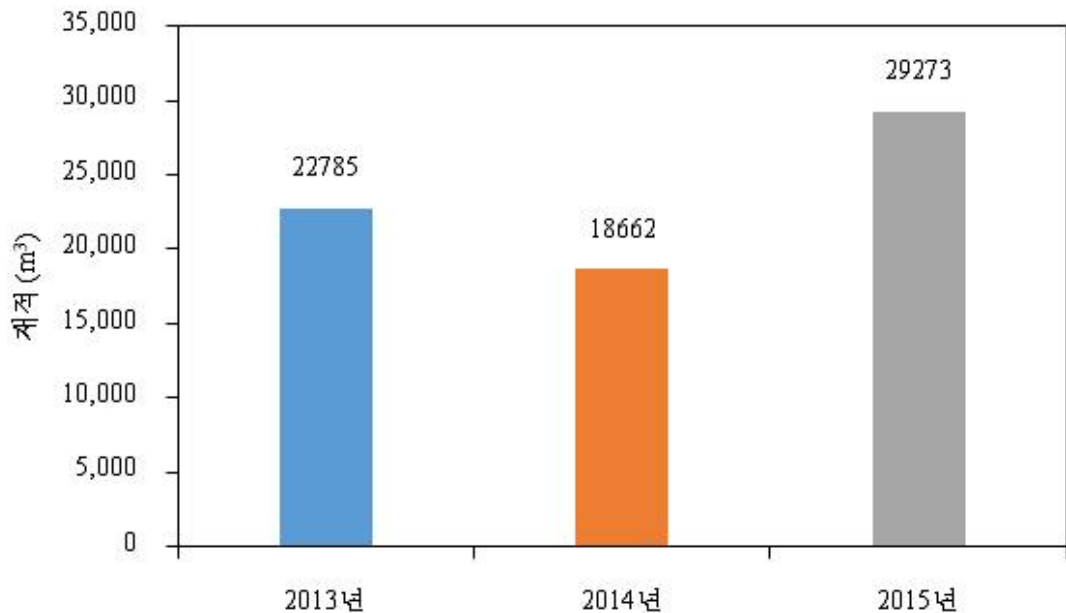


그림 35. 연도별 소나무재선충병 피해목의 재적분포

재적피해량의 비율이 2013년 32.2%에서 2015년 41.4%로 증가하였다. 즉, 연도별로는 2015년에 재적피해가 가장 크게 발생하여 효과적인 소나무재선충병 방제가 시급한 것으로 사료되었다.

표 20. 연도별 소나무재선충병 피해목의 재적 및 입목분포

구분	2013년	2014년	2015년	합계
재적 (m³)	22,785	18,662	29,273	70,721
비율 (%)	32.2	26.4	41.4	100.0
입목본수 (본)	24,517	32,024	50,274	106,815

(2) 소나무재선충병 피해목의 연도별 재적 피해분포

소나무재선충병 피해목의 연도별 재적피해 결과, 소경급($6\text{cm} \leq \text{DBH} < 16\text{cm}$)에서는 $1,006\text{m}^3$ 가 발생하였으며, 중경급($16\text{cm} \leq \text{DBH} < 30\text{cm}$)에서는 $9,418\text{m}^3$, 대경급($30\text{cm} \leq \text{DBH}$)에서는 $60,297\text{m}^3$ 의 피해가 발생하였다.

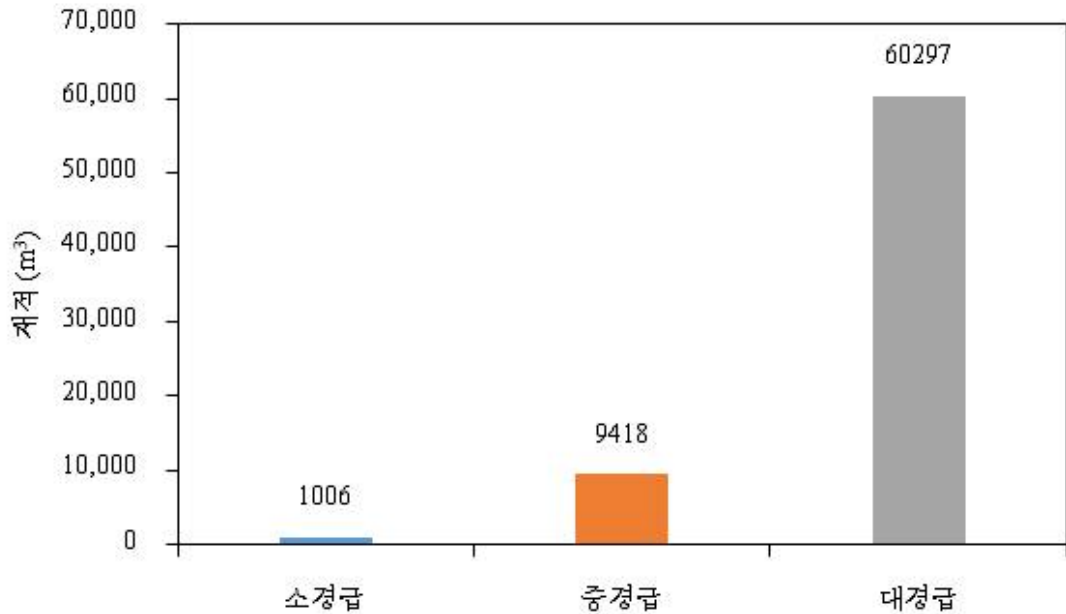


그림 36. 경급별 소나무재선충병 피해목의 재적분포

경급별 재적피해량의 비율은 대경급에서 85.3%로 가장 크게 나타났다. 즉, 임목이 큰 곰솔에서의 재적피해가 심각한 것으로 분석되었다.

표 21. 경급별 소나무재선충병 피해목의 재적 및 임목분포

구분	소경급	중경급	대경급	합계
재적 (m^3)	1,006	9,418	60,297	70,721
비율 (%)	1.4	13.3	85.3	100.0
임목본수 (본)	14,502	36,630	55,683	106,815

4) 공간스케일에 따른 재선충병 피해목의 다양성 지수 분포

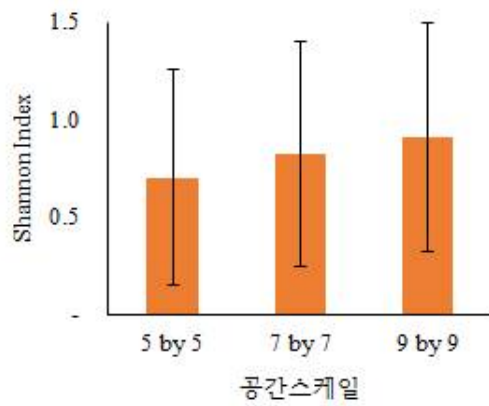
(1) 재선충병 피해목의 직경급에 따른 다양성 분포

(1) Shannon-Weaver Index

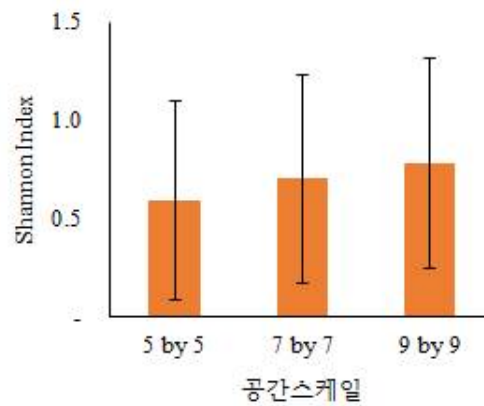
2013년의 Shannon-Weaver 다양성 지수의 평균은 0.81이며, 2014년은 0.69, 2015년은 0.59로 다양성지수 값이 감소하였다. 또한, 모든 시기에서 다양성 지수 값은 공간스케일이 증가할수록 값이 증가하였다. 지역별 분포현황을 보면, 2013년은 상가리를 중심으로 다양성 지수가 높은 지역이 분포하였으며, 2014년은 어음리와 하가리, 2015년은 소길리와 상가리를 중심으로 다양성 지수가 높았다.

표 22. 연도별 공간 스케일에 따른 Shannon-Weaver

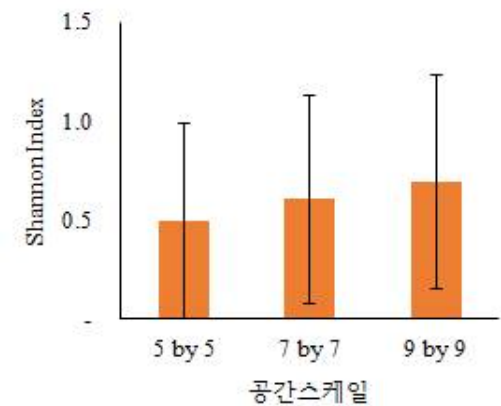
	Scale	Minimum	Maximum	Mean	Std
2013년	5 by 5	-	2.15	0.70	0.55
	7 by 7	-	2.14	0.82	0.58
	9 by 9	-	2.15	0.91	0.59
2014년	5 by 5	-	2.03	0.59	0.51
	7 by 7	-	2.08	0.70	0.53
	9 by 9	-	2.08	0.78	0.54
2015년	5 by 5	-	2.02	0.49	0.49
	7 by 7	-	2.08	0.61	0.53
	9 by 9	-	2.09	0.69	0.54



a. 2013년

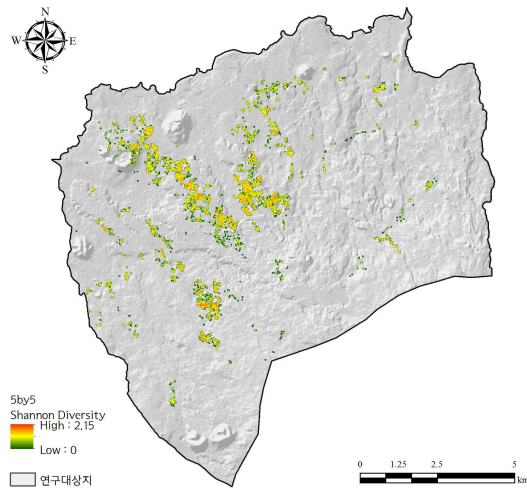


b. 2014년

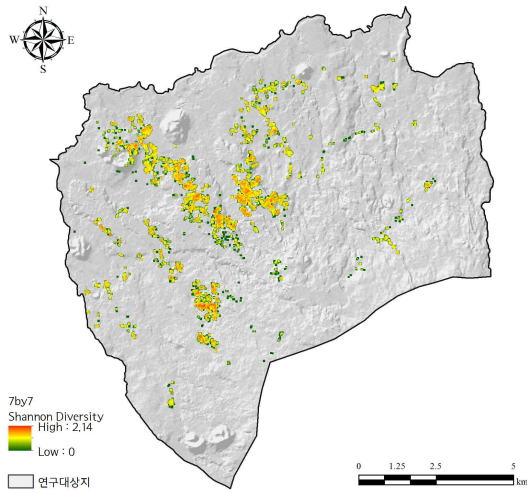


c. 2015년

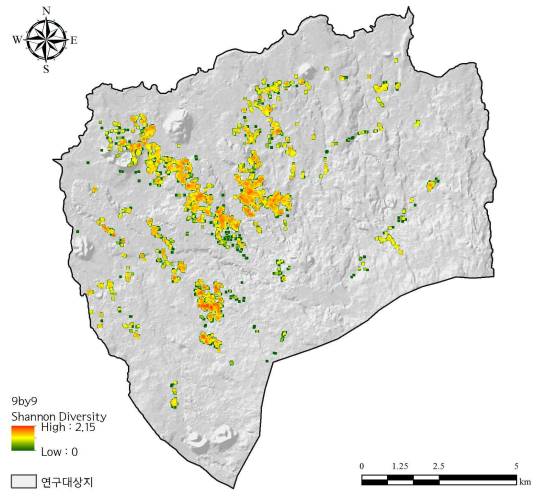
그림 37. 연도별 Shannon-Weaver 분포



a. 5 by 5

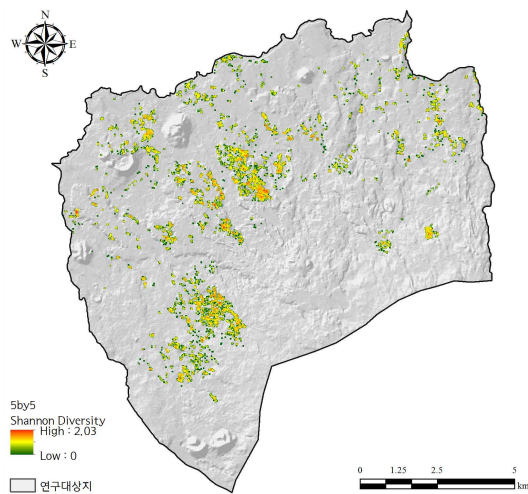


b. 7 by 7

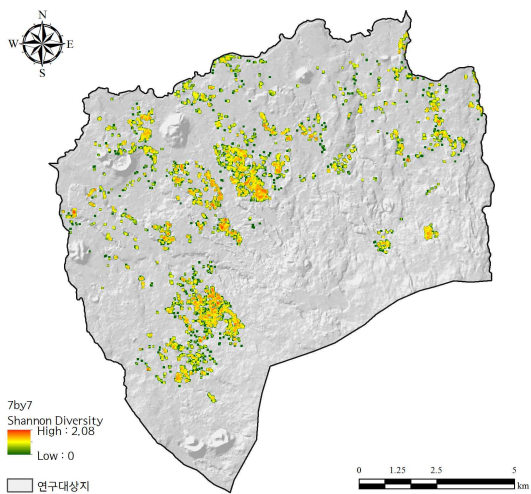


c. 9 by 9

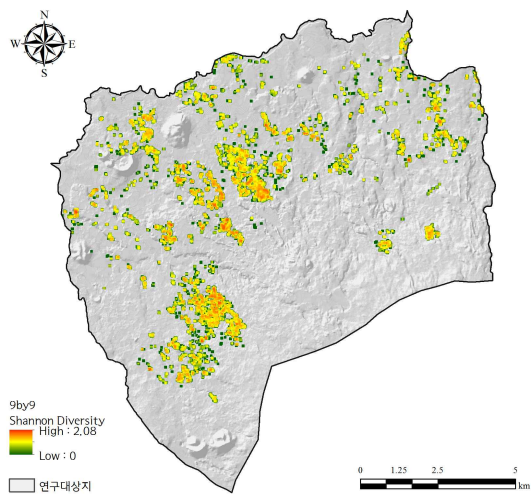
그림 38. 공간스케일에 따른 Shannon-Weaver 분포 (2013년)



