

멸종위기 침엽수종 보전 (Ⅱ)

- 분비나무 -

국립백두대간수목원

발간사

지금 우리가 살고 있는 지구는 기후변화로 인해 위기를 맞고 있으며, 특히 홍수, 산불, 가뭄 등으로 기록적인 자연재해가 전세계를 휩쓸고 있습니다. 또한 많은 과학자들은 기후변화로 인해 북극 지역의 영구 동토층의 용해 및 그린란드 빙상이 전례없는 속도로 녹고 있으며, 6차 대멸종의 가속화, 아마존 열대우림의 산림파괴 증가 등 재앙적인 결과를 가져올 수 있는 일련의 전환점을 넘었다고 끊임없이 경고하고 있습니다.

기후변화는 현재 우리가 직면한 가장 심각한 환경 문제 중 하나입니다. 온난화로 인해 기후패턴이 변하면서 자연생태계는 큰 변화를 겪고 있습니다. 이러한 변화는 우리의 숲과 그 안에 서식하는 종들에게도 영향을 미치고 있습니다. 특히 분비나무는 이러한 기후변화에 매우 민감하게 반응하고 있습니다.

분비나무는 우리나라의 소백산, 치악산, 설악산 등 해발 700m 이상 아고산대 산지 능선부에 분포해 있고, 상록침엽교목으로 높이 25m, 지름 75cm에 달하고, 수피는 약간 회백색을 띠고 있습니다. 잎은 뾰족하며 역세나 비늘처럼 벗겨지며 수관은 원추형으로 매우 아름다운 수형을 지니고 있습니다.

이렇듯 분비나무는 기후의 변화와 서식처에 환경에 대해 대응하기 어려운 특성을 가지고 있습니다. 그들은 특정한 온도와 습도조건에 적응되어 있으며, 기후가 급격히 변화함에 따라 생존환경도 변화하게 됩니다. 더 높아진 온도와 불규칙한 강우로 인해 분비나무는 스트레스를 받고, 이는 그들의 생존 방식에 부정적인 영향을 미칠 것입니다.

우리의 자연환경은 인간활동으로 인해 빠르게 변화하고 있습니다. 특히, 멸종위기에 처한 침엽수종은 우리의 주목과 보호가 필요한 중요한 자원입니다. 그 중에서도 분비나무는 특별한 관심을 받아야 할 대상 중 하나입니다. 분비나무는 우리 생태계의 풍요로움을 유지하는 데 중요한 역할을 합니다. 이 나무는 자연적으로 환경을 보호하고 생태계의 균형을 유지하는 데 도움이 되는 다양한 서비스를 제공합니다. 예를

들어, 우리의 대기를 정화하고, 토양 침식을 방지하며, 다양한 동식물의 서식지를 제공합니다. 그러나 인간의 개입으로 인해 분비나무의 수량은 급격히 감소하고 있습니다.

우리는 멸종위기에 처한 침엽수종을 보호하고자 할 때 분비나무의 중요성을 간과해서는 안 됩니다. 이 나무들이 사라지면, 우리의 생태계는 큰 타격을 입을 것입니다. 따라서 우리는 분비나무의 보전을 위한 노력을 강화해야 합니다. 분비나무의 보전은 우리 모두의 책임입니다. 지속가능한 삶을 지향하는 우리는 분비나무를 존중하고 보호해야 합니다. 이를 위해 우리는 분비나무를 식재하고 보존하는 데 더 많은 노력을 기울여야 합니다. 또한, 분비나무의 중요성을 홍보하고 대중의 인식을 높이는 것도 중요합니다.

마지막으로, 이 발간사를 통해 우리의 목표는 멸종위기에 처한 침엽수종을 보전하고 지속가능한 미래를 위해 분비나무의 보전을 촉구하는 것입니다. 우리의 노력이 자연과 인류에 긍정적인 영향을 미치기를 바랍니다.

그리고 매년 높은 산지를 오르내리며 산림생태계 보전을 위하여 힘쓰는 국립백두대간수목원 연구진 여러분의 노고에 감사의 말씀을 드립니다. 이 연구보고서가 훗날 산림생태계 보전의 중요성을 깨닫게 되는 귀중한 자료로 남기를 바랍니다.

2023년 12월

국립백두대간수목원장 한 창 술

- 목 차 -

1. 머리말	1
2. 분비나무의 유전학적 특성	2
3. 분비나무숲의 군집구조	11
4. 분비나무숲의 서식지 변화 예측	33
5. 분비나무숲의 산리해충	48
5. 분비나무 종자 활력 검정	93
6. 분비나무숲의 나이테 분석과 생장량	115
7. 분비나무숲 산림디지털공간 구축	135
8. 분비나무 보전가치 평가	196
<참고문헌>	211

<표 차례>

표 1. 분비나무 수집정보	5
표 2. 분석에 분석에 사용된 유전자 지역 및 프라이머사	7
표 3. 각 집단별 확인된 유전자형	8
표 4. 유전자형의 염기서열	9
표 5. 수관밀도 분류 기준	16
표 6. 군집구조에 따른 조사대상지 현황	22
표 7. 분비나무 집단 One-way ANOVA 분석 결과(해발고도, 종다양성, 균재도)	25
표 8. 분비나무 집단 빈도분석 결과(암석노출도, 사면방위)	25
표 9. 분비나무 임분의 군집별 중요치	27
표 10. 군집 별 분비나무 치수 밀도	31
표 11. 분비나무 SDM 분석에 사용된 지형·환경 변수 데이터	36
표 12. 모형별 정확도 평가	40
표 13. 분비나무 해충 조사를 수애한 조사지 정보	50
표 14. 조사에 활용한 곤충 트랩 및 유인제 조건	58
표 15. 각 조사지에서의 산림해충 조사 기간	59
표 16. 각 조사지에서 확인된 나무좀류	88
표 17. 각 조사지에서 확인된 하늘소류	89
표 18. 각 조사지에서 확인된 노린재류	90
표 19. 종자수집에 필요한 물품	96
표 20. BI 기준 발아검정 미보고 종자 발아검정 절차	101
표 21. 분비나무 종자의 수집지별 천립중	104
표 22. 분비나무 종자의 수집지별 충실율	105
표 23. 분비나무 종자의 수집지별 형태 이미지	106
표 24. 분비나무의 화악산지역의 종자 활력검정	109
표 25. 분비나무의 황병산지역의 종자 활력검정	110
표 26. 분비나무의 장산지역의 종자 활력검정	110

표 27. 분비나무의 발왕산지역의 종자 활력검점	111
표 28. 분비나무의 가리왕산지역의 종자 활력검정	111
표 29. 분비나무의 함백산지역의 종자 활력검정	112
표 30.. 분비나무의 채집지별종자 활력 검정	116
표 31. 분비나무 흥고직경-수령 회귀식	120
표 32. 분비나무림의 영급과 흥고직경	122
표 33. 가리왕산 분비나무림 내 개체목 5개에 대한 비교(2022년 vs 2023년)	172
표 34. 발왕산 분비나무림 내 개체목 5개에 대한 비교(2022년 vs 2023년)	194
표 35. 응답자 특성	202
표 36. 기금의사 응답반응	203
표 37. 자동이체 및 은행지로 납부여부	204
표 38. 최초지불의향 금액의 1/2배 금액 기금 지불 의향	205
표 39. 보전 기금 지불의사 이유	206
표 40. 보전 기금 지불의사가 없는 이유	207
표 41. 보전 기금 지불의사에 미치는 변수에 대한 결과	208
표 42. 최종 로짓모형 추정 결과	209

〈그림 차례〉

그림 1. 우리나라 구과식물의 계통수(국립수목원, 2012)	4
그림 2. 분비나무 채집 지역	6
그림 3. 분비나무 유전자형 지리적 분포패턴	10
그림 4. 조사대상지 현황	13
그림 5. 원형 조사구 구획 방법	15
그림 6. 수종에 따른 수형 특징(Photo by Dong Bin Shin).	15
그림 7 Suunto Clinometer를 사용하여 경사를 측정하는 모습(함백산)	16
그림 8 조사구 내 중심의 모습(반경 11.3m 이내의 모든 임목을 측정)	16
그림 9 조사구 내에서 매목조사를 하는 모습(함백산)	17
그림 10 절척을 사용하여 분비나무 치수 조사를 하고 있는 모습(함백산)	17
그림 11. 분비나무림 TWINSpan 분석결과	20
그림 12. NMS ordination 분석 결과	21
그림 13. 상층에 분비나무가 우점하고 있고 모습(군집 IV). 숲틈(Forest gap)이 형성되지 않아 임내 광량이 적어 하층 식생의 발달이 저조한 모습.	21
그림 14. 분비나무가 고사하여 숲틈이 형성된 모습.	22
그림 15. 분비나무에 덩굴식물인 미역줄나무가 피압하고 있는 모습(군집 I)	23
그림 16. 분비나무와 신갈나무가 함께 생육 중인 모습(군집 II)	24
그림 17. 군집 별 분비나무 임분의 흉고직경급 분포도	32
그림 18. SDM 적용 모식도(Lee et al., 2023).	38
그림 19. 현재 분비나무 서식가능구역 분석결과(Lee et al., 2023).	41
그림 20. 이변량 분석을 통한 지형환경변수 간의 관계 분석(Lee et al., 2023).	42
그림 21. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석결과. (a) 2050(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)	44
그림 22. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석 지리산 강원도 구역 확대 결과. (a) 2050(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)	45
그림 23. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석결과. (a)	

2050(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)	46
그림 24. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석 지리산 강원도 구역 확대 결과. (a) 2050(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)	47
그림 25. 린드그렌 퍼널 트랩(LFT) 구성도	51
그림 26. 윈도우 트랩(WT) 구성도	52
그림 27. 가리왕산 조사지 내 트랩종류 및 배치	53
그림 28. 계방산 조사지 내 트랩종류 및 배치	54
그림 29. 발왕산(I) 조사지내 트랩 종류 및 배치	55
그림 30. 발왕산(II) 조사지 내 트랩종류 및 배치	56
그림 31. 가리왕산 내 설치한 트랩 모습	60
그림 32. 발왕산 I 내 설치한 트랩 및 조사 활동 모습	61
그림 33. 장산 내 설치한 트랩 및 조사 활동 모습	62
그림 34. 발왕산 II 내 설치한 트랩 모습	63
그림 35. 현장조사 및 정리된 샘플 모습	64
그림 36. 가리왕산 내 유인제별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	65
그림 37. 가리왕산 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	66
그림 38. 가리왕산 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	67
그림 39. 가리왕산 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	67
그림 40. 가리왕산 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	68
그림 41. 가리왕산 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	69
그림 42. 계방산 내 유인제별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	70
그림 43. 계방산 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	71
그림 44. 계방산 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	72
그림 45. 계방산 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	72
그림 46. 계방산 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	73
그림 47. 계방산 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	74
그림 48. 발왕산(I) 내 유인제별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	75

그림 49. 발왕산(I) 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	76
그림 50. 발왕산(I) 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	77
그림 51. 발왕산(I) 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	77
그림 52. 발왕산(I) 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	78
그림 53. 발왕산(I) 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	79
그림 54. 발왕산(II) 내 유인제별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	80
그림 55. 발왕산(II) 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	80
그림 56. 발왕산(II) 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	81
그림 57. 발왕산(II) 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	82
그림 58. 발왕산(II) 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	83
그림 59. 발왕산(II) 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교	83
그림 60. 장산 내 유인제별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	84
그림 61. 장산 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교	85
그림 62. 장산 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	86
그림 63. 장산 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교	86
그림 64. 나무점류 분석을 위한 원자료(raw data) 화면	91
그림 65. 하늘소류 분석을 위한 원자료(raw data) 화면	92
그림 66. 노린재류 분석을 위한 원자료(raw data) 화면	93
그림 67. 멸종위기 고산지역 침엽수종 종자 수집 모습	96
그림 68. 종자도입을 위한 절차	98
그림 69. 천립중 측정을 위한 전자저울 사진	99
그림 70. 종자 외부형태 이미지 촬영모습	99
그림 70. 분비나무 홍고직경-수령 회귀식	121
그림 71. 일월산 분비나무와 신갈나무 성장량 비교	124
그림 72. 가리왕산 분비나무와 사스래나무 성장량 비교	125
그림 73. 장산 분비나무와 사스래나무 성장량 비교	126
그림 74. 화악산 분비나무와 사스래나무 성장량 비교	127
그림 75. 발왕산 분비나무와 신갈나무 성장량 비교	128