a. 5 by 5

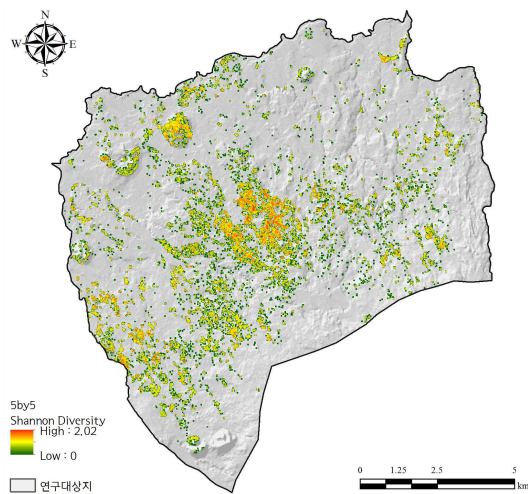


b. 7 by 7

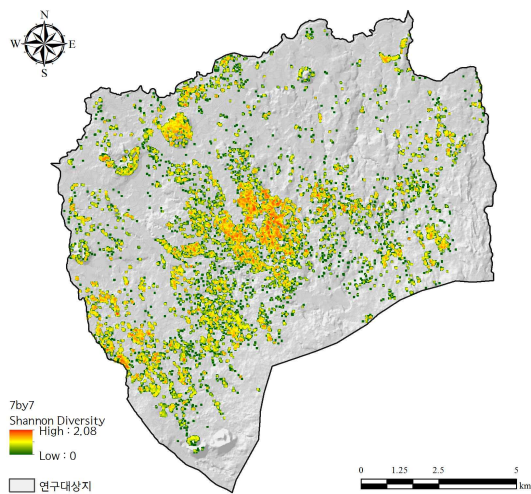


c. 9 by 9

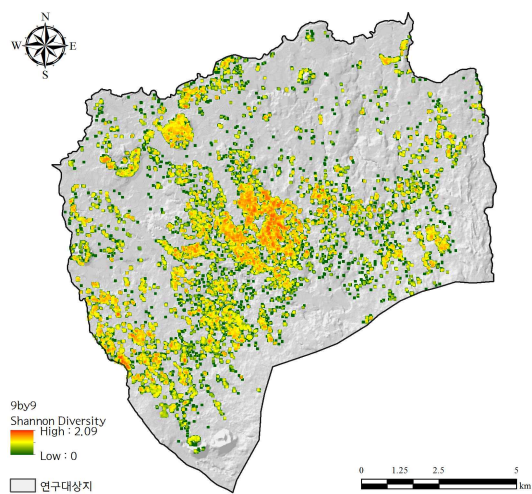
그림 39. 공간스케일에 따른 Shannon-Weaver 분포 (2014년)



a. 5 by 5



b. 7 by 7



c. 9 by 9

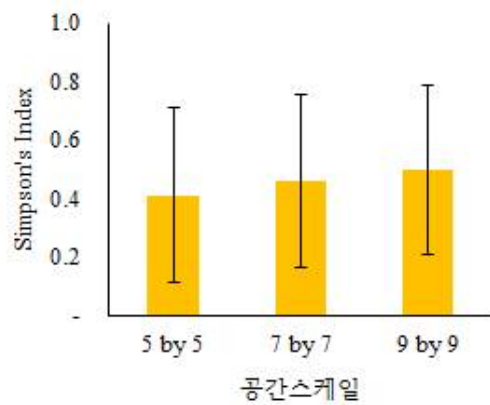
그림 40. 공간스케일에 따른 Shannon-Weaver 분포 (2015년)

(2) Simpson's Index

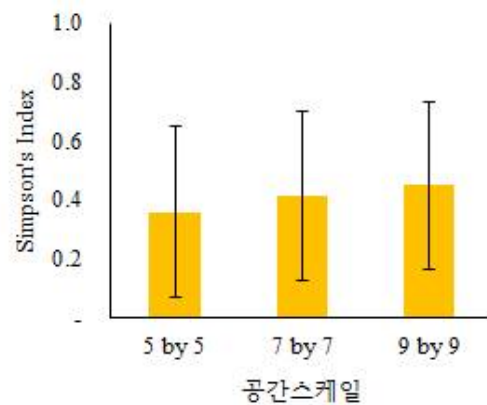
2013년의 Simpson's의 다양성 지수의 평균은 0.46이며, 2014년은 0.40, 2015년은 0.36로 시간이 지남에 따라 다양성지수 값이 감소하였다. 또한, 모든 시기에서 다양성 지수값은 공간스케일이 증가할수록 값이 증가하였다. 지역별 분포는 Shannon-Weaver의 분포와 유사하였다. 또한, 공간스케일이 증가함에 따라 다양성지수의 분포가 넓게 분포하였다.

표 23. 공간 스케일에 따른 Simpson's Index

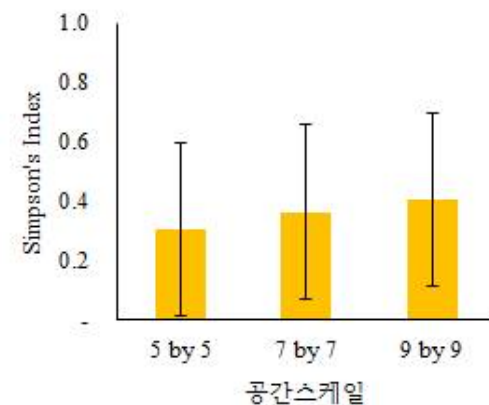
		Minimum	Maximum	Mean	Std
2013년	5 by 5	-	0.88	0.41	0.30
	7 by 7	-	0.88	0.46	0.30
	9 by 9	-	0.88	0.50	0.29
2014년	5 by 5	-	0.86	0.36	0.29
	7 by 7	-	0.88	0.41	0.29
	9 by 9	-	0.88	0.45	0.28
2015년	5 by 5	-	0.86	0.31	0.29
	7 by 7	-	0.88	0.36	0.29
	9 by 9	-	0.88	0.41	0.29



a. 2013년

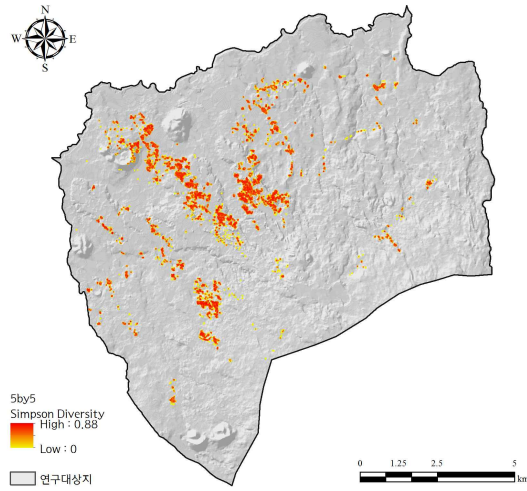


b. 2014년

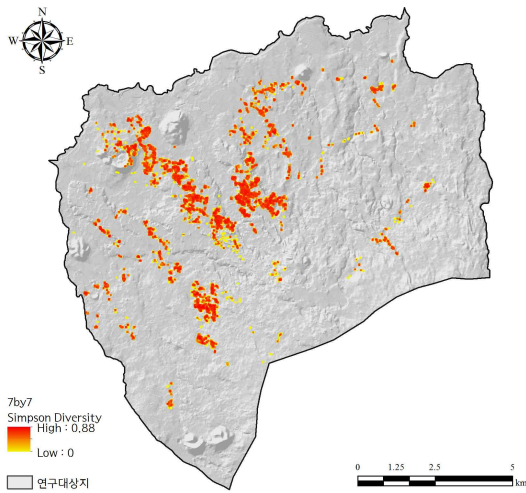


c. 2015년

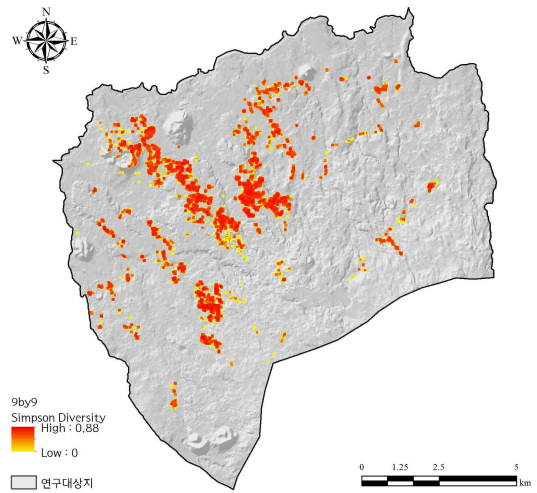
그림 41. 연도별 Simpson's Index 분포



a. 5 by 5

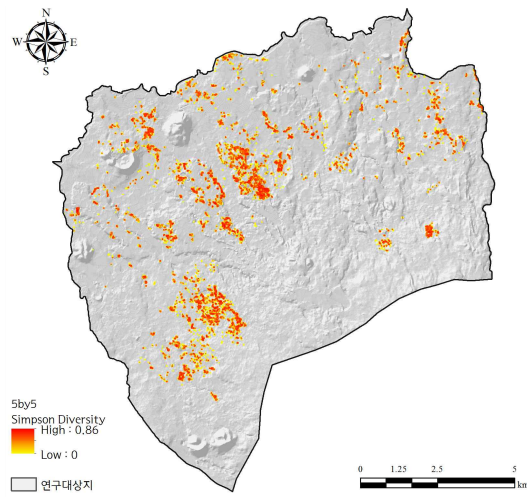


b. 7 by 7

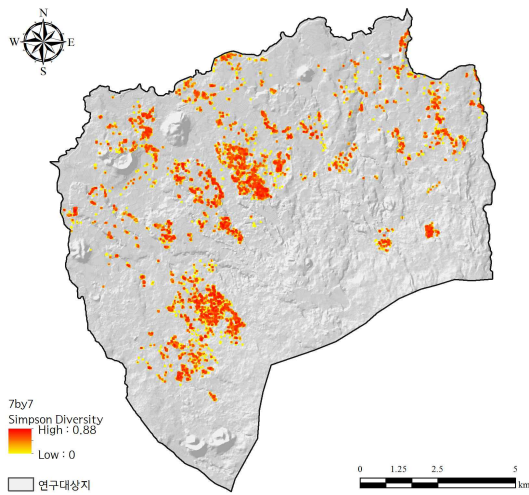


c. 9 by 9

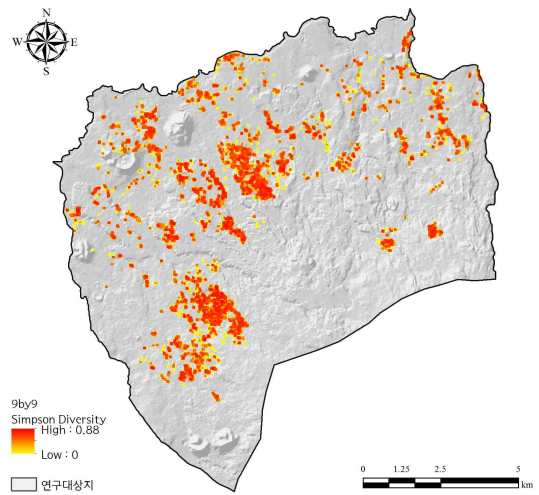
그림 42. 공간스케일에 따른 Simpson's Index 분포 (2013년)



a. 5 by 5

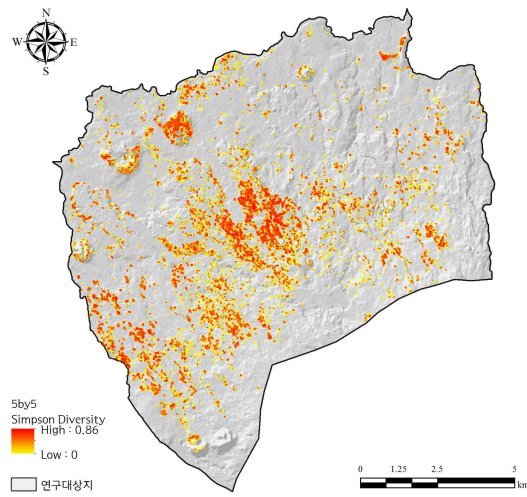


b. 7 by 7

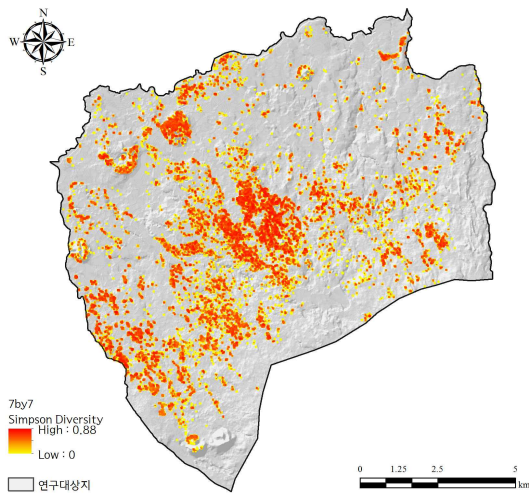


c. 9 by 9

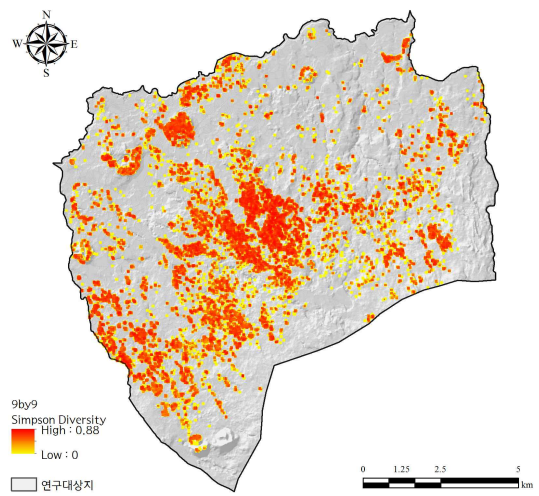
그림 43. 공간스케일에 따른 Simpson's Index 분포 (2014년)



a. 5 by 5



b. 7 by 7



c. 9 by 9

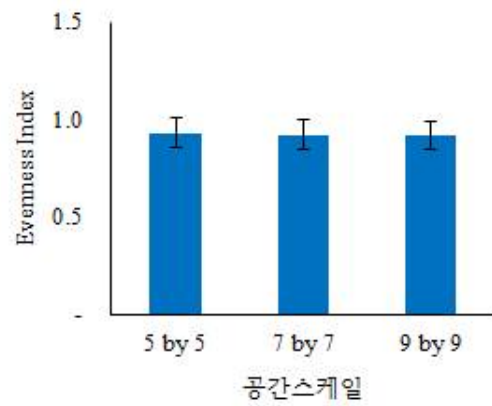
그림 44. 공간스케일에 따른 Simpson's Index 분포 (2015년)

(3) Evenness Index

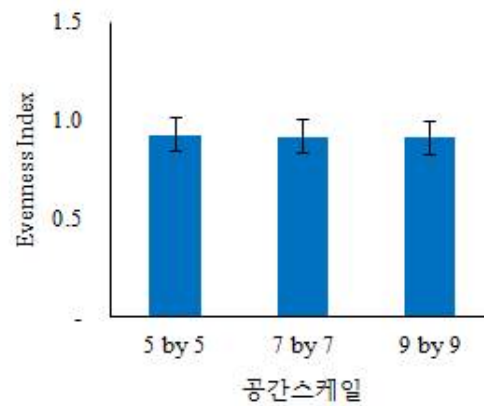
2013년의 Evenness의 지수는 평균 0.92이며, 2014년은 0.92, 2015년은 0.93로 시간이 지남에 따라 지수 값이 증가하였다. 또한, 모든 시기에서 지수 값은 공간스케일이 증가할수록 값이 감소하였다. 지역별 분포를 보면, 2013년은 상가리의 중앙지역의 지수 값이 높은 반면, 북쪽 지역은 지수값이 낮았다. 2014년은 어음리 지역은 지수의 값이 높았으며, 하가리 지역은 지수의 값이 낮았다. 2015년은 남읍리 지역은 지수의 값이 높았으며, 봉성리, 상가리, 어음리 지역은 지수의 값이 낮았다.

표 24. 공간 스케일에 따른 Evenness Index

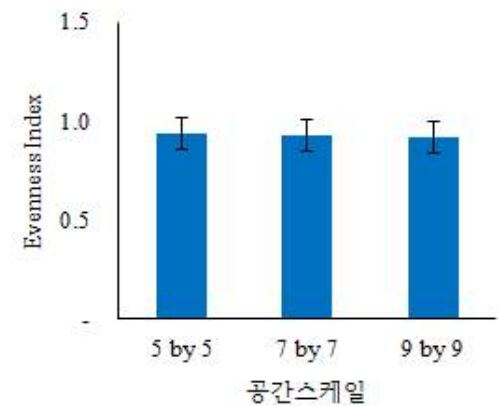
		Minimum	Maximum	Mean	Std
2013년	5 by 5	0.41	1.00	0.93	0.07
	7 by 7	0.44	1.00	0.92	0.07
	9 by 9	0.44	1.00	0.92	0.07
2014년	5 by 5	0.32	1.00	0.93	0.08
	7 by 7	0.34	1.00	0.92	0.09
	9 by 9	0.34	1.00	0.91	0.09
2015년	5 by 5	0.29	1.00	0.94	0.08
	7 by 7	0.28	1.00	0.93	0.08
	9 by 9	0.34	1.00	0.92	0.08



a. 2013년

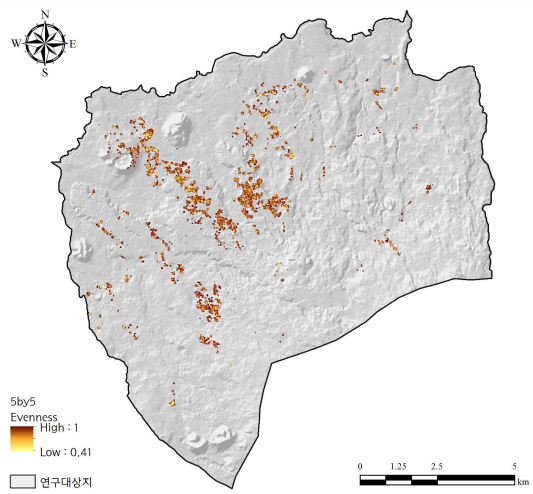


b. 2014년

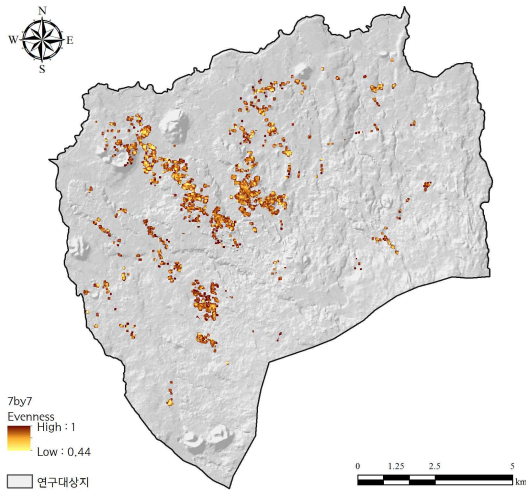


c. 2015년

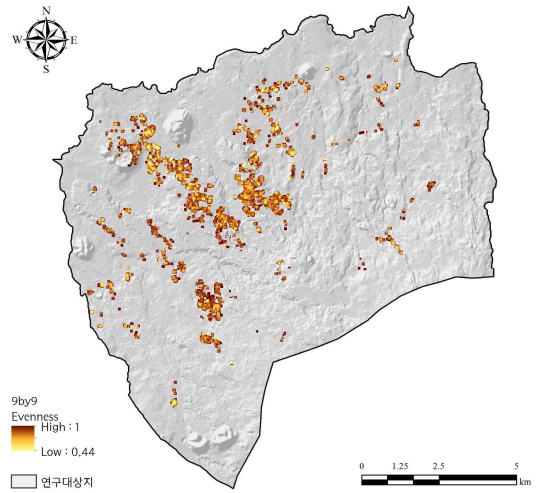
그림 45. 연도별 Evenness Index 분포



a. 5 by 5

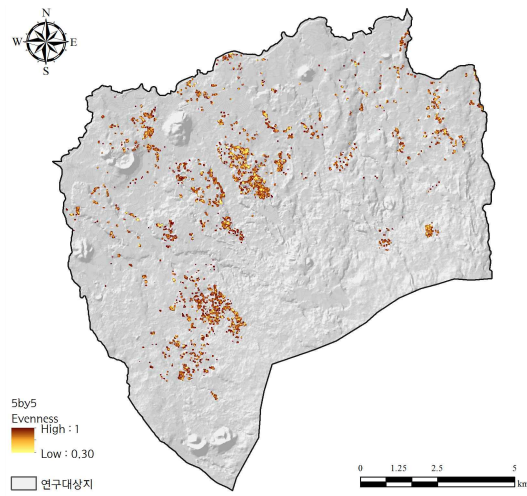


b. 7 by 7

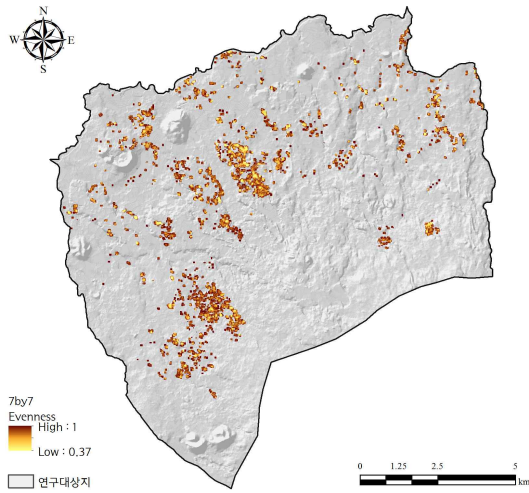


c. 9 by 9

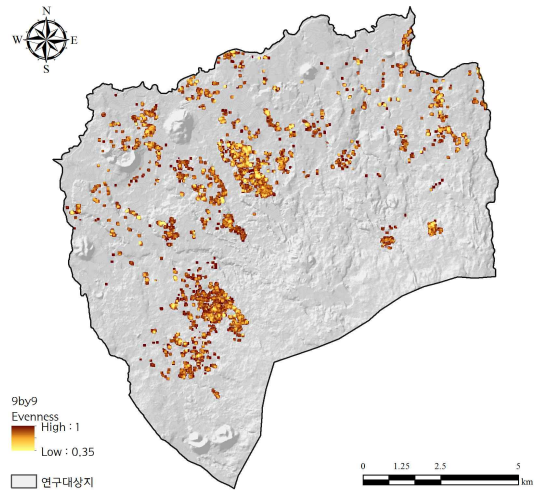
그림 46. 공간스케일에 따른 Evenness Index 분포 (2013년)



a. 5 by 5

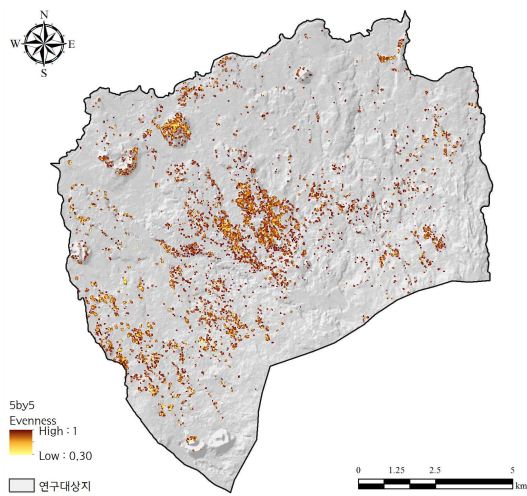


b. 7 by 7

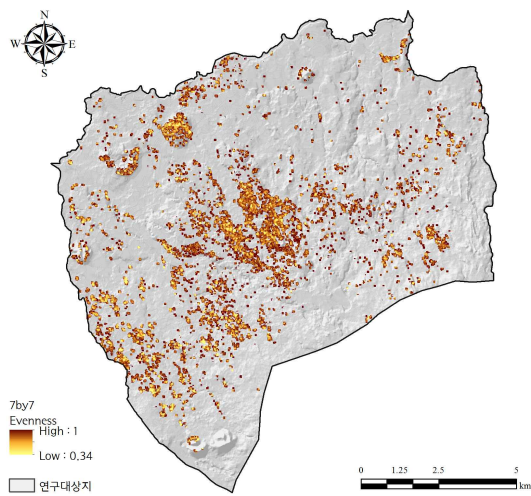


c. 9 by 9

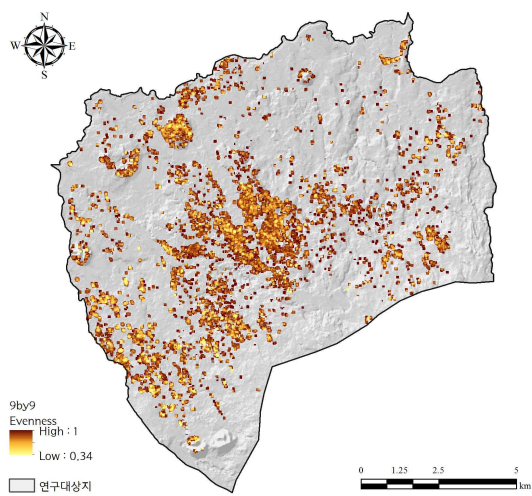
그림 47. 공간스케일에 따른 Evenness Index 분포 (2014년)



a. 5 by 5



b. 7 by 7



c. 9 by 9

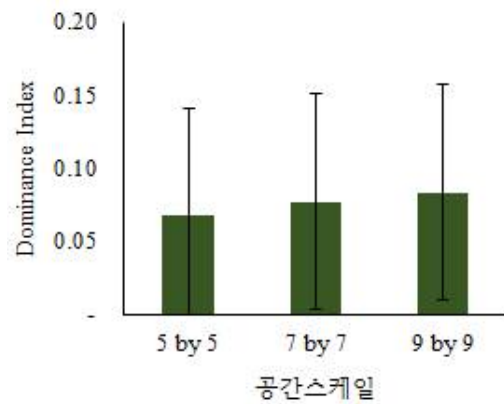
그림 48. 공간스케일에 따른 Evenness Index 분포 (2015년)

(4) Dominance Index

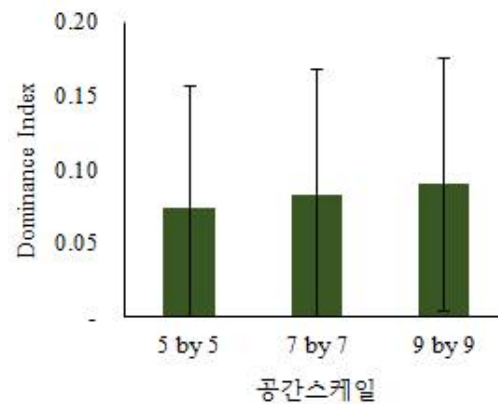
2013년의 Dominance의 지수는 평균 0.08이며, 2014년은 0.08, 2015년은 0.07로 시간이 지남에 따라 지수 값이 감소하였다. 또한, 모든 시기에서 지수 값은 공간스케일이 증가할수록 값이 증가하였다. 지역별 분포를 보면, 2013년은 애월리 지역은 지수의 값이 높은 반면, 어음리 지역은 지수의 값이 낮았다. 2014년은 히가리 지역은 지수의 값이 높았으며, 어음리 지역은 지수의 값이 낮았다. 2015년은 봉성리, 상가리, 소길리 지역은 지수의 값이 높았으며, 히가리와 유수암리 지역은 지수의 값이 낮았다.

표 25. 공간 스케일에 따른 Dominance Index

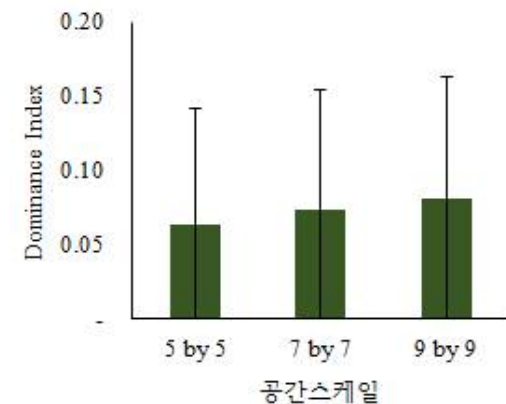
		Minimum	Maximum	Mean	Std
2013년	5 by 5	-	0.59	0.07	0.07
	7 by 7	-	0.56	0.08	0.07
	9 by 9	-	0.56	0.08	0.07
2014년	5 by 5	-	0.68	0.07	0.08
	7 by 7	-	0.66	0.08	0.09
	9 by 9	-	0.66	0.09	0.09
2015년	5 by 5	-	0.71	0.06	0.08
	7 by 7	-	0.72	0.07	0.08
	9 by 9	-	0.66	0.08	0.08