그림 76. 청옥산 분비나무와 신갈나무 성장량 비교	129
그림 77. 대암산 분비나무와 신갈나무 성장량 비교	130
그림 78. 향로봉 분비나무와 신갈나무 성장량 비교	131
그림 79. 산지별 분비나무 연년생장량 차이	132
그림 80. 라이다 데이터 취득 원리	135
그림 81. 조사대상지 촬영 준비 과정 모습	136
그림 82. Matric 300 RTK 기체 및 상대고도 기반 자동비행 경로 예시(UgCS)	137
그림 83. 발왕산 조사대상지(기존, 추가)에 대한 상대고도 기반 자동비행경로 (UgCS)	139
그림 84. 가리왕산 조사대상지에 대한 상대고도 기반 자동비행경로 (UgCS)	140
그림 85. 대상지 외부 데이터 제거	141
그림 86. Ground Pint 분류 결과 예시	142
그림 87. Normalization 결과 예시	143
그림 88. Segmentation 결과 예시	144
그림 89. 개체목 수고 측정 예시	145
그림 90. 개체목 DBH 측정 예시	146
그림 91. 개체목의 수관폭 (가로, 세로) 측정 예시	147
그림 92. 가리왕산 분비나무 항공라이다 스캔 결과	148
그림 93. 가리왕산 분비나무 임내 라이다 구축 현황	148
그림 94. 발왕산 분비나무 기존 및 추가 대상지 항공라이다 스캔 결과	149
그림 95. 발왕산 분비나무 임내 라이다 구축 현황	149
그림 96. 가리왕산 분비나무림 점군 데이터 원본 및 ground point 분류 결과	151
그림 97. 가리왕산 분비나무 Normalization 및 segmentation 결과	151
그림 98. 가리왕산 분비나무 개체목1 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	152
그림 99. 가리왕산 분비나무 개체목1 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	153
그림 100. 가리왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2022년)	154
그림 101. 가리왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2023년)	155
그림 102. 가리왕산 분비나무 개체목2 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	156
그림 103. 가리왕산 분비나무 개체목2 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	157

그림 104. 가리왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2022년)	158
그림 105. 가리왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2023년)	159
그림 106. 가리왕산 분비나무 개체목3 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	160
그림 107. 가리왕산 분비나무 개체목3 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	161
그림 108. 가리왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2022년)	162
그림 109. 가리왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2023년)	163
그림 110. 가리왕산 분비나무 개체목4 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	164
그림 111. 가리왕산 분비나무 개체목4 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	165
그림 112. 가리왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2022년)	166
그림 113. 가리왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2023년)	167
그림 114. 가리왕산 분비나무 개체목5 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	168
그림 115. 가리왕산 분비나무 개체목5 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	169
그림 116. 가리왕산 분비나무 개체목 5 수관폭(2022년)	170
그림 117. 가리왕산 분비나무 개체목5 수관폭 (2023년)	171
그림 118. 발왕산 분비나무 점군 데이터 원본 및 ground point 분류 결과	173
그림 119. 발왕산 분비나무 Normalization 및 segmentation 결과	173
그림 120. 발왕산 분비나무 개체목1 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	174
그림 121. 발왕산 분비나무 개체목1 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	175
그림 122. 발왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2022년)	176
그림 123. 발왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2023년)	177
그림 124. 발왕산 분비나무 개체목2 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	178
그림 125. 발왕산 분비나무 개체목2 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	179
그림 126. 발왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2022년)	180
그림 127. 발왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2023년)	181
그림 128. 발왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2023년)	182
그림 129. 발왕산 분비나무 개체목3 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	183
그림 130. 발왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2022년)	184
그림 131. 발왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2023년)	185

그림 132. 발왕산 분비나무 개체목4 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	186
그림 133. 발왕산 분비나무 개체목4 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	187
그림 134. 발왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2022년)	188
그림 135. 발왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2023년)	189
그림 136. 발왕산 분비나무 개체목5 수고 비교 (2022년 vs 2023년)	190
그림 137. 발왕산 분비나무 개체목5 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)	191
그림 138. 발왕산 분비나무 개체목5 수관폭 (2022년)	192
그림 139. 발왕산 분비나무 개체목5 수관폭 (2023년)	193
그림 140. 보전 기금 로짓모형 결과	209

1. 머리말

최근 기후변화에 의해 기온이 상승함에 따라 난대 및 아열대 수종이 남부지방으로부터 침입하여 우리나라 고유의 온대림은 점차 그 면적이 줄어들어 가는 것으로 예측되고 있다.

IUCN에 의하면 기후변화로 인한 전세계 침엽수종의 35%가 멸종위기에 처해 있다고 발표하였으며, 이는 침엽수가 육상식물 중 지구온난화 등 환경변화에 민감함을 시사하고 있다. 국내에서도 산림생물자원의 중요성을 인식하고 현지 내·외 보전을 병행한 다양한 산림생태계 보전 대책을 수립하고 이를 수행하고 있으며, 침엽수의 집단적인 쇠퇴가 보고되면서 이를 국내의 멸종위기 고산지역 침엽수종에 대한 전반적인 현황과 동태파악에 대한 기초정보를 구축하여 국내 멸종위기 침엽수종 자생지의 우선 보전 집단 선정 등과 같은 보전을 위한 데이터베이스 구축이 필요하다.

분비나무는 고산·아고산대에 자생하는 소나무과의 한 대성 수종으로 지구온난화로 인해 쇠퇴위기를 맞고 있으며, 구상나무와 함께 세계자연보전연맹(IUCN)에 등재돼 있을 뿐 아니라, 기후변화생물지표로 지정되어 있어 보전이 중요하게 여겨지고 있다.

한편, 기후변화의 심화가 지속되는 가운데 아고산 침엽수종의 쇠퇴원인이 다양화되어 이에 대한 정밀조사가 요구되고 있으며, 식생구조의 변화는 곧 생태계 구성요소의 이입·이출을 야기하면서, 또 다른 쇠퇴 위협요인에 대한 대비가 필요하다.

이를 위하여 멸종위기 아고산지역 침엽수림을 둘러싼 다양한 생태계 요인 간 생태계 네트워크를 확인해야한다. 또한 무인항공기술 및 고정밀 식생센서의 발달 등 산림측정기술이 고도화되면서 멸종위기 고산지역 침엽수종을 대상으로 다각적이고 정밀한 생태계 구조 분석 및 가치에 대한 평가를 통해 멸종위기 침엽수 분비나무에 대한 쇠퇴특성과 생태계 상호관계에 등을 파악하여 보전대책을 마련하고자 하였다.

2. 분비나무의 유전학적 특성

가. 서론

분비나무(*Abies nephrolepis* Maxim.)는 소나무과 전나무속(Genus *Abies*)에 속하는 식물로 우리나라에 백두대간을 따라 자생한다. 소나무과(Pinaceae) 식물은 구과식물 중 경제적으로 매우 중요하다. 주로 교목이며 대부분 암수 한그루이고 북반구 온대에 분포하는 상록성 침엽수이다. 전나무속(*Abies*)은 소나무과(Pinaceae)에서 두 번째로 큰 속으로, 50종이 아메리카, 아시아, 북아프리카 및 유럽 등지에 서식하고 있으며, 우리나라에는 구상나무, 전나무, 분비나무 3종이 자생하고 있다. 해발고도가 높은 지역에 분포하고 있어 기후변화의 영향에 취약한 수종으로 평가되기도 한다. 분비나무는 중국 동북부, 러시아의 극동남부 및 한국에 분포하는 것으로 알려져 있다. Liu는 분비나무를 Setion Elate으로 분류하였으며, Farjon과 Rushforth의 분류에서는 Setion Balsamea에 포함하였다. 분비나무는 전세계적으로 북쪽의 고산 지역과 남쪽의 아고산대에서 주로 분포하고 있는 것으로 알려져 있다. 국내에서는 설악산국립공원에 가장 넓게 분포하며, 오대산, 태백산, 치악산국립공원 등에도 분포하고 있다. 최근 기후변화 등으로 인하여 전 세계적으로 상록침엽수 고사가 보고되고 있는 가운데(Rebetez et al., 2004; Allen et al., 2010), 국내에서는 분비나무와 같은 아고산대 상록침엽수림이 쇠퇴 경향을 보이고 있어(Park et al., 2020; Kim et al., 2020) 보전 및 복원에 대한 필요성이 제기되고 있다. 분비나무는 높이 20-25m에 상록 침엽수로, 줄기의 지름은 최대 0.75-1m까지 자란다. 수피는 수지샘이 발달하고, 회갈색의 껍질은 평활하고 있는 바늘 모양으로 납작하며 길이는 1.5-3cm, 폭은 1.5-1.8mm로, 윗면은 광택이 나는 짙은 녹색이며 아래쪽에는 두 개의 흰색 기공대(줄)가 있다. 어린 잎은 약간 뽕족한 모양으로 솔방울은 길이가 4-5.5cm, 폭이 2-2.5cm이며 연두갈색이다. 단한 솔방울 사이에 나타나는 비늘 가지는 단한 상태에서는 길이가 6mm이고, 솔방울이 성숙해짐에 따라 뒤로 젖혀지며, 구상나무와 구별된다. 날개 달린 씨앗은 수분이 생산 후 약 4-5개월 후에 성숙시킬 때 솔방울이 해체되면서 날린다.

분비나무의 유전학적 연구로는 주로 RAPD, SSR 등에 의한 유전다양성 연구와 (Jung et al., 2000; Kim and Hyun, 2000; Lee et al., 2008; Hong et al., 2011) 엽록체 DNA의 trn-L/trn-V and trn-F/trn-T 유전자를 이용한 연

구(Kormutak et al., 2007)가 일부 수행되었으나 뚜렷한 지리적 유연관계는 파악되지 않는 것으로 확인되었다.

고지대를 중심으로 국소적인 분포역을 보이는 대표적인 아고산대 상록침엽수종으로 최근 기후변화 등으로 인하여 전세계적으로 상록침엽수 고사가 보고되고 있는 가운데(Rebetez et al., 2004; Allen et al., 2010), 국내에서는 분비나무와 같은 아고산대 상록침엽수림이 쇠퇴 경향을 보이고 있어(Park et al., 2020; Kim et al., 2020) 보전 및 복원에 대한 필요성이 제기되고 있다. 환경변화에 대한 적응성을 높이고 유전자원의 지속적인 보전을 위해 자생지 고유의 유전특성을 고려할 필요가 있다(Mckay, 2005). 특히 유전적으로 이질적인 외부 유전자원을 이용하기 보다는 자생지 고유의 유전특성과 다양한 유전자형을 가지는 유전자원을 활용하는 것이 중요하다(Bischoff et al., 2010). 이에 국내에 분포하는 분비나무의 유전학적 다양성을 분석하여 보전 복원 전략 수립에 기초자료로 활용하고자 한다.