a. 2013년

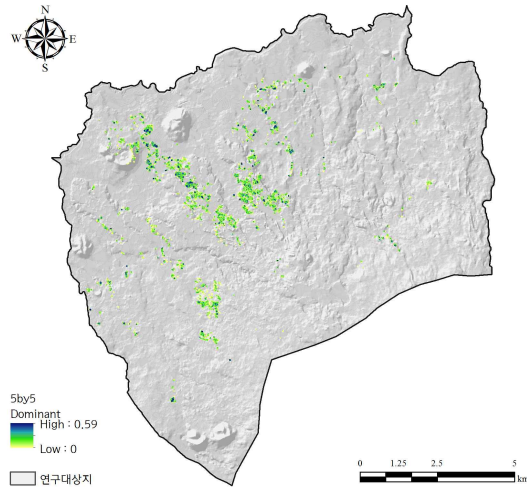


b. 2014년

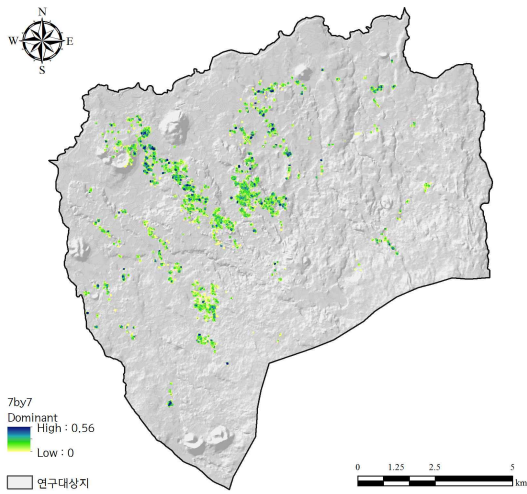


c. 2015년

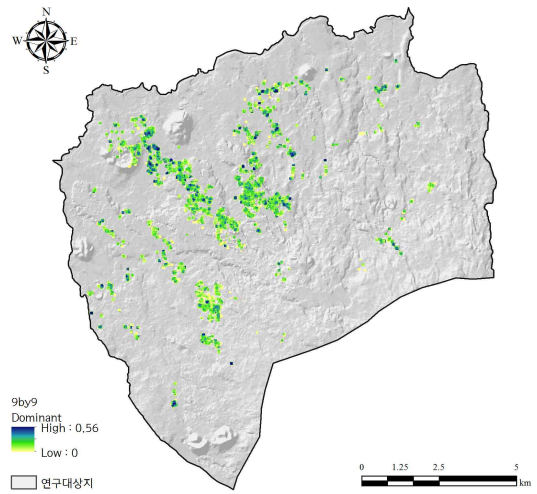
그림 49. 연도별 Dominance Index 분포



a. 5 by 5

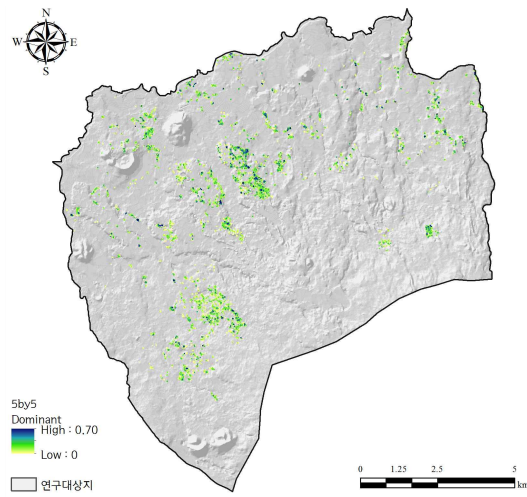


b. 7 by 7

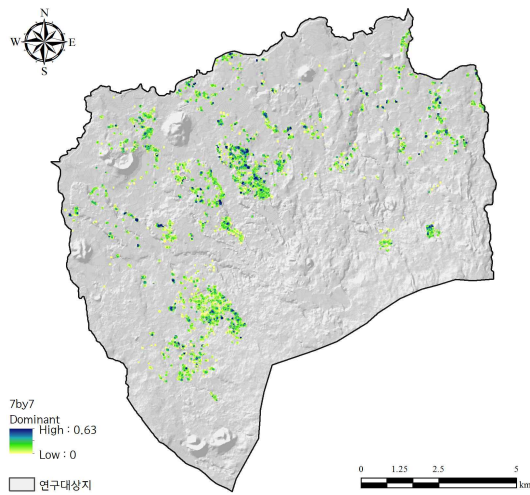


c. 9 by 9

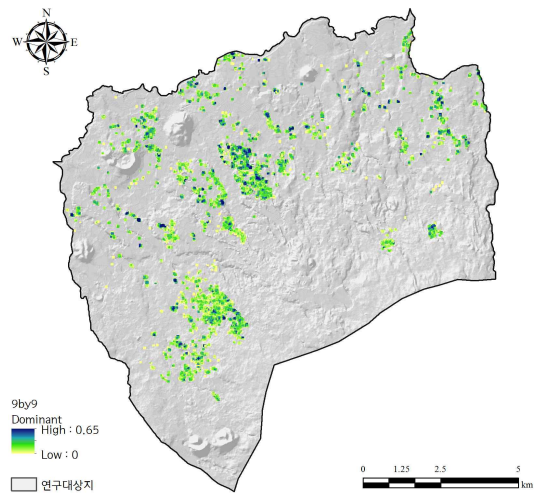
그림 50. 공간스케일에 따른 Dominance Index 분포 (2013년)



a. 5 by 5

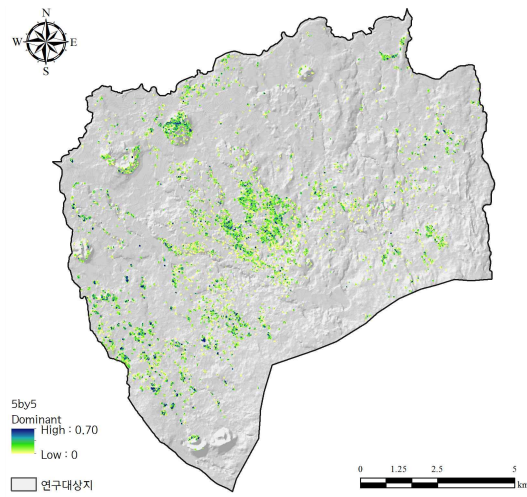


b. 7 by 7

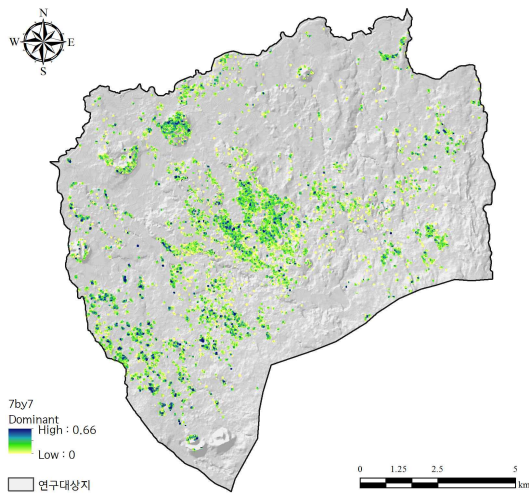


c. 9 by 9

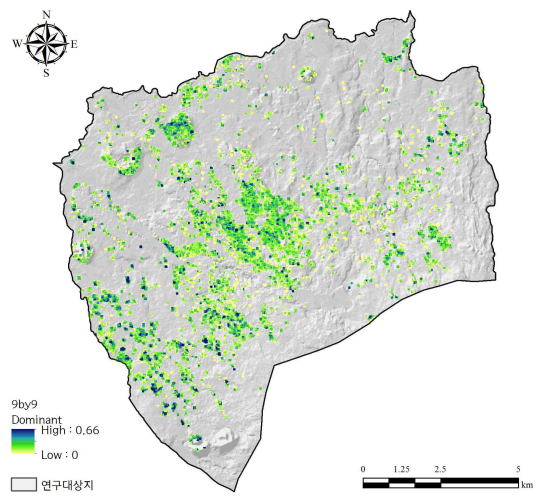
그림 51. 공간스케일에 따른 Dominance Index 분포 (2014년)



a. 5 by 5



b. 7 by 7



c. 9 by 9

그림 52. 공간스케일에 따른 Dominance Index 분포 (2015년)

5) Cluster 분석을 이용한 재선충병 피해목의 특성분석

(1) K-means 방법을 이용한 군집분석

K-means 기법을 이용한 군집분석 결과, 클래스 1은 애월읍 전체 면적의 약 90%를 차지하여 가장 높았으며, 클래스 2, 클래스 6의 순으로 분포하였다. 군집별 특성을 보면, 클래스 1은 모든 인자의 중심값이 낮은 지역으로 비산림지역의 특성을 나타내고 있으며, 모든 행정구역에서 넓게 분포하고 있다. 클래스 2는 비교적 다른 클래스 보다 모든 인자의 값이 낮은 지역이며, 클래스 2는 전체 면적의 12%가 상가리에서 가장 높게 분포하였다. 클래스 3은 도로와 주거지로부터의 접근성이 높지만 피해목의 단면적 비율과 본수밀도가 낮은 지역이며, 봉성리와 어음리에 집중적으로 분포하고 있다. 클래스 4는 단면적 비율이 높은 반면, 주거지로부터의 접근성이 낮은 지역이며, 상가리에서 가장 높게 분포하였다. 클래스 5는 도로로부터 접근성이 매우 높고 피해목의 단면적 비율이 높은 지역이며, 어음리와 상가리에서 높게 분포하였다. 클래스 6은 도로로부터 접근성이 높고 피해목의 본수와 단면적 비율은 낮은 지역이며, 어음리와 봉성리에 분포면적이 높았다. 군집분석결과, 클래스 3의 재선충병 피해목은 도로와 주거지로부터 접근성이 높지만, 단면적이 낮으며, 본수밀도가 낮아 도로주변으로 산재한 조경수 및 작은 군락의 산림으로 판단된다. 또한, 클래스 3, 5, 6을 통하여 재선충병 피해목의 분포는 도로접근성과 관계가 높았다(표 26, 그림 53).

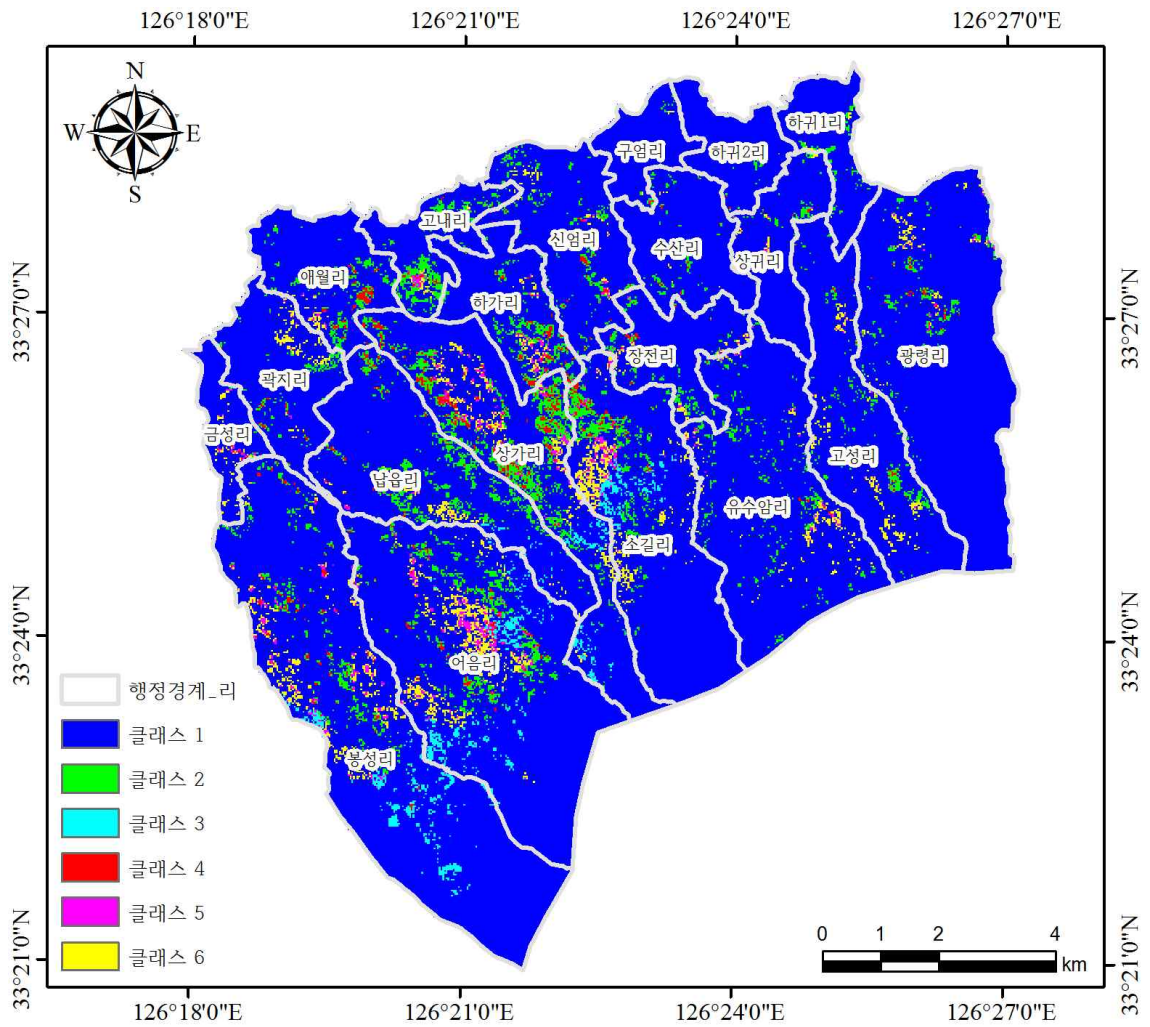


그림 53. K-means를 이용한 군집분포도

표 26. 행정구역별 클래스의 면적분포

(단위 : ha)

행정구역 (리)	클래스					
	1	2	3	4	5	6
고내리	222	45	-	2	3	4
고성리	698	26	-	2	2	22
곽지리	397	15	-	2	1	14
광령리	1,252	27	-	4	3	13
구엄리	203	2	-	-	-	1
금성리	175	1	-	2	4	10
납읍리	710	66	4	6	1	15
봉성리	1,603	46	45	12	18	50
상가리	674	110	17	33	20	40
상귀리	305	7	-	1	1	4
소길리	836	54	23	9	15	49
수산리	382	10	-	1	-	1
신엄리	516	29	-	4	2	6
애월리	361	29	-	9	2	5
어음리	1,342	71	47	12	26	70
유수암리	1,055	40	-	1	4	23
장전리	308	20	-	3	2	8
하가리	322	35	-	11	5	9
하귀1리	236	13	-	1	-	2
하귀2리	253	2	-	-	-	-
합계	11,849	649	135	115	111	345