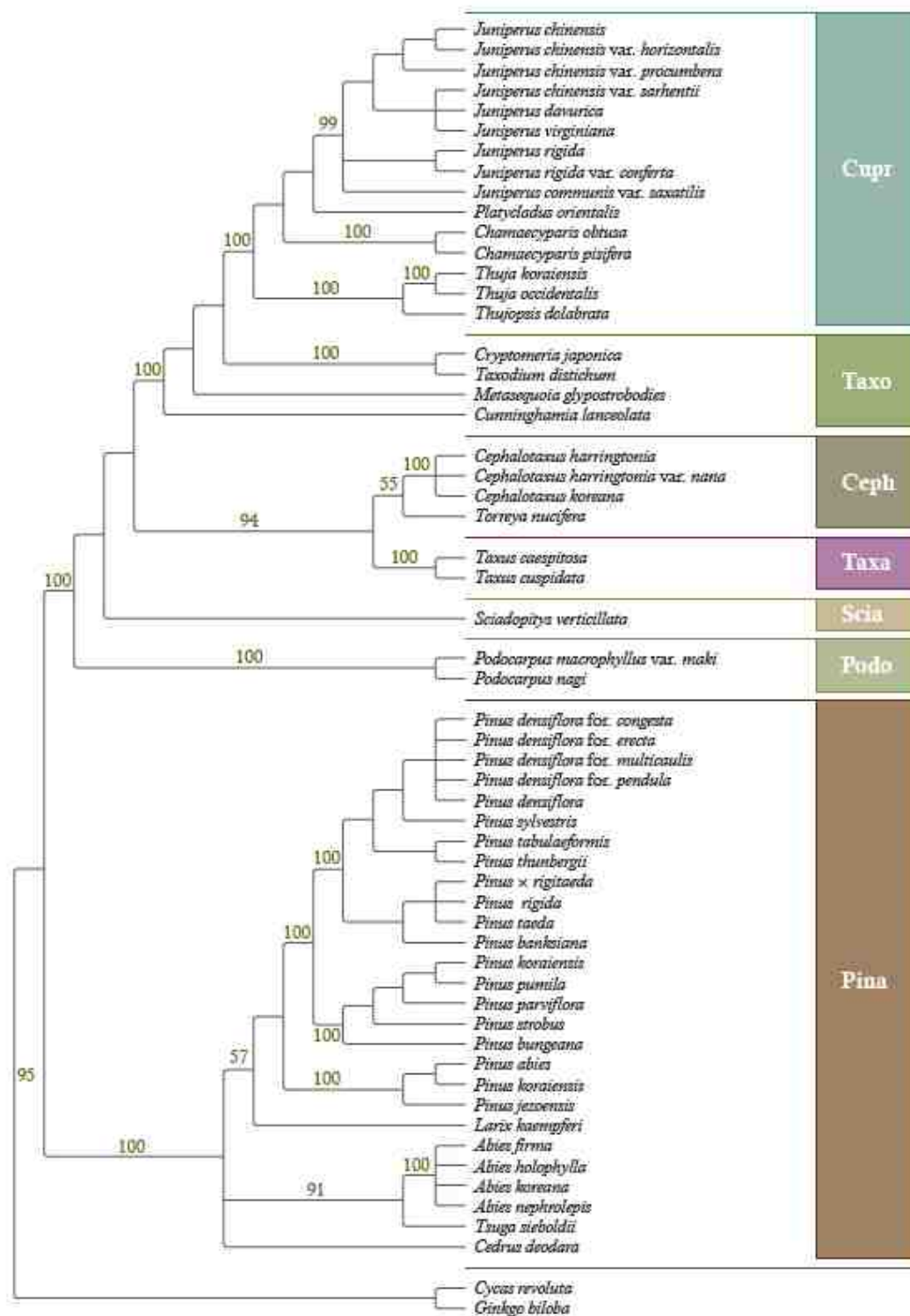


그림 1. 우리나라 구과식물의 계통수(국립수목원, 2012)

엽록체 유전자 rbc L과 mat K의 조합 분석 완전일치계통수 (Strict consensus tree, BP값은 각각의 node 위에 표시하였음). Cupr : 측백나무과(Cupressaceae), Taxo : 낙우송과(Taxodiaceae), Ceph : 개비자나무과(Cephalotaxaceae), Taxa : 주목과 (Taxaceae), Scia : 금송과(Sciadopityaceae), Podo : 나한송과(Podocarpaceae), Pina : 소나무과(Pinaceae). CI : 0.662, RI : 0.927.

나. 재료 및 방법

(1) Plant materials

백두대간을 따라 자생하는 분비나무 16지역 273개체를 실험에 사용하였다. 분비나무는 구상나무와 형태학적으로 매우 유사하여 구별이 어렵지만, 본 연구에서는 결실기에 형질을 정확하게 구별하여 분비나무만을 실험재료로 활용하였다. 본 연구에서 사용한 식물재료의 수집정보는 표 1, 그림 2에 정리하였다.

표 1. 분비나무 수집정보

No.	Code	Population	N(개체)	Sampling Sites GPS
1	AB01	설악산	17	38°07'08"N 128°27'53"E
2	AB02	점봉산	20	38°02'55"N 128°25'30"E
3	AB03	방태산	23	37°53'39"N 128°21'27"E
4	AB04	개인산	15	37°51'38"N 128°24'03"E
5	AB05	오대산	17	37°47'52"N 128°32'30"E
6	AB06	발왕산	16	37°36'23"N 128°40'20"E
7	AB07	노추산	7	37°32'50"N 128°44'53"E
8	AB08	가리왕산	12	37°27'41"N 128°33'45"E
9	AB09	청옥산	24	37°24'34"N 128°30'31"E
10	AB10	백덕산	15	37°23'47"N 128°17'39"E
11	AB11	두타산	20	37°46'47"N 128°34'00"E
12	AB12	매봉산	12	37°47'11"N 128°14'07"E
13	AB13	함백산	12	36°48'04"N 129°05'55"E
14	AB14	태백산	21	37°05'43"N 128°54'58"E
15	AB15	소백산	18	36°57'05"N 128°26'46"E
16	AB16	일월산	24	36°48'04"N 129°05'58"E
Total			273	

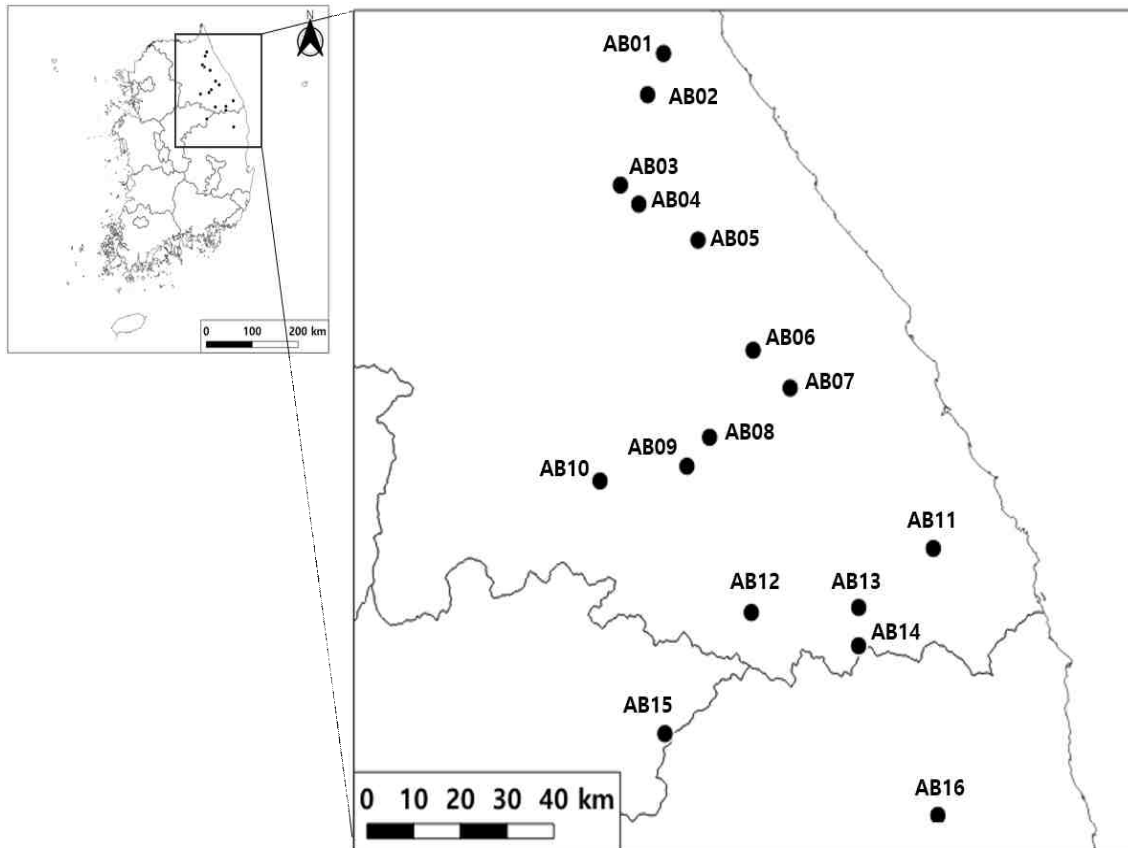


그림 2. 분비나무 채집 지역

(2) DNA isolation, polymerase chain reaction (PCR), and sequencing
건조되거나 급속 냉동된 식물체의 잎조직 약 100mg을 액체질소에 넣어 분쇄하였다. 다당류(polysaccharides)의 제거를 위해 갈아진 잎조직을 2-[4-(2-Hydroxyethyl)-1-piperanziny] ethanessulfonic acid (HEPES) Buffer (pH 8.0)로 1차 처리하였다. 1차 처리된 잎조직을 Cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) 방법(Doyle & Doyle, 1990)에 따라 전체 genomic DNA를 추출하였다. 추출된 DNA는 전기영동을 통해 확인한 후 nanoDrop Spectro-photometer (Nano-300)을 이용하여 농도를 측정하고 15ng/μl로 희석하여 분석에 사용하였다. 분리된 DNA를 100 μl의 [10 mmol/l Tris HCl (pH8.0)와 1 mmol/EDTA (pH8.0)] (TE) buffer에 녹여 사용하였다. PCR 반응은 10-20 ng genomic DNA, 0.15μl, 0.25mM Mgcl₂, 0.2 mM dNTP mixture, 2.0 nM 10X Ex Taq buffer (Takara Ex Taq; Takara, Kyoto, Japan), 0.625 U Ex Taq (Takara), 0.2 μM의 양방향 primer를 넣어 전체 15 μl의 반응액을 조성하였다. 유전자 증폭을 위한 PCR과정은 95℃에서 5분 동안 pre-denaturation을 시킨 후, 95℃에서 30초의 denaturation, 58℃에서 30

초의 annealing, 72℃에서 1분의 extension으로 이루어지는 thermal cycle 과정을 35회 반복하였으며, 마지막으로 72℃에서 7분간 final extension과정을 진행하였다. 미토콘드리아 DNA의 nad5 intron 지역의 증폭에는 Wang et al. (2000)과 Liepelt et al. (2002)에 기존 연구에서 제시되었던 nad5 intron 1지역과 nad5 intron 4지역의 프라이머를 사용하였다. 증폭반응 후, 증폭 여부 및 증폭산물의 농도는 1% agarose gel 상에서 전기영동으로 확인 후 정제키트(Gel & PCR Purification System, Solgent, Korea)를 이용하였다. 염기서열의 분석은 ABI PRISM 3730XL Analyzer (Applied Biosystems, USA)를 이용하였다. 이를 통해 nad5 intron1 유전자의 경우 총 266개, nad5 intron 4 유전자의 경우 총 304개의 염기서열을 확인하였다. Sequencing된 각 유전자의 염기서열은 MUSCLE (Edgar, 2004)을 이용하여 정렬하였으며 서열을 확인 후 수작업으로 재정렬하였다. 이후 Geneious 8.0 (<http://www.geneious.com>, Kearse et al., 2012)를 이용하여 재정렬된 서열을 검토하였다.