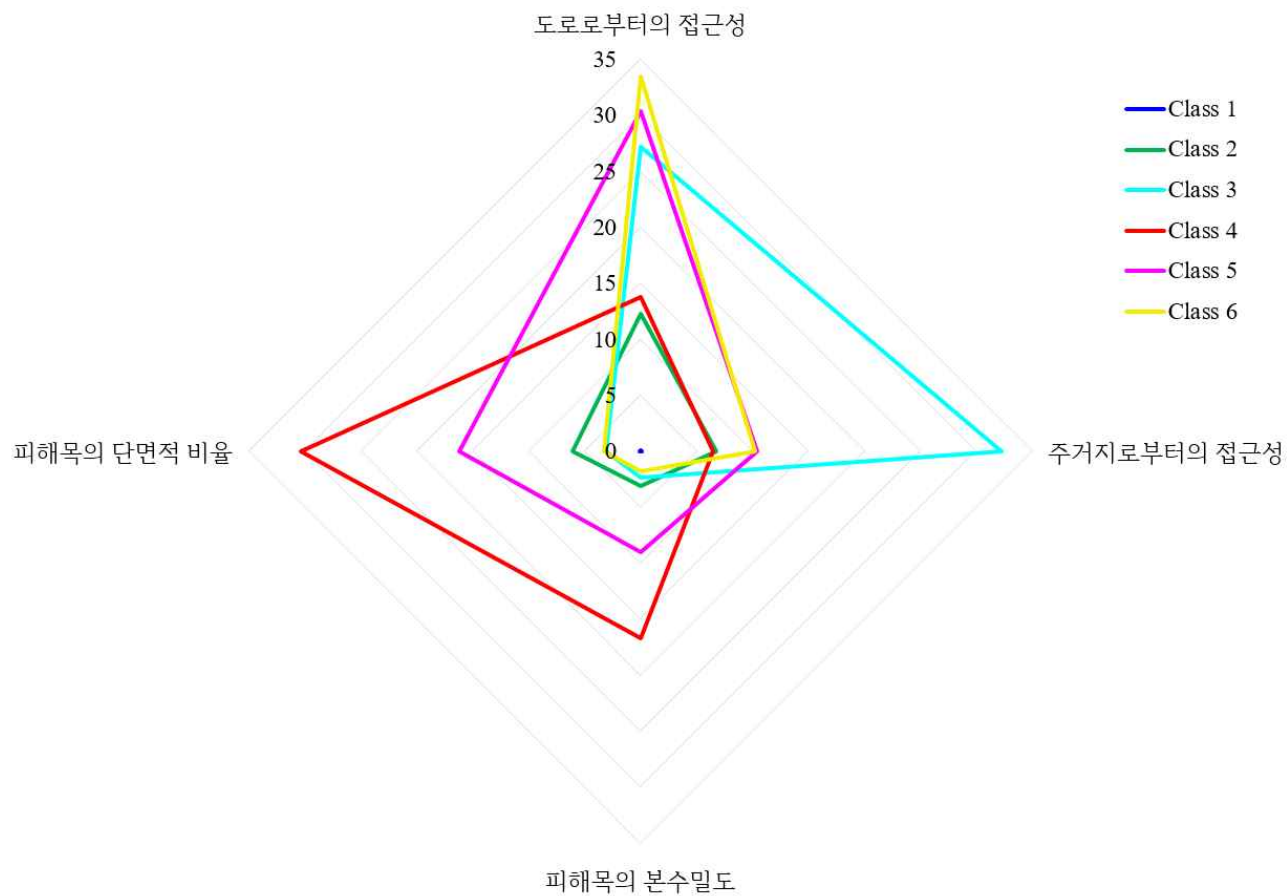


그림 54. 군집분석을 이용한 인자의 특성분석

(2) 시계열에 따른 행정구역별 군집분류 특성

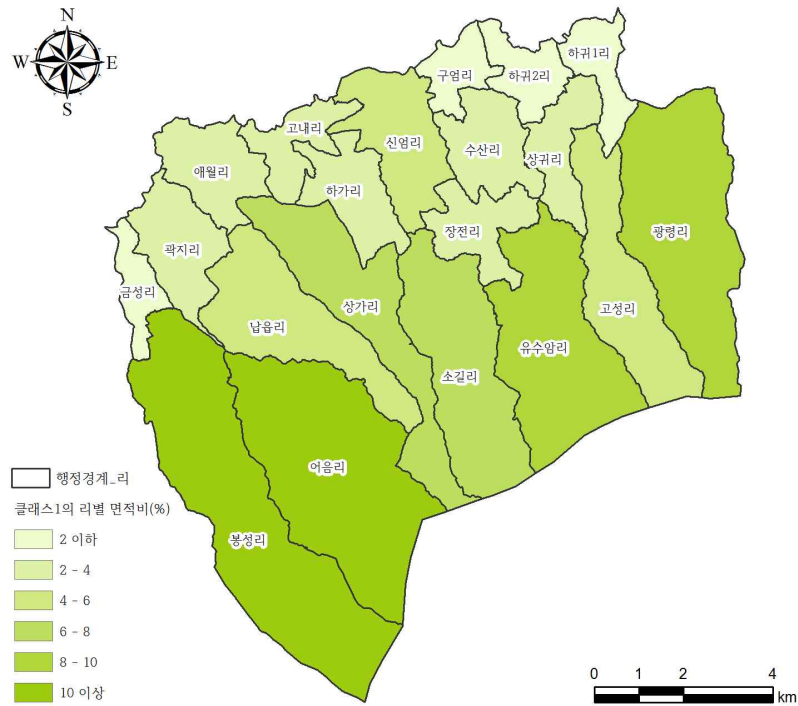
(1) 2013년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성

2013년 행정구역별 분포특성을 보면, 상가리는 클래스 1을 제외한 모든 클래스에서 면적 비율이 가장 높았으며, 상가리를 중심으로 주변 소길리와 어음리지역이 면적 분포가 높았다. 클래스별 분포특성을 보면, 클래스2와 4, 6은 상가리, 애월리, 어음리에서 높게 분포하였으며, 클래스 3은 상가리, 소길리, 신엄리에서 높게 분포하였다. 클래스 5는 남읍리, 상가리, 어음리에서 분포가 높았다(표 27).

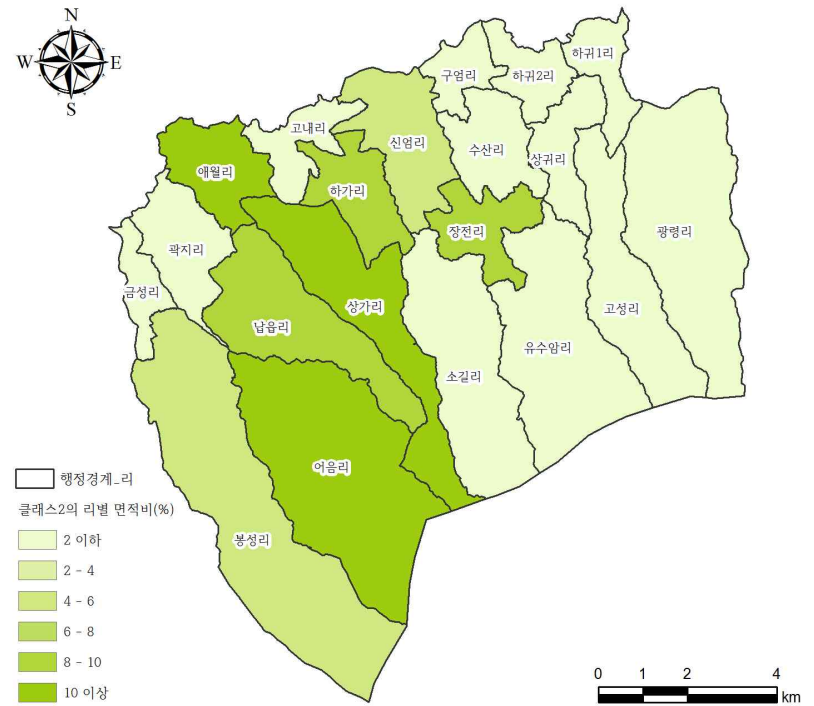
표 27. 2013년 행정구역별 클래스의 면적비율

(단위 : %)

행정구역 (리)	클래스					
	1	2	3	4	5	6
고내리	2	-	-	-	-	-
고성리	6	-	1	0.1	1	0.1
곽지리	3	1	1	1	1	1
광령리	10	1	1	-	1	0.2
구엄리	2	-	0.4	1	1	1
금성리	2	-	-	-	-	-
남읍리	6	9	3	8	10	6
봉성리	14	6	9	3	6	6
상가리	6	31	20	40	32	36
상귀리	2	-	3	1	2	2
소길리	8	2	16	6	9	5
수산리	3	1	2	1	1	1
신엄리	4	5	19	7	8	6
애월리	3	11	4	10	7	11
어음리	12	14	7	17	15	15
유수암리	9	1	6	0.4	2	2
장전리	3	9	2	2	2	3
하가리	3	8	6	3	5	6

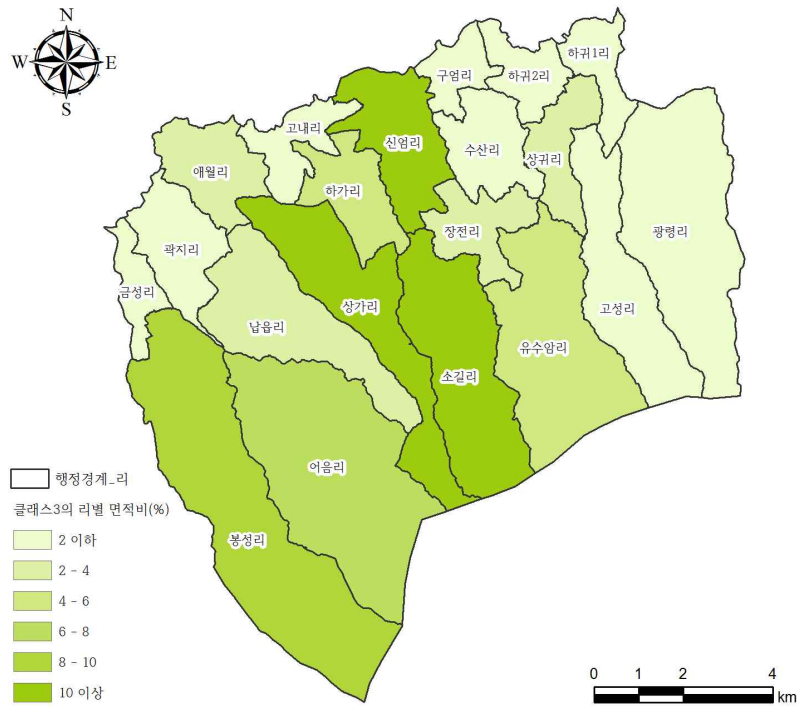


a. 클래스 1

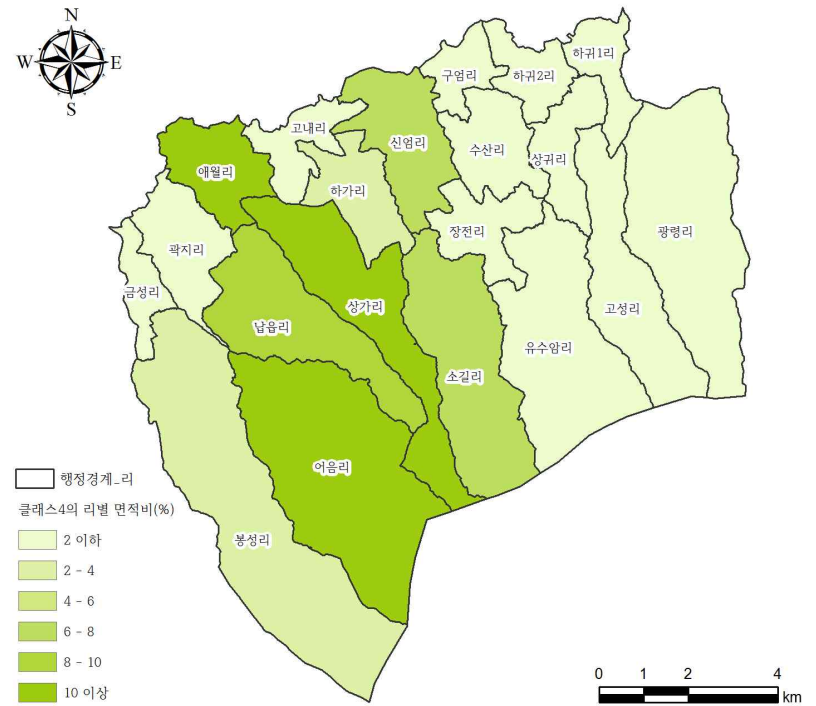


b. 클래스 2

그림 55. 2013년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (A)

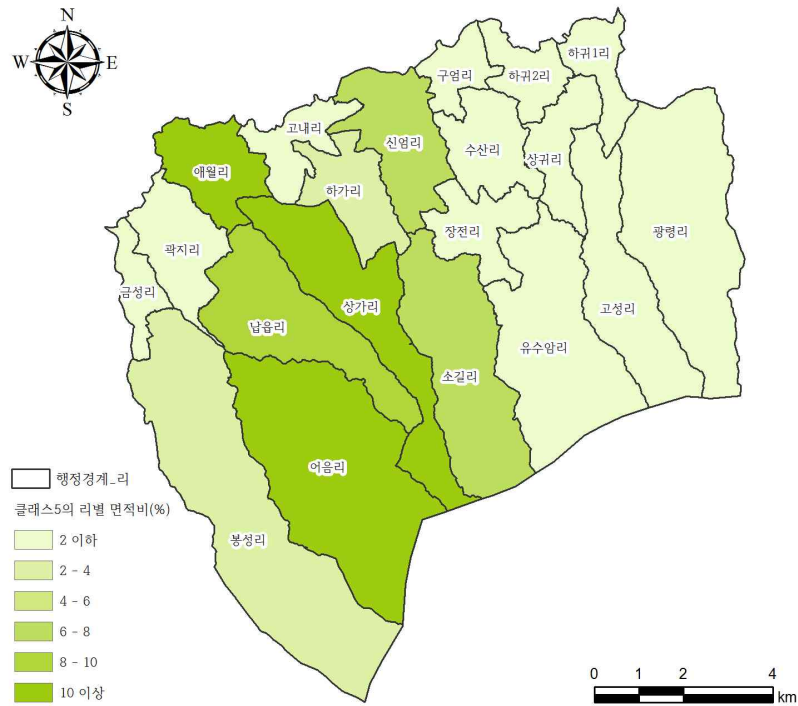


c. 클래스 3

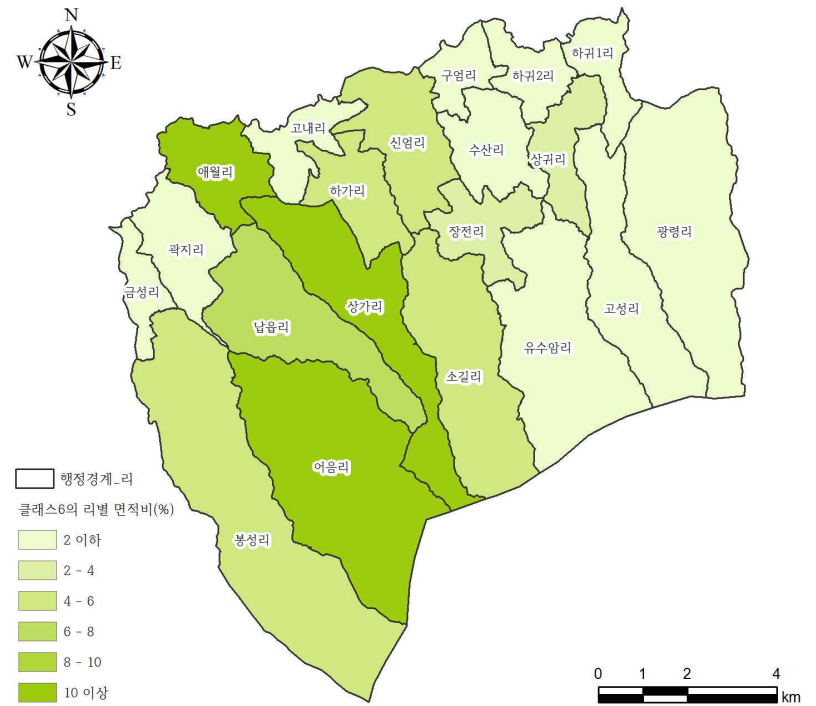


d. 클래스 4

그림 56. 2013년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (B)



e. 클래스 5



f. 클래스 6

그림 57. 2013년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (C)

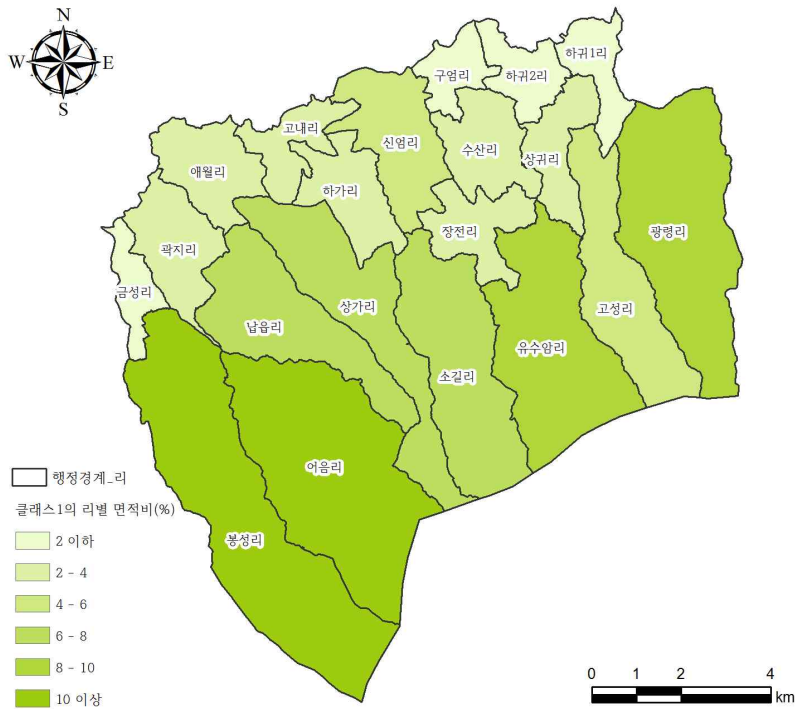
(2) 2014년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성

2014년 행정구역별 분포특성을 보면, 상가리를 중심으로 어음리와 하가리에서 높게 분포하였으며, 2013년과 비교하여 분포특성이 유사한 반면, 광령리가 모든 클래스에서 높은 값으로 분포하였다. 클래스별 분석결과, 클래스 1과 클래스 4를 제외한 모든 클래스에서 상가리, 어음리, 하가리에서 가장 높게 분포하였다. 클래스 4는 상가리에서 높게 분포하였으며, 금성리, 남읍리에서 높게 분포하였다(표 28).