표 2. 분석에 사용된 유전자 지역 및 프라이머

No.	Region	Primer		Sequence	Reference
1	nad5 intron 1	F	nad5-aF	GGAAATGTTTGATGCTTCTTGGG	Wang et al. (2000)
		R	nad5-bR	CTGATCCAAAATCACCTACTCG	
2	nad5 intron 4	F	nad5-4F	CATCCCTCCCATTCATTAT	Liepelt et al. (2002)
		R	nad5-4R	GGACAATGACGATCCGAGATA	

(3) 데이터 분석

본 연구 결과의 반수체형 네트워크(haplotype network)분석을 위하여 TCS ver. 1.21 (Clement et al., 2000)을 사용하였으며, 개체군 내 유전다양성(H; Nei, 1987)은 ARLEQUIN ver. 3.5.2.1 (Excoffier et al., 2005)을 사용하여 분석하였다. 개체군 내 유전다양성 평균지수(HS)와 총 유전다양성지수(HT) 그리고 개체군 간 분화지수(GST와 NST)는 PERMUT ver. 1.2.1을 사용하여 분석하였다(used 1,000 permutations). GST 값은 대립형질(allele)의 빈도를 기반으로 하며, NST 값은 haplotype의 빈도와 haplotype들 사이의 유사성에 의해 계산된다. 만약 NST값이 GST값 보다 높으면 유연관계가 높은

haplotype들이 특정 개체군 내에서 함께 발생되었을 가능성이 높은 것을 의미하며, 분석된 개체군들은 유의한 계통지리학적 구조(phylogeographical structure)를 가지는 것으로 판단할 수 있다(Pons and Petit, 1996). 계층적으로 개체군의 유전적 변이를 확인하기 위한 AMOVA (Analysis of molecular variance) 분석은 ARLEQUIN에 의해 수행되었다.

표 3. 각 집단별 확인된 유전자형

No.	Code	Population	N	Type			H
				T1	T2	T3	
1	AB01	설악산	17	17	0	0	0
2	AB02	점봉산	20	20	0	0	0
3	AB03	방태산	23	17	6	0	0.343
4	AB04	개인산	15	15	0	0	0
5	AB05	오대산	17	17	0	0	0
6	AB06	발왕산	16	16	0	0	0
7	AB07	노추산	7	7	0	0	0
8	AB08	가리왕산	12	9	3	0	0.498
9	AB09	청옥산	24	22	2	0	0.274
10	AB10	백덕산	15	15	0	0	0
11	AB11	두타산	20	14	6	0	0.466
12	AB12	매봉산	12	12	0	0	0
13	AB13	함백산	12	10	2	0	0.303
14	AB14	태백산	21	18	3	0	0.349
15	AB15	소백산	18	7	11	0	0.367
16	AB16	일월산	24	0	7	17	0.372
Total			273				

다. 결과 및 고찰

분비나무의 유전적 변이를 확인하기 위해 nad5 intron 1 지역과 nad5 intron 4 영역의 염기서열분석 결과 각각 294-298bp, 1,237bp로 정렬되었다. 전체 20개 집단의 350개체에서 3개의 type이 결정되었다(표4). 전체 정렬된 미토콘드리아 nad5 intron1 지역과 nad5 intron4 영역에서 6bp의 염기치환과 1region의 indel(187-190bp)이 확인되었다. nad5 intron4 에서는 187-190bp에서 4염기 indel 지역 (insertion/deletion)이 확인되었으며, 그 외 5개의 단일 염기서열에서 치환현상이 관찰되어 총 6개의 변이 지역이 확인되었다. nad5 intron 1 에서는 단일염기서열(540bp)의 치환현상으로 인해 1개의 변이 지역이 확인되었다. 확인된 변이 지역에 의해 3개의 mtDNA haplotype (mitotypes)이 선정되었다.

표 4. 유전자형의 염기서열

Type	nad5 intron 4									nad5 intron 1
	34bp	183bp	187-190bp				216bp	218bp	234bp	540bp
Type1	G	C	A	T	A	T	G	T	T	C
Type2	G	A	-	-	-	-	G	T	T	A
Type3	T	C	-	-	-	-	T	G	G	C

분비나무 집단에서는 대부분은 Type1을 가지고 있었으며 일부 집단(방태산, 가리왕산, 청옥산, 두타산, 함백산, 태백산, 소백산)에서는 Type2의 개체가 일부 확인되었다. 분비나무의 가장 남부 집단인 일월산 집단에서는 Type1은 확인되지 않았으며 Type2와 Type3만이 확인되었다. Type1과 Type2는 4염기의 indel과 2개의 염기치환의 차이가 있다. 일월산에서만 확인된 Type3은 다른 지역에서는 확인되지 않았으며, 분비나무의 분포지역 중 가장 남쪽의 지역에서 확인되었다. 이들 타입의 유연 관계분석에서는 Type1 으로부터 Type2와 Type3가 각각 분지되어 나타났다. Type2와 Type3은 Type1과 4개의 염기 indel을 가지고 있다. Type2와 Type3은 indel을 제외한 6개의 유전자 변이 지역이 확인되었다. 미토콘드리아 DNA를 분석한 우리나라 분비나무의 유전다양성 분석 결과 개체군 내 평균 유전다양성(HS)은 0.098, 전체 유전다양성(HT)은 0.776으로 분석되었다. 개체군 간 분화값은

GST = 0.857, NST = 0.949로 확인되었으며, NST 값이 GST값에 비해 높게 관측되어 유의적 계통지리학적 구조를 가지는 것으로 나타났다. 개체군별로는 가리왕산(H=0.498), 두타산(H=0.466), 일월산(H=0.372), 소백산(H=0.367), 태백산(H=0.349), 방태산(H=0.343)순으로 확인되었다.

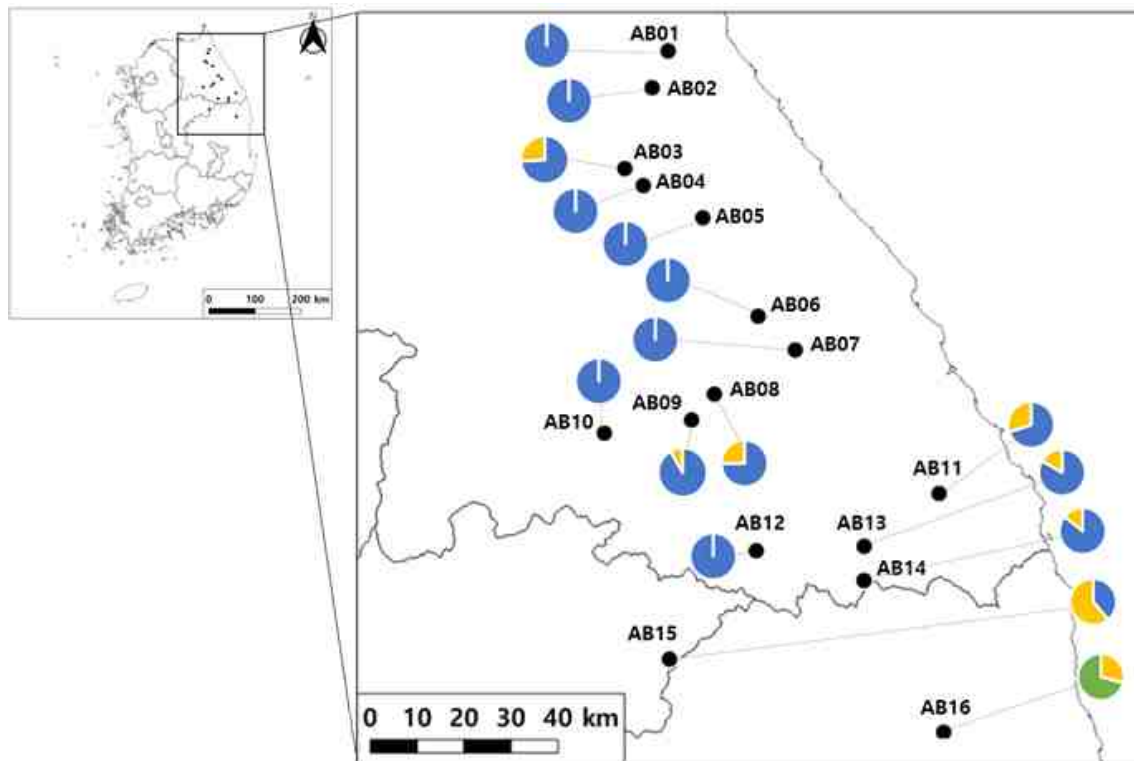


그림 3. 분비나무 유전자형 지리적 분포패턴

본 연구에서는 우리나라 북부지역 백두대간을 따라 분포하는 분비나무의 미토콘드리아 DNA를 통해 집단별 유전다양성과 분화에 대해 분석하였다. 이전 Lee et al(2015)의 연구에서 활용한 유전자 지역을 이용하여 분석하였으며, 이전 결과와 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 멕시코에 분포하는 *Abies* 식물들의 연구를 수행한 Jaramillo-Correa et al. (2008)의 연구결과에서는 mtDNA GST = 0.933, cpDNA GST = 0.402로 보고하였으며, 동북아시아 지역에 분포하는 *Pinus koreaiensis*의 유전분화값은 mtDNA GST = 0.897, cpDNA GST = 0.327로 보고하였다. 또한 Lee et al(2015)는 한반도 전역에 분포하고 있는 구상나무와 분비나무의 유전연구에서 유전분화값이 GST = 0.841로 확인하였다. 이는 이번 연구에서 확인된 GST = 0.857과 유사한 값

을 갖는 것으로 나타났다. 분비나무는 주로 북부지역에서 분포하는 종으로 고산지역의 일부 자생지에서만 확인되는 멸종위기 침엽수이다. 본 조사에서 연구한 16개 집단의 개체군내의 유전다양성은 비교적 낮은 것으로 확인되었으며, 그중 8개 집단의 개체들에서는 유전적 다양성이 확인되지 않았다. 2개 이상의 type을 가지고 있는 집단은 8개 집단으로 확인되었으며, 3개 이상의 type을 가지는 집단은 확인되지 않았다. 일월산 집단의 개체에서 확인된 type3은 Lee et al(2015)의 연구에서 우리나라 남쪽지역의 구상나무 집단에서 확인된 유전자형으로 확인되었다. 분비나무는 구상나무와 형태학적으로 매우 유사하고 결실기 구과의 형태로 구별된다. 또한 소백산인근 일부 지역에서는 두 종이 함께 자생하기도 한다. 일월산 집단은 우리나라 남쪽지역에 자생하는 구상나무 집단의 유전자형과 면밀한 비교 분석이 필요할 것으로 생각된다. 현존하는 한반도 *Abies*속은 모두 3종(*A. koreana*, *A. nephrolepis*, *A. holophylla*)으로 주로 해발 1,000 m 이상의 고산지대에 주로 분포하고 있다. 한랭성의 *Abies*속 식물들은 여러 번의 빙하기를 거치면서 남부지역으로 분포의 확장과 축소를 반복하였으며, 그 결과 빙하기 때 내려온 개체들이 빙하기 이후 온도가 상승함에 따라 고산지역에 남아있게 된 것으로 알려지고 있다(Hong et al.,2011). Lee et al(2015)는 연구에서도 신생대 4기 일본지역으로 유입된 분비나무 혹은 분비나무 조상종은 지리적 격리로 인해 유전적 분화와 최대 빙하기 때 해수면이 하강으로 한반도로 유입되어 중부지역까지 분포가 확장되었을 것으로 추측하였다. 한반도에 분포하고 있는 분비나무가 현재의 분포영역을 어떻게 가지게 되었는지 정확하게 판단할 수는 없지만, 현재 우리나라에 자생하고 있는 분비나무는 최소한 2개 이상의 유입 경로를 통해 한반도에 유입되고 자생지가 확장되면서 지금의 분포역을 가지게 된 것으로 추측된다. *Abies*는 아시아지역에 넓게 분포하고 있으며 우리나라를 중심으로 북으로는 러시아, 북미 대륙까지 연결되어 다양한 수종들이 자생하고 있다. 이들의 유전연구와 생태연구는 우리나라 멸종위기 고산침엽수 *Abies* 종들의 진화를 이해하기 위해 추가적인 종합 연구는 필요하다. 본 연구는 우리나라 전역에 분포하는 *Abies*의 유전다양성과 지리적 분석으로 멸종위기 침엽수의 보전전략 수립에 기여할 것으로 판단된다.

3. 분비나무숲의 군집구조

가. 서론

지구 표면 온도는 2011-2020년이 1850-1900년보다 1.09[0.95 - 1.20]℃ 더 높아졌으며, 육상(1.59[1.34]-1.83]℃)은 해양(0.88[0.68]-1.01]℃)보다 상승하였다(IPCC, 2021). 지구온난화는 중 서식지 경계의 변화를 초래하고, 생태계의 구조와 기능을 변화시키는 등 생물다양성에 결정적인 영향을 미치게 된다(Villén-Peréz et al., 2020). 특히, 극지 및 아고산 수종들은 분포 범위의 상승 및 이동이 제한되며 적합한 서식지 영역이 축소됨에 따라 지구온난화에 취약할 것으로 평가된다(Walther et al., 2005; Galbreath et al., 2009).

국립산림과학원은 우리나라 아고산대에 주로 서식하고 있는 침엽수종 중 구상나무(*Abies koreana* E.H. Wilson), 분비나무(*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim), 가문비나무(*Picea jezoensis* (Siebold and Zucc.) Carrière)의 생육 현황을 평가하기 위한 쇠퇴정도를 산출하였다. 쇠퇴정도는 조사지역 내 고사목 수, 수관활력도, 수간건강도를 기준으로 산출하였으며 0에서 1까지 범위로 0은 건강하다는 나타내고, 1에 가까워질수록 쇠퇴를 의미한다. 이에 따라 구상나무의 쇠퇴 정도는 0.33, 분비나무 0.28, 가문비나무 0.25 정도의 쇠퇴단계로 평가되어 보전 및 관리대책이 필요한 상황이다(Korea Forest Research Institute, 2021). 그중 분비나무는 백두대간의 높은 산들에 분포하며 우리나라가 분포 남방한계선에 해당하여 기후변화 연구에 적합한 종이다. 또한 중국에도 넓게 분포하여 비교연구가 가능하며 분비나무 연구를 통해 구상나무 쇠퇴 현상을 깊게 이해할 수 있는 등 분비나무 연구는 중요한 것으로 여겨진다(Kormuťák et al., 2008; Lee et al., 2021).

앞서 분비나무를 소재로 한 군집구조 연구는 지속적으로 수행되었으나 대부분 일부 산지에 국한되어, 통합적인 현장조사를 통해 향후 군집구조에 따른 개체군 관리에 효과적인 자료 구축이 요구되는 상황이다. 산림생태계 형성, 발전 및 구조를 형성하는 메커니즘을 연구하는 것은 종 분포와 식물 군집구조의 지리적 이질성을 이해하는데 도움이 된다(Dar and Parthasarathy, 2023).

본 연구는 2021-2022년 현장조사를 통해 확보한 자료를 활용하여 이원지표
 종분석법(TWINSPAN, Two-Way Indicator Species ANalysis)을 통해 군집
 구조에 따른 입지환경을 분류하고 분류된 군집의 현재 상태를 구명하기 위
 한 자료를 제시하여 비교하였다.

나. 조사 및 방법

(1) 조사대상지

본 연구의 조사지는 한반도 남한지역 분비나무 분포지를 대상으로 현장조
 사를 수행하였고 행정구역상 위치는 강원도, 경기도, 경상북도, 충청북도에
 속한다. 현재까지 알려진 분비나무 자생지 중 25개 산지를 대상으로 현장조
 사를 실시하였다.

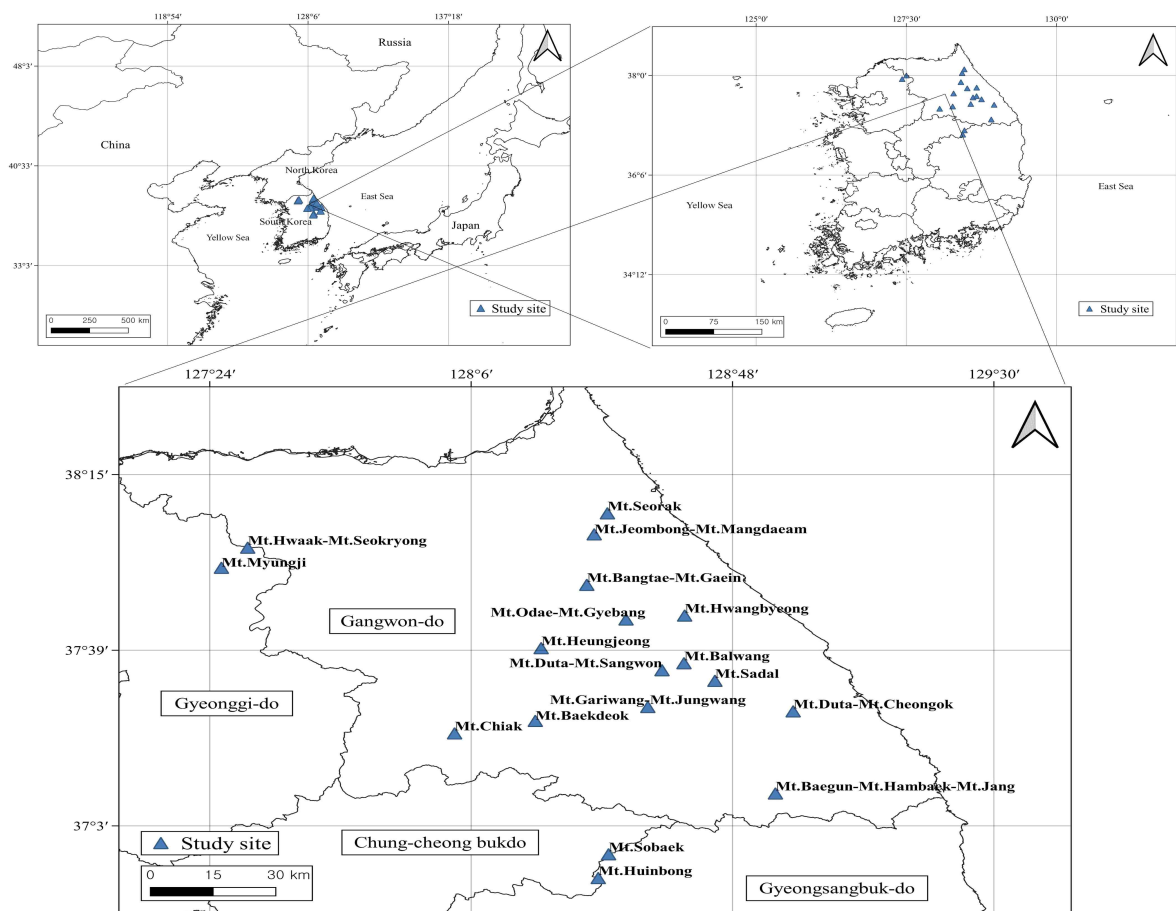


그림 4. 조사대상지 현황

(2) 조사방법

현장조사는 2021-2022년까지 진행하였으며, 조사구는 반지름 11.3의 원형방형구를 설치하였다(조사구 당 면적 400m², 그림2). 조사구 선정은 해발고도 1,000m 이상의 아고산 지역의 임분을 대상으로 봄, 가을철에 촬영한 정사항공사진을 사용하였다. 일차적으로 침엽수림의 위치를 파악하였고, 이차적으로 항공사진 입체판독을 통해 2단계 상세한 수종분류를 수행하였다(그림4). 그 후 파악한 침엽수림 전체 임분 구획 내에서 수관밀도를 판독하여 극소, 소, 중, 밀 등의 등급을 매겼다(표 5). 또한 침엽수림의 정밀한 수종구분을 위해 항공사진 입체 판독을 통해 수종별 수형정보를 취득하고, 그에 따라 아고산 침엽수림 임분을 수종별로 구분하였다. 수관 밀도 및 수종별 수형 차이를 통해 구분한 침엽수림 중 분비나무림 생육지를 구분하였고, 그 후 현장조사를 통하여 항공사진 판독 정보와 실제 조사지 정보를 비교하여 표준지를 확정하였다.

매목조사는 조사구 내 흉고직경 6cm 이상의 모든 개체목에 대하여 종명, 수고, 흉고직경, 건강상태를 측정하였고 각각의 개체목에 알루미늄 태그를 부착하고 번호를 부여하여 조사하였다. 식생은 Z-M 학파의 식물사회학적 방법에 따라 조사구 내 출현하는 종의 피도를 측정하고 교목-아교목-관목-초본의 층위별로 구분하여 야장에 기록하였다.

현장조사지의 GPS정보는 Garmin사의 Handheld GPS 64S를 사용하였으며, 조사지의 경사도 측정은 Suunto Clinometer를 사용하였다. 수고 측정 및 방형구 중심과 임목 간의 거리는 Haglof Vertex Hypsometer를 사용했으며, 임목의 직경은 Diameter tape를 사용하여 측정하였다. 종동정은 원색식물도감(이창복, 2003)을 기준으로 하였으며 명명은 국가표준식물목록(KNA, 2022)을 따랐다.

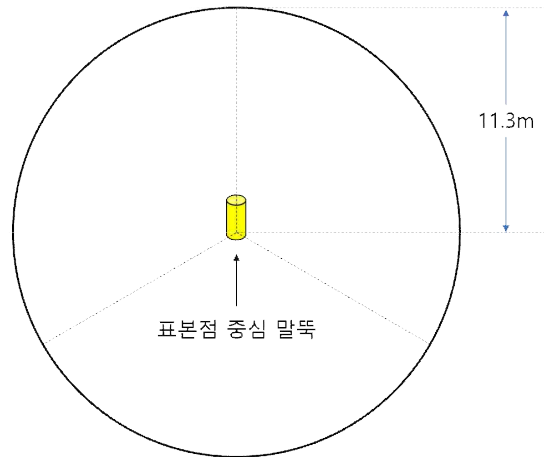


그림 5. 원형 조사구 구획 방법

분비 나무		구상 나무	
주목		눈측백	
눈향 나무		가문비 나무	
눈잣 나무			

그림 6. 수종에 따른 수형 특징(Photo by Dong Bin Shin)

표 5. 수관밀도 분류 기준

분류 기준	
극소	침엽수의 수관점유 면적이 5% 이상, 10% 미만인 임분
소	침엽수의 수관점유 면적이 10% 이상, 25% 미만인 임분
중	침엽수의 수관점유 면적이 25% 이상, 50% 미만인 임분
밀	침엽수의 수관점유 면적이 50% 이상인 임분



그림 7. Suunto Clinometer를 사용하여 경사를 측정하는 모습(함백산)



그림 8. 조사구 내 중심의 모습(반경 11.3m 이내의 모든 임목을 측정)



그림 9. 조사구 내에서 매목조사를 하는 모습(함백산)



그림 10. 절척을 사용하여 분비나무 치수 조사를 하고 있는 모습(함백산)

다. 분석방법

(1) 군집유형 분류

본 연구에서는 TWINSpan 기법을 사용하여 군집을 분류하고, 비모수 다차원 척도법(Non-metric Multidimensional Scaling, NMS)을 활용하여 군집간의 유사성을 직관적으로 관찰하고자 하였다. 군집유형을 분류하기 위해 현장조사 대상지 중 분비나무가 상층수관을 점유하고 있는 방형구 204개소 식생자료를 바탕으로 분석을 수행하였다. NMS 분석의 경우 Sørensen의 거리척도를 사용하였고, 옵션은 “slow and thorough” 선택하였으며 분석 프로그램은 PC-ORD ver.7을 사용하였다.

(2) 중요치 분석

분류된 군집구조에 내 서식하는 종의 생태적 지위를 파악하기 위해 Curtis and McIntosh(1951)의 방법을 사용하여 상대빈도(Relative Frequency), 상대피도(Relative Coverage)를 합산 후 평균한 중요치(Importance Value; I.V)를 산출하였다. 또한, 군집 내 층위별 개체 크기를 고려하여 교목층 3, 아교목층 2, 관목층 1, 초본층 0.5의 가중치를 부여한 평균상대우점치(Mean Importance Percentage; M.I.P)를 환산하여 종합하였다(Yim et al., 1980).

(3) 종다양도 지수 분석

Shannon and Wiener(1949)의 종다양성 지수를 통해 종다양도(Species diversity), 균재도(Pielou, 1975)를 분석하였다. 이때 종다양도, 균재도는 상층과 하층을 모두 포함하여 계산하였고 분석은 PC-ORD ver.7을 사용하여 산출하였다.