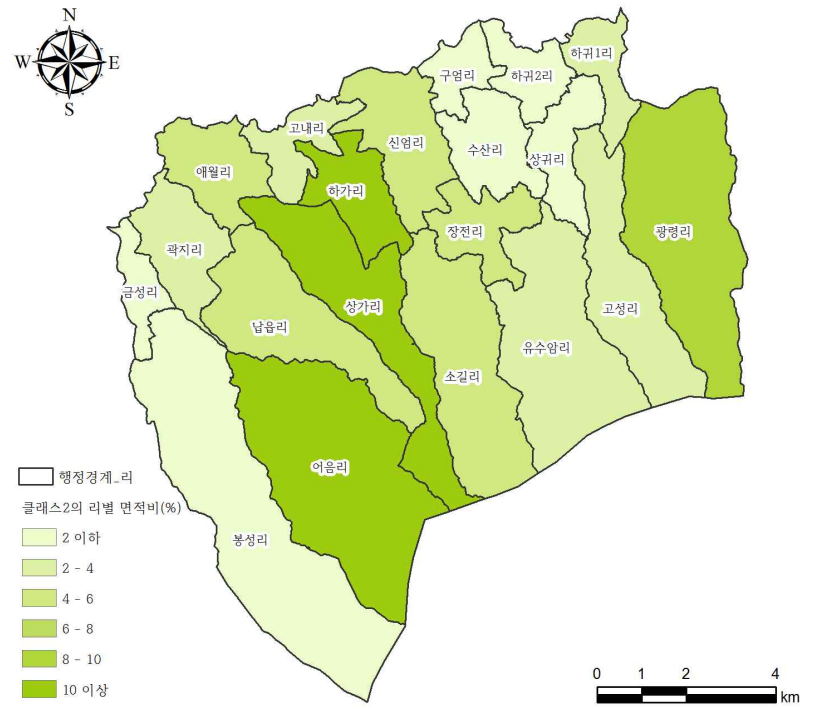
표 28. 2014년 행정구역별 클래스의 면적비율

(단위 : %)

행정구역	클래스					
(리)	1	2	3	4	5	6
고내리	2	3	2	-	-	2
고성리	6	4	5	-	5	2
곽지리	3	2	2	-	5	3
광령리	10	8	7	-	9	8
구읍리	2	-	0.2	-	-	-
금성리	2	1	1	18	4	7
남읍리	6	5	3	18	3	5
봉성리	14	2	2	-	1	-
상가리	7	15	13	47	13	16
상귀리	2	2	1	-	1	-
소길리	8	5	7	-	6	2
수산리	3	2	3	-	2	2
신엄리	4	4	5	-	2	10
애월리	3	5	7	6	4	-
어음리	12	22	17	6	15	13
유수암리	9	2	2	-	1	-
장전리	3	5	5	-	3	3
하가리	3	10	17	6	27	30
하귀1리	2	3	1	-	1	-
하귀2리	2	1	1	-	-	-

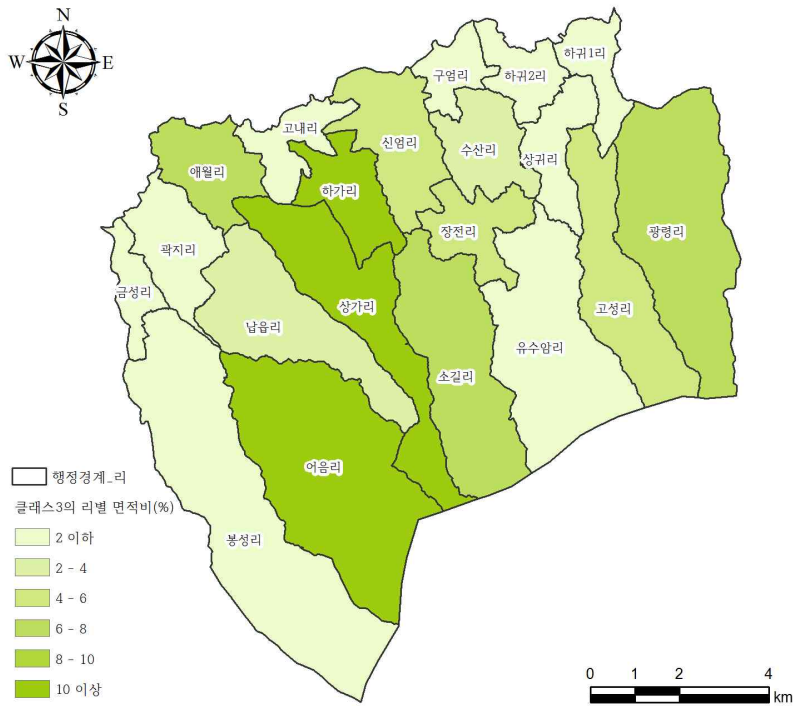


a. 클래스 1

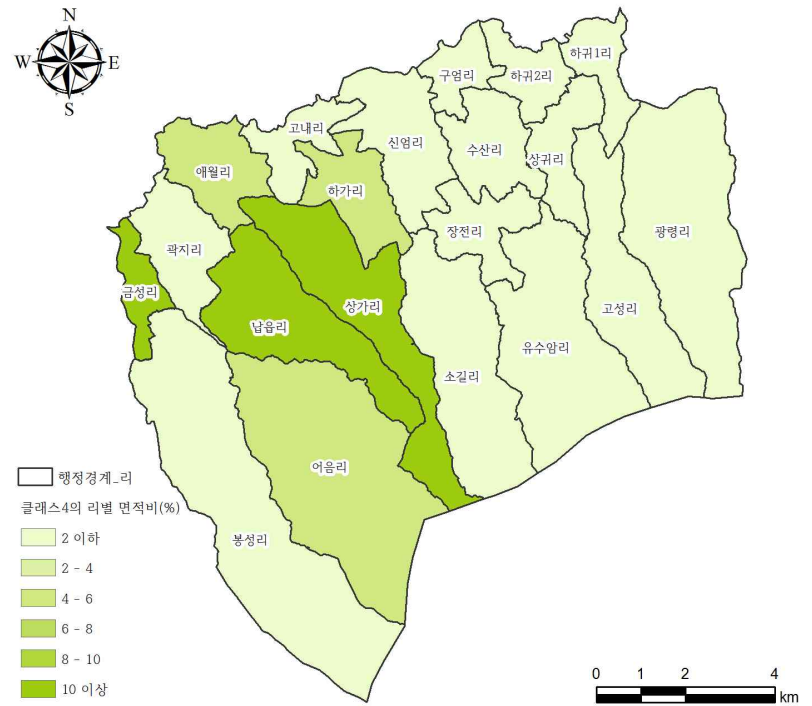


b. 클래스 2

그림 58. 2014년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (A)

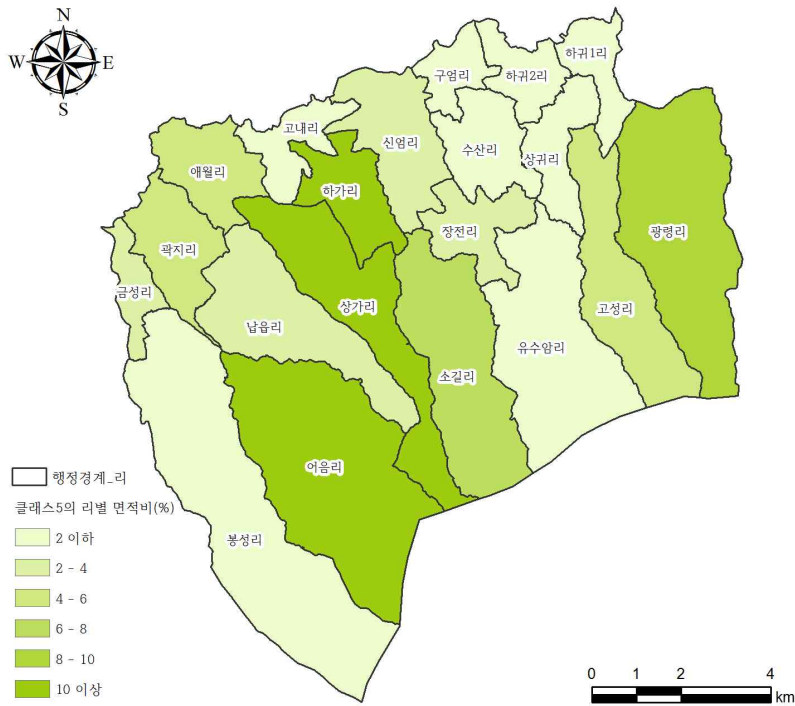


c. 클래스 3

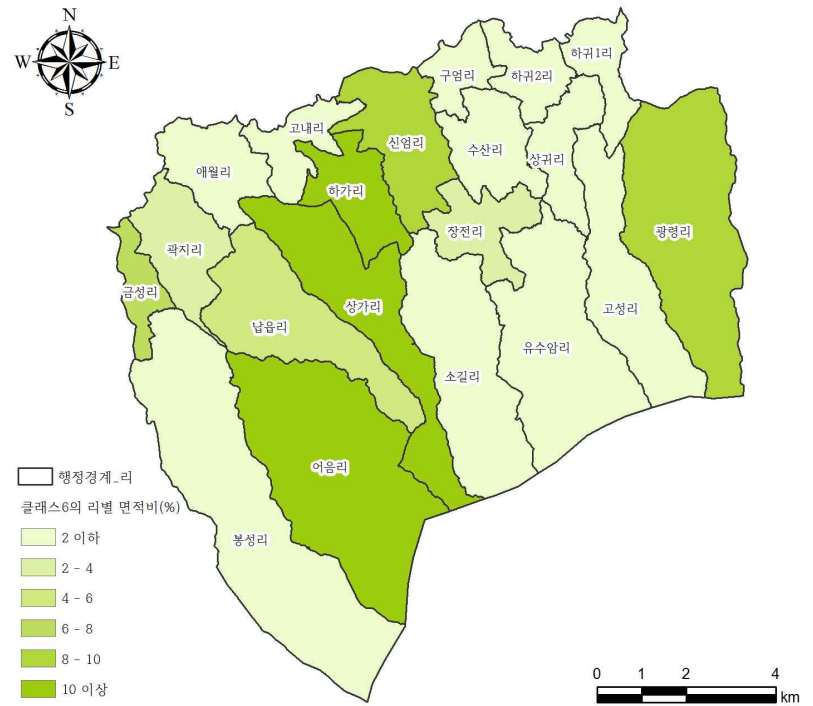


d. 클래스 4

그림 59. 2014년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (B)



e. 클래스 5



f. 클래스 6

그림 60. 2014년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (C)

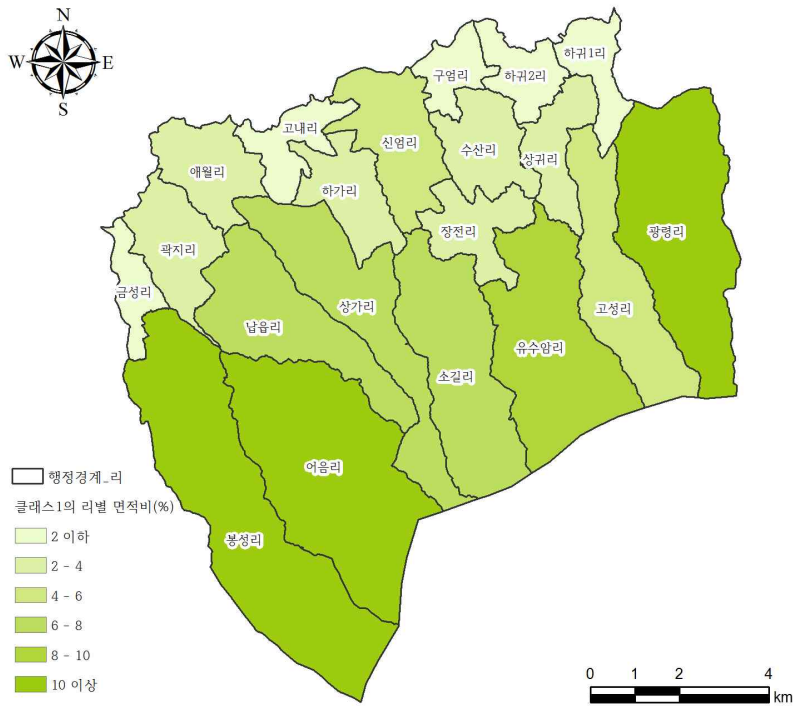
(3) 2015년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성

2015년 행정구역별 군집 분포특성을 보면, 상가리와 어음리를 중심으로 애월읍의 서쪽, 봉성리, 상가리, 소길리, 어음리에서 클래스의 값이 높은 지역이 넓게 분포하였다. 2013년, 2014년과 비교하여 클래스별 면적비율이 높은 지역이 넓게 분포하고 있다. 클래스별 분포특성을 보면, 클래스 2는 봉성리와 어음리에서 높게 분포하였으며, 클래스 1, 2를 제외한 모든 클래스에서 봉성리, 상가리, 소길리, 어음리에서 가장 높게 분포하고 있다(표 29).