(4) 흉고직경급 분포와 치수 분석

수종 별 흉고직경급 분포도 분석을 통해 군집구조를 분석하고자 하였다. 흉고직경급 분포 분석을 통해 식생천이의 변화를 추정할 수 있으므로(Harcombe and Marks, 1978 ; Lee et al., 1998 ; Song et al., 2003), 분비나무림 군집의 흉고직경급 분포도를 분석하여 분비나무림 식생천이의 경향성

을 파악하고자 하였다. 구분된 군집유형에 따른 흉고직경급 분포도는 ha당 개체수로 환산하였고 10계 단계(6-9.9cm, 10-14.9cm, 15-19.9cm, 20-24.9cm, 25-29.9cm, 30-34.9cm, 35-39.9cm, 40-44.9cm, 45-49.9cm, $D \geq 50$ cm)로 구분하여 분석하였다.

치수는 환경적인 변화에 민감하게 반응하여(Kim et al., 2019) 치수 밀도와 환경요인 간의 관계를 밝히는 연구는 매우 중요하다. 본 연구에서는 치수 높이에 따라 3개 단계($h \leq 10$, $10 < h \leq 50$, $h > 50$ cm)로 구분하였고 성목으로 이을 가능성이 높은 50cm 이상의 치수 출현에 주목하였다.

(5) 통계분석

TWINSPAN에 의해 분류된 군집 간 환경 및 식생 요인을 비교하기 위해 해발고도, 종다양도, 군재도 변수는 일원배치분산분석(One-Way ANOVA) 후 사후검증(post-hoc)은 Scheffe를 활용하였고, 사면방위, 암석노출도는 빈도분석(Frequency Analysis)을 사용하여 나타내었다. ANOVA 분석 전 사용 변수에 관하여 정규성검정(Shapiro-Wilk test)과 등분산검정(Levene-test)을 수행하였고 해발고도 변수가 정규성 가정을 만족하지 않아 자연로그를 활용하여 분석하였다. 통계분석은 IBM SPSS Statistics 26과 R 소프트웨어(version 4.3.1)프로그램을 사용하였다.

다. 연구결과

(1) TWINSPAN에 의한 분류

TWINSPAN 분석결과 제1수준에서는 신갈나무, 대사초, 철쭉을 식별종(Differential species)으로 하는 집단과 이와 대립되는 부계꽃나무를 식별종으로 하는 집단으로 분류되었다. 제2수준에서 신갈나무 집단은 단풍취, 곰취를 식별종으로 하는 군집 I 과 진달래를 식별종으로 하는 군집 II로 구분되었다. 부계꽃나무 집단은 고로쇠나무, 물참대, 송이풀을 식별종으로 하는 군집 III과 진달래를 식별종으로 하는 군집 IV로 구분되었다(그림 11).

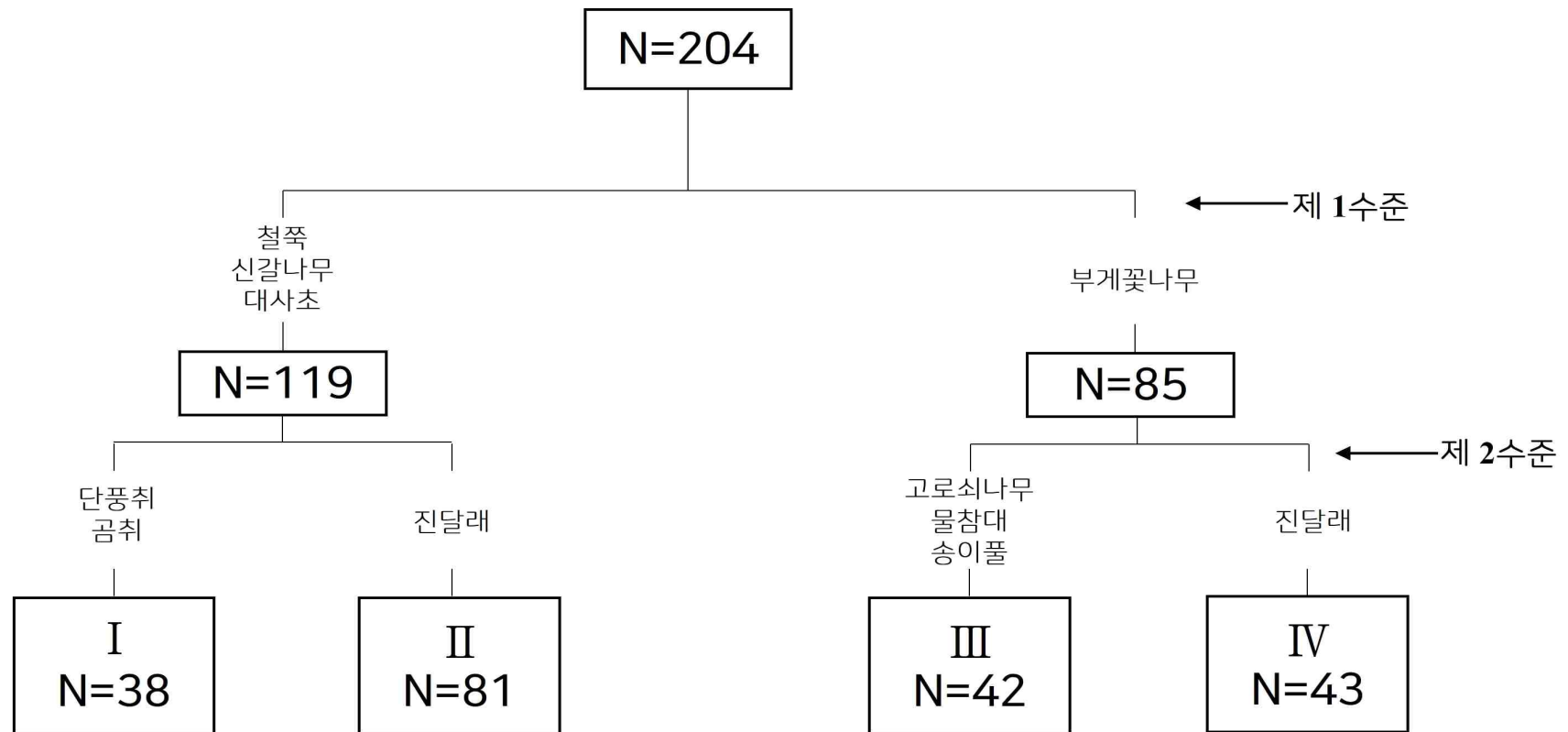


그림 11. 분비나무림 TWINSpan 분석결과

(2) NMS 분석 결과

NMS 분석 결과 1축의 설명력은 33.6%, 2축의 설명력은 15.4%로 총합 49%의 설명력을 보였으며 군집 I 과 군집 II, 군집 III과 군집 IV는 서로 유사한 분포영역을 보유하고 있는 것으로 나타났다(그림 12). 특히, 군집 II의 경우 타 군집보다 종조성의 분포영역이 넓게 나타났는데, 이는 조사구 개수와 가장 많은 산지를 포함하여 나타난 결과로 판단되며 백운산-함백산-장산의 조사구는 주로 군집 II에 포함된 것이 특징적이었다(표 6).

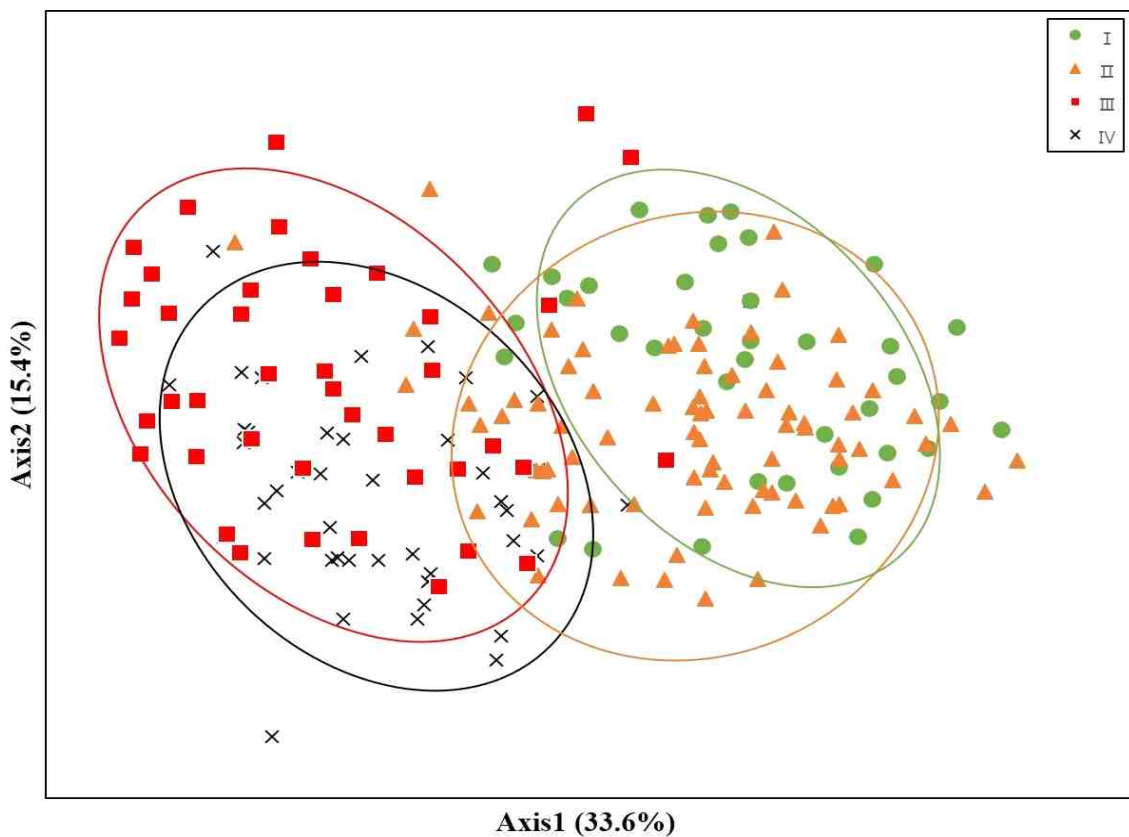


그림 12. NMS ordination 분석 결과

표 6. 군집구조에 따른 조사대상지 현황

	I	II	III	IV
Mt.Baegun-Mt.Hambaek-Mt.Jang	3	30	1	4
Mt.Baekdeok	-	3	-	-
Mt.Balwang	1	5	1	1
Mt.Bangtae-Mt.Gaein	4	-	7	3
Mt.Duta-Mt.Cheongok	1	5	4	4
Mt.Duta-Mt.Sangwon	-	-	2	-
Mt.Gariwang-Mt.Jungwang	-	1	5	4
Mt.Heungjeong	-	2	-	-
Mt.Huinbong	-	-	-	3
Mt.Hwaak-Mt.Seokryong	3	5	3	5
Mt.Hwangbyeong	10	7	-	-
Mt.Jeombong-Mt.Mangdaeam	3	1	1	-
Mt.Myungji	-	-	-	3
Mt.Odae-Mt.Gyebang	8	12	9	11
Mt.Sadal	2	1	3	1
Mt.Seorak	3	6	1	3
Mt.Sobaek	-	3	4	2



그림 13. 상층에 분비나무가 우점하고 있고 모습(군집 IV). 숲틈(Forest gap)이 형성되지 않아 임내 광량이 적어 하층 식생의 발달이 저조한 모습.



그림 14. 분비나무가 고사하여 숲틈이 형성된 모습

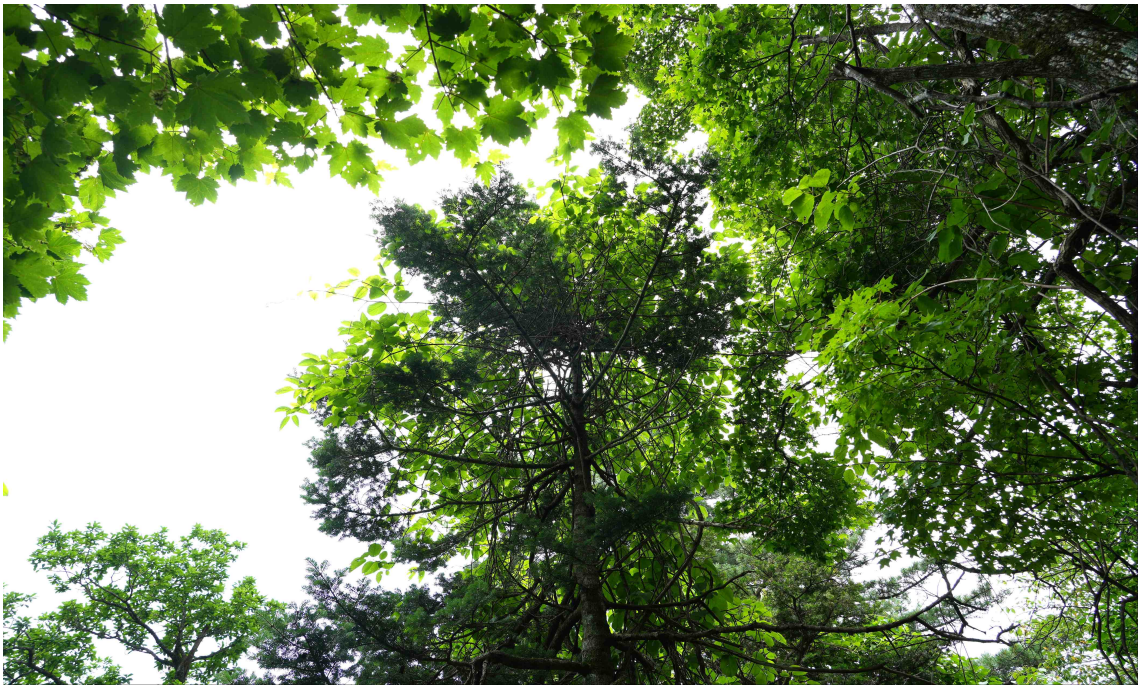


그림 15. 분비나무에 덩굴식물인 미역줄나무가 피압하고 있는 모습(군집 I)



그림 16. 분비나무와 신갈나무가 함께 생육 중인 모습(군집Ⅱ)

(3) 군집 간 식생 및 환경요인 통계분석

각 군집별 식생 및 환경요인의 유의한 차이가 있는지 확인하기 위해 ANOVA 분석을 수행하였고 그 결과는 표 7과 같다. 군집Ⅰ의 경우 가장 높은 종다양도, 군집Ⅱ의 경우 가장 높은 해발고도, 군집Ⅲ의 경우 가장 높은 군재도 그리고 군집Ⅳ의 경우 가장 낮은 해발고도에 위치하면서 가장 낮은 종다양도와 군재도를 나타내었다.

군집 간 빈도분석 수행 결과는 표 8과 같다. 군집Ⅲ, 군집Ⅳ는 암석노출도가 높은 지역이면서 수분 조건이 양호한 북사면에 더 높은 비율로 분포하였다. 군집Ⅰ의 경우 비교적 암석노출도가 낮으면서 서사면에 분포 비율이 높았고, 군집Ⅱ의 경우 암석노출도가 높으면서 북사면과 남사면에서 비율이 균등하게 나타나는 것으로 분석되었다.

표 7. 분비나무 집단 One-way ANOVA 분석 결과(해발고도, 종다양도, 균재도)

	I (N = 38)	II (N = 81)	III (N = 42)	IV (N = 43)	F	p
해발고도 (CV)	1,287(0.12) ^{ab}	1,348(0.09) ^b	1,239(0.10) ^a	1,223(0.08) ^a	11.949	.0***
종다양도 (CV)	2.546(0.15) ^c	2.307(0.16) ^b	2.472(0.13) ^{bc}	2.038(0.17) ^a	16.658	.0***
균재도 (CV)	0.709(0.11) ^{ab}	0.707(0.11) ^{ab}	0.748(0.09) ^b	0.678(0.12) ^a	6.406	.0***

Scheffe's posh hoc, *p<.05, **p<.01, ***p<.001

표 8. 분비나무 집단 빈도분석 결과(암석노출도, 사면방위)

암석노출도	빈도 (%)			
	≤ 10%	11-30%	31-50%	51-75%
I (N = 38)	15.8	44.7	21.1	18.4
II (N = 81)	4.9	16.0	22.2	56.8%
III (N = 42)	-	2.4	16.7	81.0%
IV (N = 43)	-	7.0	11.6	81.4%

사면방위	빈도 (%)			
	≤ 10%	11-30%	31-50%	51-75%
I (N = 38)	23.7	18.4	36.8	21.1
II (N = 81)	33.3	13.6	21.0	32.1
III (N = 42)	33.3	21.4	23.8	21.4
IV (N = 43)	39.5	20.9	11.6	27.9

(4) 군집구조와 종조성

TWINSPAN에 의해 구분된 각 군집별 종조성의 특성을 비교하기 위해 중요치와 평균상대우점치를 표 9에 나타내었다.

군집 I 은 분비나무가 교목층과 아교목층에서 각각 33.7, 10.6으로 상층 수관을 점유하고 있으며 신갈나무는 22.8, 13.7로 분비나무와 함께 상층에서 우세한 세력이 나타났다. 아교목층에서 당단풍나무는 13.7 관목층에서 철쭉이 15.1 초본층에는 실새풀이 8.2로 우점하였다.

군집 II는 군집 I 보다 분비나무의 우점도가 비교적 높았으며 교목층과 아교목층에 각각 39.7, 12.2로 우점하고 있었다. 또한, 교목층에 신갈나무 20.3, 사스래나무 10.1, 잣나무 9.6 등 교목층 종구성 정도가 비교적 다양하였고, 아교목층에서 신갈나무와 당단풍나무가 각각 14.6, 10.2 순으로 높았다. 관목층에서는 철쭉이 22.3, 초본층에서는 실새풀이 10.5로 우점하였으며 이는, 군집 I 의 층위별 우점종과 일치하였다.

군집 III은 분비나무가 교목층과 아교목에서 각각 41.6, 7.5로 상층 수관을 점유하고 있으며, 아교목층에서 부계꽃나무가 11.4, 관목층에서 함박꽃나무가 9.1, 초본층에서 관중이 17.8로 우점하였다.

군집 IV는 분비나무가 교목층과 아교목층에서 각각 45.3, 12.6로 4개 군집 중 가장 높은 중요치를 보였다. 또한, 사스래나무가 12.9, 잣나무 10.3로 군집 III 과 비교하여 상층 수관을 이루는 종의 세력이 높았고, 아교목층에는 마가목 17.7, 부계꽃나무 12.9로 우점하였다. 관목층에서는 진달래가 15.5, 초본층에서는 관중이 15.2로 우점하였다.

군집 III과 군집 IV는 교목층과 아교목층에서 앞선 군집과 비교하여 분비나무 세력이 높았으며, 경쟁할 낙엽활엽수종의 세력도 비교적 낮게 분석되어 분비나무림의 안정적 유지가 가능할 것으로 판단된다. 특히, 아교목층에서 부계꽃나무의 중요치가 높게 나타난 것이 특징적이었고, 앞선 군집 I, II와 비교하여 미역줄나무의 세력도 상대적으로 낮게 나타났다.

표 9. 분비나무 임분의 군집별 중요치

군 집	수 종	층 위				M.I.P
		T1	T2	S	H	
I	분비나무	33.7	10.6	3.5	1.3	19.4
	신갈나무	22.8	13.7	2.2	0.8	15.1
	당단풍나무	3.6	13.7	10.0	1.5	7.6
	피나무	6.0	8.1	2.4	0.2	5.7
	마가목	1.8	6.1	3.7	0.2	3.3
	까치박달	2.6	5.0	1.7	0.3	3.0
	시닥나무	1.7	3.3	6.4	1.4	2.9
	사스래나무	2.5	4.6	1.5	0.2	2.8
	고로쇠나무	1.5	5.7	1.2	0.1	2.7
	철쭉	-	0.6	15.1	1.2	2.4
	함박꽃나무	-	4.7	5.9	0.9	2.4
	잣나무	4.5	0.2	0.9	0.5	2.3
	팔배나무	3.0	2.2	0.7	0.3	2.2
	물푸레나무	3.0	2.0	1.1	0.1	2.2
	미역줄나무	-	0.6	6.7	3.2	1.5
	층층나무	2.1	1.1	0.4	-	1.4
	거제수나무	1.1	2.0	0.4	0.1	1.2
	귀룽나무	0.6	1.1	1.5	0.1	0.8
	산개벚지나무	0.9	1.0	0.5	0.1	0.8
	주목	1.7	-	0.1	0.1	0.8
	들메나무	1.7	-	-	-	0.8
	산돌배	0.3	1.8	-	-	0.7
	나래회나무	-	1.7	0.9	0.2	0.7
	산벚나무	0.8	1.0	-	-	0.7
	복장나무	0.6	0.9	0.6	0.2	0.6
	실새풀	-	-	-	8.2	0.6
	노린재나무	-	-	3.6	0.2	0.6
	부계꽃나무	0.3	0.9	0.5	0.2	0.5
	단풍취	-	-	-	6.2	0.5
	호랑버들	0.8	0.3	-	-	0.5
	기타 216종 생략	2.4	6.9	28.3	72.3	14.3
	합계	100	100	100	100	100

T1 : 교목층, T2 : 아교목층, S : 관목층, H : 초본층

표 9 계속. 분비나무 임분의 군집별 중요치

군 집	수 종	층 위				M.I.P
		T1	T2	S	H	
Ⅱ	분비나무	39.7	12.2	4.7	2.9	23.0
	신갈나무	20.3	14.6	1.9	1.2	14.3
	사스래나무	10.1	9.8	1.9	1.0	8.1
	잣나무	9.6	3.8	2.3	0.9	6.1
	피나무	5.5	6.8	1.1	0.7	4.8
	마가목	2.5	9.7	3.1	0.8	4.7
	당단풍나무	0.6	10.2	6.4	1.6	4.5
	철쭉	-	-	22.3	4.6	3.8
	시닥나무	0.9	6.3	4.7	1.8	3.2
	함박꽃나무	-	3.9	5.6	1.0	2.1
	미역줄나무	-	0.5	7.8	3.8	1.7
	고로쇠나무	1.3	2.7	0.6	0.1	1.6
	진달래	-	-	8.5	1.6	1.4
	주목	1.7	1.4	0.3	0.1	1.3
	물푸레나무	1.2	1.6	1.0	0.3	1.2
	팔배나무	0.9	1.7	0.3	0.1	1.0
	실새풀	-	-	-	10.5	0.8
	산앵도나무	-	-	3.6	2.3	0.7
	쇠물푸레나무	-	1.5	1.3	0.2	0.7
	산벚나무	0.8	0.7	-	-	0.6
	나래회나무	-	0.8	1.7	0.9	0.6
	산개벚나무	0.2	1.4	0.2	0.0	0.6
	박달나무	0.7	0.6	0.1	0.0	0.5
	꽃개회나무	-	0.9	1.3	0.7	0.5
	부계꽃나무	0.3	0.8	0.5	0.1	0.5
	층층나무	0.5	0.7	-	-	0.4
	대사초	-	-	-	5.6	0.4
	조릿대	-	-	0.3	4.9	0.4
	회나무	-	0.9	0.4	0.2	0.3
	까치박달	-	1.0	0.3	0.1	0.3
	기타 237종 생략	3.1	5.5	18.1	52.0	9.9
	합 계	100	100	100	100	100