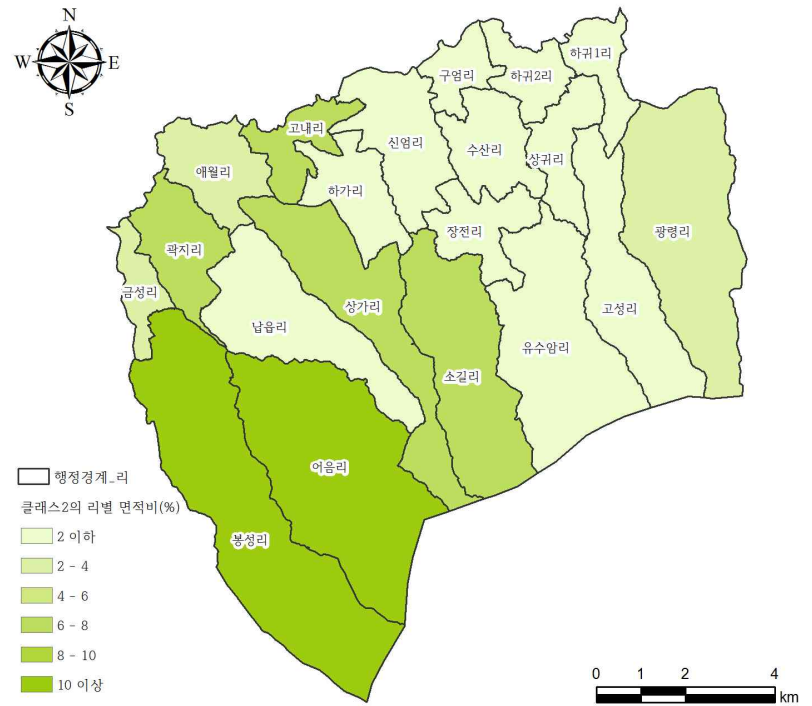
표 29. 2015년 행정구역별 클래스의 면적비율

(단위 : %)

행정구역	클래스					
(리)	1	2	3	4	5	6
고내리	2	7	7	10	9	5
고성리	6	1	4	3	1	6
곽지리	3	8	2	2	2	2
광령리	10	3	3	4	4	4
구엄리	2	-	0.1	-	-	0.1
금성리	2	3	1	2	6	1
납읍리	6	2	4	2	0	9
봉성리	13	39	19	25	45	12
상가리	6	7	18	16	9	18
상귀리	3	-	0.3	0.1	-	1
소길리	7	8	17	13	14	15
수산리	3	-	0.2	-	-	1
신엄리	4	1	1	1	-	1
애월리	3	3	1	2	-	2
어음리	12	20	12	11	7	12
유수암리	9	-	6	5	2	7
장전리	3	-	2	1	0.3	2
하가리	3	-	1	1	1	2
하귀1리	2	-	1	1	-	1

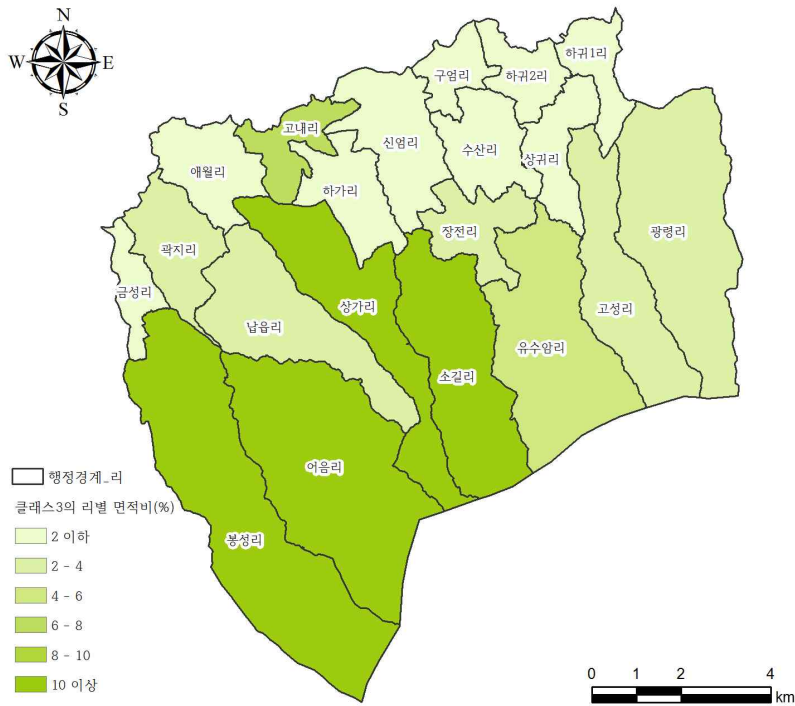


a. 클래스 1

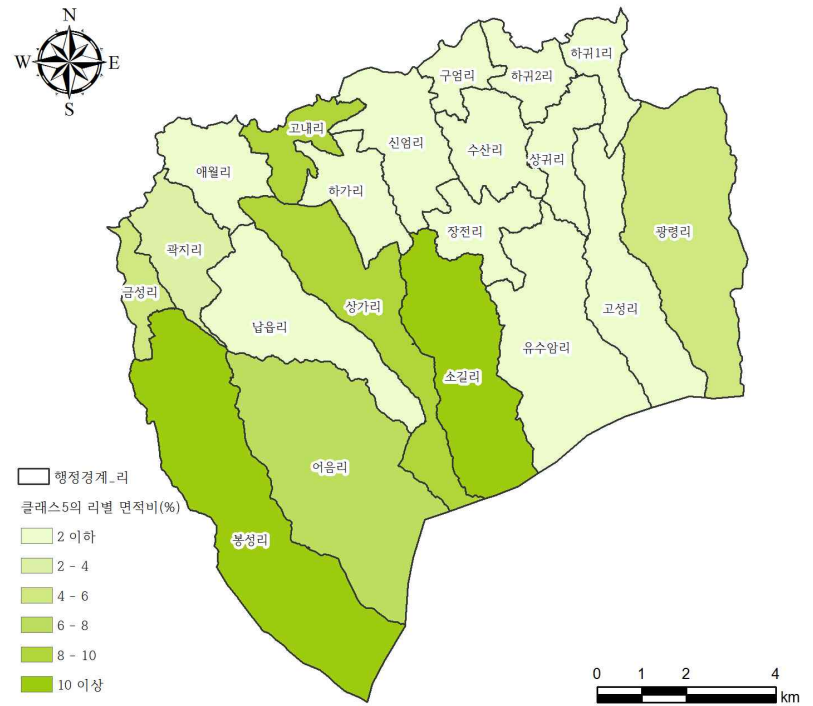


b. 클래스 2

그림 61. 2015년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (A)

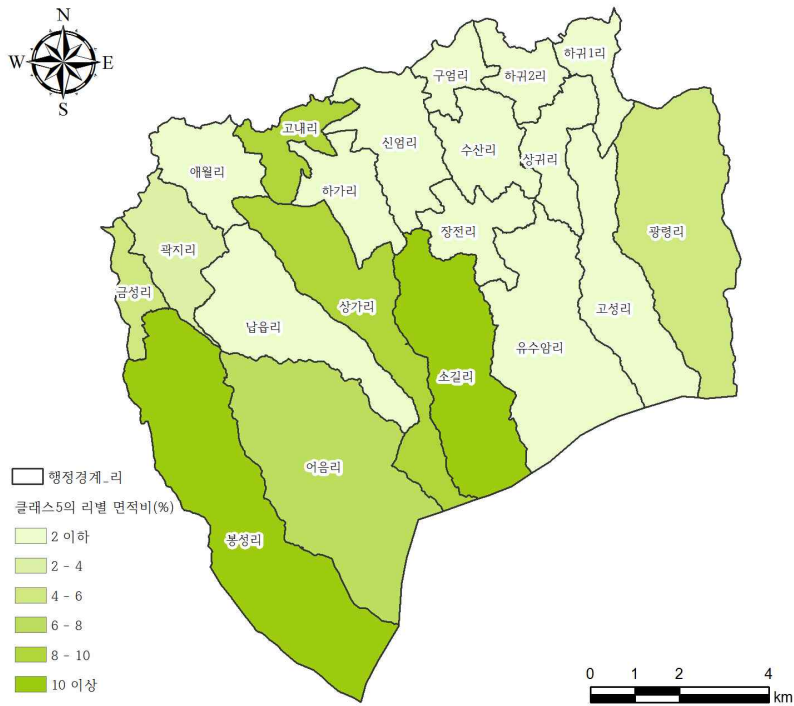


c. 클래스 3

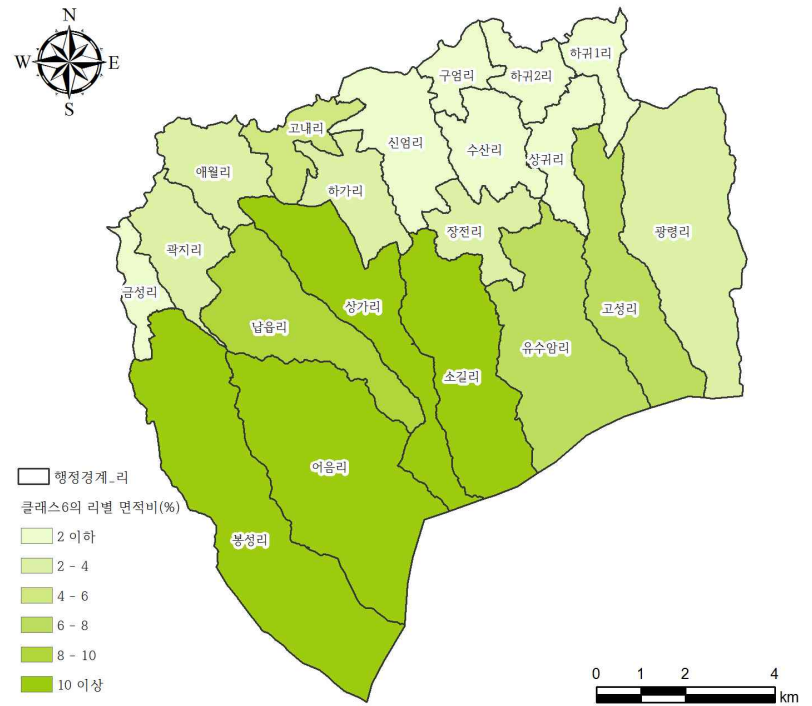


d. 클래스 4

그림 62. 2015년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (B)



e. 클래스 5



f. 클래스 6

그림 63. 2015년 행정구역별 피해목의 군집분류 특성 (C)

VI. 결론

본 연구는 제주도를 대상으로 지역특성을 고려한 곰솔의 수고추정 모델을 개발하고, 형상비를 통한 임분밀도를 분석하여 곰솔림 관리방안을 제시하였으며, GIS 공간 분석기능을 이용한 소나무재선충병의 시·공간적 분포특성의 파악하기 위하여 수행되었다. 지금까지 각 분야의 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

1. 곰솔의 수고추정 모델개발

곰솔의 수고추정 모델개발을 위하여 수고추정식으로 널리 이용되는 Exponential, Modified Logistic, Chapman-Richards, Weibull 모델이 사용되었다. 분석결과, 모든 수고추정식은 유의적으로 나타났으며, 모델검정통계량의 값은 결정계수는 모두 0.9259 이상이었으며, 평균제곱근오차는 2.2178~3.4945 범위, 평균편차는 -0.0287~0.0019 범위, 절대평균편차는 0.8413 ~2.7075 범위를 나타냈다.

모든 검정 결과, 최적모델식은 Exponential 모델로 나타났으며, 모든 모델곡선은 유사한 패턴으로 나타났고 선행연구와의 비교 결과 비이상적인 패턴은 나타나지 않았다. 본 연구에서 분석된 수고추정식은 제주도 곰솔림에서 수고추정을 함에 있어 널리 이용될 것으로 사료된다.

2. 형상비를 통한 임분밀도 분석 및 평가

제주지역 곰솔림의 형상비와 임분밀도에 따른 관리방안을 제시하기 위하여 사전 조사 및 현장답사를 통해 제주도 애월읍 곰솔의 임상에 있어 차이를 확인하고, 애월읍 애월리 해안가부터 한라산 일대까지 34개소의 조사구를 설치하여, 표준지별 임분밀도, 형상비, 상대밀도 비교분석을 실시하였다.

표준지별 평균흉고직경과 임분밀도의 관계를 파악한 결과, 전체적인 표준지의 임분밀도의 범위는 125 ~ 1,225본/ha로 나타났으며, 한라산 국립공원의 평균 흉고직경은 18.9 ~ 66.3cm, 국립공원 외 애월읍 표준지는 14.9 ~ 32.9cm로 나타났다. 전체적

으로 두 지역간 임분밀도에 대하여 평균 흉고직경 패턴이 차이가 나타났다. 또한 평균수고와 임분밀도의 관계분석 결과, 한라산 국립공원 표준지의 평균수고는 13.4 ~ 26.0m 범위를, 국립공원 외 애월읍 표준지의 평균수고는 10.8 ~ 19.3m의 범위를 나타냈다. 전체적으로 두 지역간 임분밀도에 대하여 평균수고 패턴이 차이가 나타났다. 표준지별 형상비와 임분밀도의 관계분석 결과, 한라산국립공원 내 표준지의 형상비는 26.4 ~ 88.6이었으며, 국립공원 외 애월읍 표준지의 형상비는 50.7 ~ 83.3로 나타났다.

제주지역 곰솔림의 흉고직경과 임분밀도와의 관계를 파악하고 상대밀도를 분석하였다. 분석결과, 한라산국립공원 내 위치한 표준지는 임분밀도가 과밀한 것으로 나타났다으며, 국립공원 외 애월읍에 위치한 표준지는 임분밀도가 상대적으로 적정한 것으로 분류되었다. 목표본수밀도 분석에 대하여 일본의 선행연구를 참고하여 비교분석을 실시한 결과, 형상비 60과 형상비 70 기준의 목표본수 밀도 그래프에서 모두 한라산국립공원 지역의 표준지들의 목표본수밀도를 위하여 본수조절이 필요한 것으로 나타났다.

3. 곰솔림 피해목의 공간적 분포변화 모니터링

재선충병 피해목의 시·공간적 분포특성의 분석을 위하여 2013년부터 2015년까지 발생한 소나무재선충병 피해목의 흉고직경과 입목좌표 자료와 GIS 공간분석기능, 다양성분석 및 K-means 기법을 이용하였다.

소나무재선충병 피해목의 연도별 재적피해 결과, 2013년에는 22,785m³가 나타났으며, 2014년에는 18,662m³, 2015년에는 29,273m³의 피해가 나타나 효과적인 방제가 시급한 것으로 사료되었다. 재선충병 피해목의 공간정보를 활용한 다양성 지수의 산출로 광범위한 산림지역의 공간분포 특성을 파악할 수 있었으며, 계량화된 분석방법을 이용함으로써 자연자원에 대하여 정량적인 평가가 가능하였다. 또한, 재선충병 피해목의 분포특성을 확인하기 위하여 K-means 기법을 이용한 군집분석을 실시한 결과 도로 및 주거지의 접근성, 피해목 본수 밀도, 피해목 단면적 비율과의 관계를 파악할 수 있었으며, 행정구역별 재선충병 피해목의 분포특성 및 패턴을 파악할

수 있었다.

본 연구를 통하여 재선충병 피해목의 다양한 공간적 평가와 패턴 분석이 가능하며, 재선충병 방제를 위한 정책수립을 위하여 기초자료로 활용이 가능할 것이라 판단된다.

VII. 인용문헌

1. 곽두안, 이우균, 김상우, 서정호. 2004. 소나무 수고 및 수간형태의 지역별 차이에 관한 연구. 한국산림측정학회지 7(1): 49-60.
2. 고은정, 안건혁. 2014. 사회적 다양성에 영향을 미치는 근린환경 특성에 관한 실증분석 -서울시를 대상으로-. 서울도시연구 15(1): 1-15.
3. 국립산림과학원. 2012. 우리나라의 해안방재림 실태. pp. 261.
4. 국립산림과학원. 2013a. 우리나라의 해안방재림 실태(II). pp. 123.
5. 국립산림과학원. 2013b. 남부산림권역 곰솔 자원 및 임분관리. pp. 75.
6. 국립산림과학원. 2014. 남부지역 주요 수종별 자원특성 및 평가. pp. 119.
7. 김귀곤, 조동길. 2004. 자연환경·생태복원학 원론. 아카데미 출판사. pp. 601.
8. 김동윤. 2008. Web-GIS를 이용한 소나무 재선충병 정보관리 시스템 개발. 경일대학교 석사학위논문. pp. 40.
9. 김석우, 전근우, 박기형, 임영협, 윤주웅, 권세명, 윤호중, 이진호, Yuki Yoshi Teramoto, Tsugio Ezaki. 2015. 곰솔 해안방재림의 형상비를 고려한 밀도 관리의 필요성과 방안. 한국임학회지 104(3): 411-420.
10. 김석환, 최송현. 2007. 부산광역시 해안림의 구조와 생태적 특성. 한국환경생태학회지 21(1): 67-73.
11. 김성훈, 김정환, 허준. 2007. 환경영향평가를 위한 생물다양성 분석의 표준화 연구. 대한토목학회 정기학술대회지. p. 3802-3805.
12. 김소라. 이우균, 남기준, 송용호, 유항남, 김문일, 이종열, 이승호. 2013. 소나무재선충병 감염목의 분광반사 특성 구명. 한국임학회지 102(4): 499-505.
13. 김응남, 김대영. 2008. 지상형 원격탐사기술을 이용한 소나무 재선충 피해조사. 한국지역지리학회지 14(1): 84-92.
14. 김정희. 2012. 공간통계를 이용한 공주시의 시공간적 지가변화패턴 분석. 한국지형공간정보학회지 20(1): 93-99.
15. 김찬범, 박기형, 이창우, 윤호중, 김경하. 2014. 우리나라 해안별 해안방재림의 유형특성 비교. 한국임학회지 103(4): 564-573.

16. 김현필, 이현호, 이주형. 2012. 해안방재림 조성지에 식재한 해송의 생장 특성에 관한 연구. 한국임학회지 101(4): 656-662.
17. 김준범, 조명희, 권태호, 김인호, 조운원, 신동호. 2004. GIS와 항공정사사진을 이용한 산림정보관리시스템 구축. 한국지리정보학회지 7(2): 57-68.
18. 김준범, 조명희, 김인호, 김영걸. 2003. IKONOS 衛星映像과 GPS를 活用한 소나무材線蟲 被害地域 抽出에 관한 研究. 한국임학회지 92(4): 362-366.
19. 문일성. 2014. 소나무재선충병 발생 상황 및 방제법. 수목보호 19: 26-34.
20. 박문섭, 이상태, 박진영, 신현철, 이경재, 전권석, 박남창. 2008. 해송의 권역별 임분동태 및 생장 특성에 관한 연구. 한국임학회 정기총회 학술발표회. p. 206-209.
21. 박종민, 김성원, 박성학. 2009. 고창 구시포 해안 곰솔림의 생장특성에 관한 연구. 한국환경생태학회지 23(4): 365-375.
22. 박준형, 이광수, 유병오, 강영제, 유석봉, 정수영, 배은지. 2013. 한국 남부권역 곰솔 임분의 식생구조 및 생장 특성. 농업생명과학연구 47(5): 135-145.
23. 산림청. 1998. 산림과 임업기술(III). pp. 668.
24. 산림청. 2007. 소나무 재선충병의 생태와 방제. 산림과학속보 pp. 17.
25. 산림청. 2014a. 산림과 임업 동향에 관한 연차보고서. pp. 696.
26. 산림청. 2014b. 2014년 임업통계연보. pp. 496.
27. 산림청. 2015. 2015년 임업통계연보. pp. 440.
28. 손영모. 1994. 지형, 토양 및 기상인자가 곰솔의 수고생장에 미치는 영향. 경상대학교 박사학위논문. pp. 64.
29. 손영모, 이광수, 유병오, 표정기. 2013. 남부지방 해송의 지위지수 추정. 농업생명과학연구 47(6): 119-126.
30. 서연옥, 이영진, 노대균, 김성호, 최정기, 이우균. 2011. 충청지역 주요 수종의 수고-흉고직경 생장모델에 관한 연구. 한국임학회지 100(1): 62-69.
31. 송민경, 장훈. 2010. 군집분석을 이용한 수도권 도시의 유형화에 관한 연구. 한국지형공간정보학회지 18(1): 83-88.
32. 숲과 문화. 2015. 제주도 재선충병에 의한 소나무 고사의 심각성. 숲과 문화 24(3): 51-54.

33. 안철호, 윤상호, 박병욱, 양경락. 1988. LANDSAT TM DATA를 이용한 솔잎혹파리 피해지역추출에 관한 연구. 한국측지학회지 6(2): 42-52.
34. 이강녕. 1986. 우리나라에서 곰솔의 분포와 변이에 관한 조립학적 연구. 경상대학교 논문집 25(1): 81-118.
35. 이강영. 1988. 우리나라 남해안지역에 있어서 해송림(林)의 생태학적 연구. 한국임학회지 77(1): 83-91.
36. 이신원, 이원휘. 2011. K-Means 클러스터링 성능 향상을 위한 최대 평균거리기반 초기값 설정. 한국 인터넷 정보학회 12(2): 103-111.
37. 이요한, 석현덕, 구자춘. 2014. 소나무재선충병과 방제 정책 과제. 한국농촌경제연구원. pp. 12.
38. 이우균. 1996. 강원도지역 소나무의 임분 및 일반 수고 - 흉고직경곡선 모델. 산림경제연구 4(2): 66-78
39. 이정빈, 김은숙, 이승호. 2014. 지상용 초분광 카메라를 이용한 소나무재선충병 감염목 분광 특성 분석. 대한원격탐사학회지 30(5): 665-675.
40. 임업진흥원. 2015. 임업정보다드림. https://www.kofpi.or.kr/service/imupInfo_01.do
41. 전근우, 김석우, 박기형. 2013. 일본에 있어서 곰솔 해안림의 관리지침과 그 기본개념(1) -본수 조정을 위한 적정본수 산정을 중심으로-. 한국산림공학회지 11(1): 32-39.
42. 전일권, 김경수, 남일기, 박성천. 2010. 하천관리실무. pp. 372.
43. 정광중. 2013. 제주도 애월읍의 지리적 환경과 인구변화의 특징. 한국사진지리학회 23(3): 57-79.
44. 정영관, 박명숙. 1999. 곰솔임분의 직경 및 수고생장 추정에 관한 연구. 한국임학회지 88(1): 47-54.
45. 정영진. 2002. 우리나라에서의 소나무재선충 피해발생과 확산현황. 수목보호 7: 1-9.
46. 제주특별자치도. 2014. 제주특별자치도 통계연보. www.jeu.go.kr
47. 제주특별자치도. 2015a. 제주환경생태정보시스템. www.nature.jeu.go.kr.
48. 제주특별자치도. 2015b. 제2차 소나무재선충병 총력방제 추진결과. pp. 83.
49. 조희두. 1988. 통리 해수욕장 녹지대 조성에 관한 연구(Ⅱ): 곰솔 해안방재림(海

- 岸防災林)의 수관량(樹冠量) 및 토양분석, 식재기반평가(植栽基盤評價) 및 녹지
대계획. 한국임학회지 77(3): 303-314.
50. 차경현, 김경호, 황유민, 이동창, 김상지, 김진영. 2014. 빅데이터를 이용한 범죄
패턴 분석 알고리즘의 구현. 통신위성우주산업연구회 9(4): 57-62.
 51. 천광일, 정성철, 윤호중, 변준기, 주성현. 2012. 경상북도 동해안 곰솔림의 군집
구조. 농업생명과학연구 46(4): 57-68.
 52. 하우연. 1998. 서해안 곰솔임분의 군집구조 및 개체군 동태. 경상대학교 석사학
위논문. pp. 53.
 53. Avery TE, Burkhardt HE. 2002. Forest Measurements. 5th ed. McGraw-Hill, New
York, NY, pp. 456.
 54. Chapman DG. 1961. Statistical problems in dynamics of exploited fisheries
populations. Proceedings of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics
and Probability. Vol.4. Berkeley, CA. p. 153-168.
 55. Forestry and Forest Products Research Institute. 2011. Guidelines and fundemental
concepts for the management of *pinus thunbergii* coastal forests: control of the
number of trees and utilization of invading broadleaved trees. Tsukuba, Japan. pp.
55. (in Japanese)
 56. Huang S, Titus SJ, Wiens DP. 1992. Comparison of nonlinear height-diameter
functions for major Alberta tree species. Canadian Journal of Forest Research 22:
1297-1304.
 57. Laso Bayas JC, Maroh C, Dercon G, Dewi S, Piepho HP, Joshi L, van Noordwijk
M, and Cadisch G. 2011. Influence of coastal vegetation on the 2004 tsunami wave
impact in west Aceh. Proceedings of the National Academy of Sciences of the
United States of America 108: 18612-18617.
 58. Lee DS, Choi JK, Seo YW, Kim EG. 2014. Nonlinear height-DBH growth models
for *Larix kaempferi* in Gangwon and North Gyeongsang province. Journal of Forest
and Environmental Science 30(2): 201-207.
 59. Lee YJ, Coble DW, Pyo JK, Kim SH, Lee WK, Choi JK. 2009. A mixed-effects
height-diameter model for *Pinus densiflora* trees in Gangwon province, Korea.

Journal of Korean Forest Society 98(2): 178-182.

60. Lindeberg T. 1994. Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales. *Journal of Applied Statistics* 21(2): 225-270.
61. Lo CP, Yeung AKW. 2002. *Concepts and Techniques of Geographic Information Systems*. Upper Saddle River, NJ. pp. 544.
62. Lumbres RIC, Lee YJ, Seo YO, Kim SH, Choi JK, Lee WK. 2011. Development and validation of nonlinear height-DBH models for major coniferous tree species in Korea. *Forest Science and Technology* 7: 117-125.
63. McNaughton, SJ. 1967. Relationship among functional properties of California Glassland. *Nature* 216: 144-168.
64. McQueen J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. pp. 281-297.
65. Mirov NT. 1967. *The genus pinus*. The Ronald Press Company. pp. 602.
66. Ratkowsky DA, Reedy TJ. 1986. Choosing near-linear parameters in the four-parameter logistic model for radioligand and related assays. *Biometrics* 42: 575-582.
67. Ratkowsky DA. 1990. *Handbook of nonlinear regression models*. Marcel Dekker Inc., New York, NY, pp. 264.
68. Richards FJ. 1959. A flexible growth function for empirical use. *J Exp Bot.* 10: 290-301.
69. SAS Institute Inc. 2013. *SAS/STAT 9.4 User's Guide*. SAS Institute Inc., Cary, NC.
70. Sánchez-González M, Cañellas I, Montero G. 2007. Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain. *Invest Agrar: Sist Recur For* 16: 76-88.
71. Soares P, Tomé M. 2002. Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management* 166: 99-109.
72. Yang RC, Kozak A, Smith JHG. 1978. The potential of Weibull type functions as flexible growth curves. *Canadian Journal of Forest Research* 8: 424-431.

73. 小田隆則. 1984. 海岸クロマツ林の間伐について -間伐試験をもとにした一試論-. 治山 29(4): 92-103.
74. 小田隆則. 1992a. クロマツ林の林況. 「日本の海岸林」, ソフトサイエンス社. 村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也編 : 399-402.
75. 小田隆則. 1992b. クロマツ林の密度管理. 「日本の海岸林」, ソフトサイエンス社. 村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也編 : 402-405.
76. 金子智紀・畠山宏信. 1984. 海岸クロマツ林間伐試験地の生長経過について. 日本林學會東北支部會誌 36: 22-25.

Studies on Forest Stand Management of *Pinus thunbergii* in Jeju Island

Gil Dong Park

***Department of Forest Management
Graduate School, Kangwon National University***

Abstract

This study was conducted to develop height-DBH nonlinear model of *Pinus thunbergii* based on regional characteristics of Jeju Island, to suggest management plan of the stands considering its shape ratio and stand density, and to analyze space-time distribution characteristics of pine wilt diseased trees using GIS spacial analysis function.

To develop the height equation over DBH in *Pinus thunbergii* of Jeju Island, Exponential, Modified Logistic, Chapman-Richards, Weibull models were used in this study. As a result, the estimated height equations were significant at the 0.01% level, and the model curves of all models were similar. As a result of fit statistics, Exponential model was finally selected as the best model, and there was no abnormal pattern when compared to the model in previous studies.

To analyze the stand density through the shape ratio of *Pinus thunbergii* stands in Jeju Island, 34 plots from Aewol-eup Aewol-ri to Mt. Halla were investigated, and the shape ratio and the degree of stand density were analyzed using average DBH and

height. As a result, the shape ratio of the plots in Mt. Halla was different from the shape ratio of the plots in Aewol region outside of national park.

In analyzing relative density, the stand density of *Pinus thunbergii* stands in Mt. Halla was relatively high, and the stand density in Aewol region outside of national park was appropriate. Thus, thinning was considered to be needed for target stand density in the region of Mt. Halla.

Using the information of diseased trees in the year of 2013~2015, volume distribution of diseased trees in *Pinus thunbergii* stands was analyzed by year. The amount of diseased volume was 22,785m³ in 2013, 18,662m³ in 2014, 29,273m³ in 2015, and thus, effective prevention is necessary for *Pinus thunbergii* stands.

To check the distribution characteristics of diseased trees, cluster analysis was performed using K-means method. As a result, accessibility of road and residential area, stand density of diseased trees, and basal area ratio of diseased trees, and distribution characteristic and patterns of diseased trees by administrative district were figured out.

This study was conducted for the forest stand management of *Pinus thunbergii* in Jeju Island. Height estimation using DBH, stand density management using shape ratio, and spacial assessment and pattern analysis of GIS are highly expected to be used as fundamental information for the management of *Pinus thunbergii* stands in Jeju Island.

Key words: *Pinus thunbergii*, height-DBH model, stand density, pine wilt disease, GIS

감사의 글

석사를 마치고 만학의 길을 걸어온 지 어언 12년!

학업보다는 사업에 우선하다보니 시간은 유수와 같이 흐르고 학위를 포기할까도 수차례 고민하고 생각했지만 끝까지 나의 손을 뿌리치지 않고 잡아 주신 최정기 지도교수님께 먼저 깊은 감사와 존경의 말씀을 드립니다.

또한 본 논문을 위해 논문심사 과정에서 애정을 가지고 유종의 미를 거둘 수 있도록 큰 힘을 주셨던 차두송 심사위원장님과 논문을 꼼꼼히 확인하고 지도하여주신 최인화교수님, 그리고 이 논문이 완성될 수 있도록 지도편달과 심사를 해주신 이정수교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 임업진흥원에서 논문심사를 위해 바쁜 일과에도 시간을 내 주셔서 많은 조언과 심사를 해 주신 조현국박사님께도 감사드립니다.

학부과정부터 석사, 박사과정까지 항상 관심과 애정을 가지고 지도해주시고 가르쳐주신 김지홍교수님, 우종춘교수님께도 진심으로 머리숙여 감사드리며, 산림경영학과 학과장님이신 김준순교수님께도 감사드립니다.

그리고 본인의 연구와 바쁜 업무에도 주야 가리지 않고 논문을 마칠때까지 아낌없이 지도해주시고 부족하나마 논문이 완성될 수 있도록 용기와 희망을 주고 편집을 도와주신 산림과학연구소 서영완박사님께 깊은 감사를 드립니다.

논문 마무리작업을 위하여 며칠 밤을 지새며 도와준 산림측정학실험실 박사과정 이대성군과 GIS연구실 박진우대학원생, 그리고 바쁜 회사일에도 불구하고 현장조사, 논문자료 수집과 정리를 도와준 이우용대리에게도 고마움을 전합니다.

그리고 본 논문의 기초가 되는 자료제공과 조언을 아끼지 않았던 한국산림기술사회 정규원 기술사님, 제주특별자치도청 산림휴양정책과 강인보사무관님, 김홍림주무관님께도 감사드립니다.

그리고 멀리 CANADA에서 전폭적인 지지와 응원을 해준 사랑하는 나의 아내 이미라, 아들 영웅, 딸 술아에게도 고마움을 전하며, 자나 깨나 노심초사하고 오직 자식 잘되기만을 바라는 부모님과 장모님께도 감사드립니다.

이외에도 사랑과 관심으로 부족한 저를 지켜봐주신 주위 모든 분들께 감사의 말씀을 전합니다.