T1 : 교목층, T2 : 아교목층, S : 관목층, H : 초본층

표 9 계속. 분비나무 임분의 군집별 중요치

군집	수종	층위				M.I.P
		T1	T2	S	H	
Ⅲ	분비나무	41.6	7.5	4.8	2.4	22.4
	고로쇠나무	8.2	7.9	2.1	0.4	6.6
	부개꽃나무	2.1	11.4	2.9	0.4	5.0
	마가목	3.3	8.7	3.0	0.7	4.7
	주목	7.9	3.1	0.4	0.1	4.7
	함박꽃나무	-	9.1	8.4	0.5	4.1
	사스래나무	5.9	3.5	0.7	0.5	3.9
	귀룽나무	2.0	5.7	5.9	0.6	3.6
	잣나무	4.0	1.7	1.3	1.1	2.6
	당단풍나무	0.8	6.0	2.0	0.6	2.6
	거제수나무	4.8	0.5	0.3	0.2	2.4
	신갈나무	3.6	1.9	0.4	0.4	2.4
	피나무	2.3	3.5	0.8	0.3	2.3
	시닥나무	0.3	4.6	2.7	1.0	2.1
	물푸레나무	2.9	2.0	0.3	0.1	2.0
	다래	-	2.9	4.6	2.0	1.8
	관중	-	-	-	17.8	1.4
	꽃개회나무	-	3.0	3.8	0.9	1.6
	나래회나무	-	2.9	2.8	1.0	1.4
	개회나무	-	2.8	2.6	1.3	1.4
	미역줄나무	-	1.0	5.8	2.0	1.3
	물참대	-	-	6.7	1.0	1.1
	층층나무	2.0	0.5	-	0.1	1.1
	난티나무	1.7	0.7	-	0.1	1.0
	병꽃나무	-	0.5	4.6	0.4	0.9
	복장나무	1.1	0.9	-	0.4	0.8
	들매나무	1.1	0.2	-	-	0.6
	털개회나무	-	0.8	1.9	0.4	0.6
	호랑버들	0.8	0.5	-	-	0.5
	딱총나무	-	-	2.6	1.5	0.5
	기타 165종 생략	3.6	6.1	28.4	61.8	12.7
	합계	100	100	100	100	100

T1 : 교목층, T2 : 아교목층, S : 관목층, H : 초본층

표 9 계속. 분비나무 임분의 군집별 중요치

군 집	수 종	층 위				M.I.P
		T1	T2	S	H	
IV	분비나무	45.3	12.6	7.4	5.1	26.3
	마가목	3.4	17.7	7.9	3.0	8.4
	사스래나무	12.9	6.4	0.4	0.6	8.0
	잣나무	10.3	2.4	2.4	1.9	6.0
	함박꽃나무	1.3	10.6	7.7	1.2	5.1
	부개꽃나무	0.9	12.9	4.2	0.4	5.1
	피나무	4.4	5.3	1.3	0.2	3.9
	귀룽나무	1.9	4.7	2.7	1.8	2.9
	진달래	-	0.3	15.5	4.0	2.8
	주목	3.2	1.7	0.9	0.2	2.2
	신갈나무	3.8	0.5	-	0.8	2.0
	시닥나무	0.3	2.4	3.7	2.5	1.7
	고로쇠나무	1.5	2.6	0.6	0.2	1.6
	나래회나무	-	2.5	2.5	2.6	1.4
	관중	-	-	-	15.2	1.2
	당단풍나무	-	2.2	2.8	0.4	1.1
	철쭉	-	1.2	4.2	0.5	1.1
	참조팝나무	-	-	4.2	5.0	1.0
	개벚지나무	1.6	0.9	-	0.2	1.0
	다래	0.4	1.6	1.3	1.8	1.0
	눈측백	0.5	0.6	2.6	1.5	0.9
	붉은병꽃나무	-	-	5.1	1.8	0.9
	박달나무	1.2	0.7	0.1	0.2	0.8
	산개벚지나무	0.7	1.6	-	-	0.8
	미역줄나무	-	0.9	2.5	1.7	0.8
	층층나무	1.3	0.4	-	0.1	0.8
	털개회나무	-	0.6	3.0	1.1	0.7
	퍼진고사리	-	-	-	8.8	0.7
	물박달나무	1.2	0.3	-	-	0.7
	병꽃나무	-	-	3.7	0.6	0.6
	기타 122종 생략	3.9	6.5	13.1	36.6	8.6
	합계	100	100	100	100	100

T1 : 교목층, T2 : 아교목층, S : 관목층, H : 초본층

(5) 흉고직경급 분포도와 치수 밀도

각 조사구에서 매목조사를 실시하여 얻어진 자료를 바탕으로 군집 별 평균 상대우점치가 높은 상위 3개 수종의 분포 상태를 비교하고 치수 밀도를 종합하여 군집 별 분비나무림의 천이 경향과 지속가능성 여부를 파악하고자 하였다.

군집Ⅱ에서 작은 직경급의 분비나무가 가장 풍부하였으나 성목의 양은 비교적 적게 관찰되었고 함께 생육 중인 신갈나무 개체수가 역 J자형에 가까운 형태를 나타내었다. 또한 일부 직경급 크기에서 신갈나무가 분비나무 개체수 보다 높게 나타난 것을 미루어볼 때 분비나무와 지속적인 경쟁 관계를 형성할 것으로 판단되며, 이는 군집Ⅰ의 경우도 유사한 경향을 나타낼 것으로 판단된다.

군집Ⅳ의 경우 분비나무 흉고직경급 분포가 역 J자형에 가까운 형태를 나타내었으며 경쟁 중인 수종과 비교하여 풍부한 개체수를 나타내었고 50cm 이상의 치수 밀도가 풍부하여(표 10) 안정적인 개체군 구조를 유지할 것으로 판단된다. 군집Ⅲ의 경우 분비나무 분포가 정규분포형에 가까운 형태를 보이거나 모든 직경급에서 분비나무가 점유하고 있고, 동반하는 종의 개체수가 불안정하여 분비나무림이 유지될 것으로 판단된다.

표 10. 군집 별 분비나무 치수 밀도

군집	$h \geq 50\text{cm}$	$10 < h < 50\text{cm}$	$h \leq 10\text{cm}$
I	50	38	56
II	91	66	87
III	107	75	66
IV	234	122	78

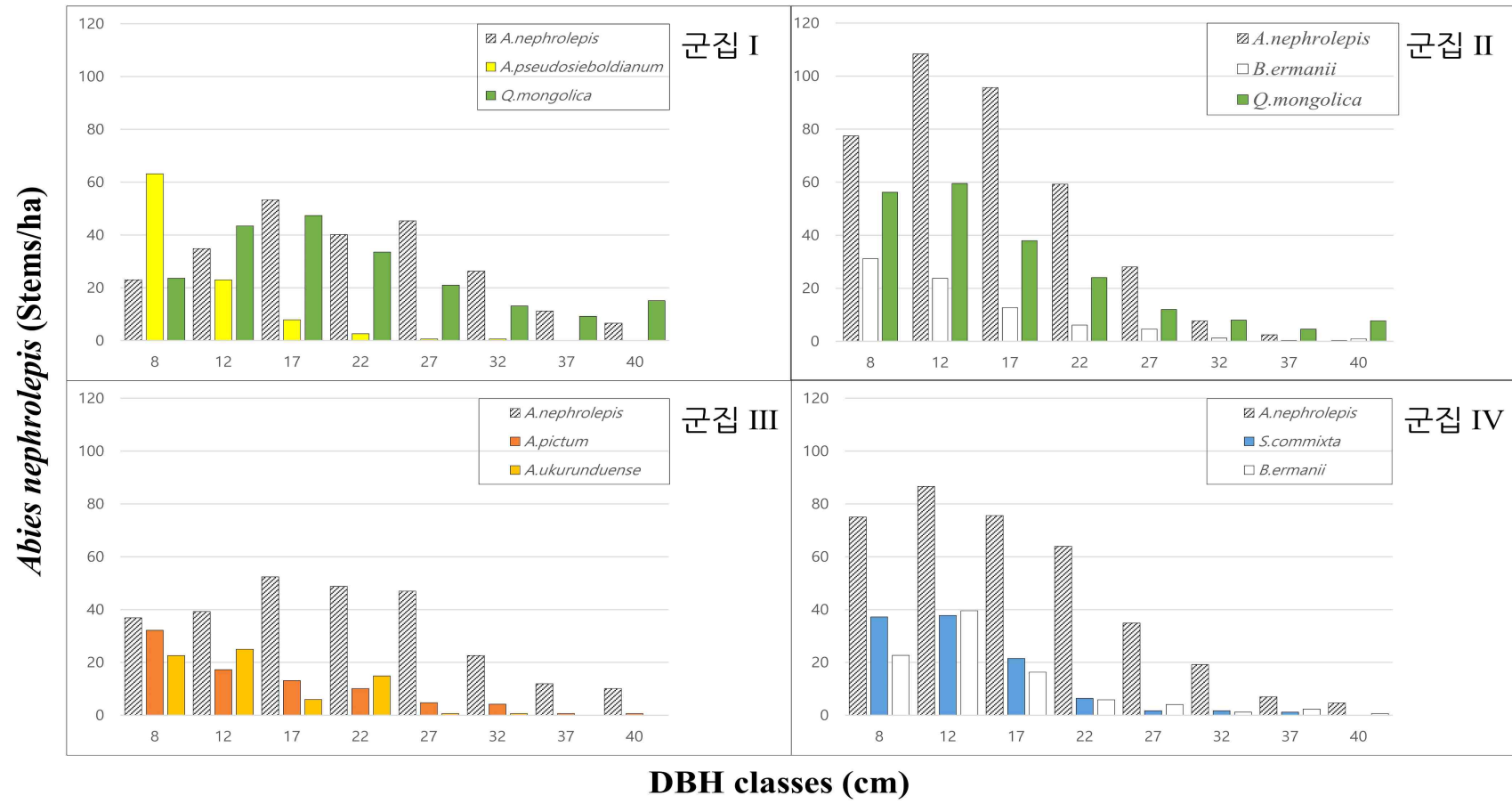


그림 17. 군집 별 분비나무 임분의 흉고직경급 분포도

라. 고찰

우리나라 분비나무림은 TWINSpan의 분석에 의해 4개 군집으로 구분되었으며, 암석노출도와 지형적 위치에 따라 식생형과 종조성이 분류된 것으로 판단된다. 군집 I, II와 IV 내 관목층에서 진달래와 철쭉의 중요치가 높게 나타난 것을 미루어볼 때 바람이 많이 불고 비교적 건조한 사면상부-능선부의 입지의 식생형, 군집III은 물참대, 고로쇠나무 등의 식별종에 의해 구분되고 부계꽃나무의 중요치가 높게 나타난 특징을 미루어 볼 때 습윤한 조건의 산록-계곡부 식생형으로 분류된 것을 알 수 있다. 군집IV의 경우 가장 낮은 종다양도를 보였는데 이는 상층의 발달로 임내 환경에 영향을 끼쳐 하층식생의 발달이 저조한 결과로 판단된다.

중요치 분석결과 분비나무는 모든 군집에서 상층 수관을 점유하고 있어 분비나무림으로 유지될 것으로 판단되나, 군집 I, II와 같이 암석노출도가 상대적으로 낮은 입지에서의 분비나무림은 신갈나무 등 낙엽활엽수종의 중요치가 높게 나타나 지속적인 경쟁이 예상된다. 군집III, IV의 경우 분비나무가 상층 수관을 점유하고 있고 이와 경쟁하는 낙엽활엽수종의 중요치는 비교적 낮게 나타났는데, 이는 높은 암석노출도로 인해 기타활엽수종의 이입 및 생육에 적합하지 않아 나타난 결과로 판단되며, 안정적인 분비나무림으로 유지가 가능할 것으로 판단된다.

각 군집별 하층식생의 종조성을 살펴본 결과 덩굴식물인 미역줄나무의 중요치는 군집IV를 제외하고 철쭉, 진달래 다음으로 높게 나타난 것으로 분석되었다. 미역줄나무와 같은 만경류의 덩굴식물은 교목성 수종이 고사하면서 수관층 열림으로 인한 숲틈 아래에서 급격히 번성하였다가 수관이 안정되면 미역줄나무 특성상 내음성이 약하여 감소하는 것으로 보고된다(Byeon et al., 2020) 특히, 선행연구에서 미역줄나무가 분비나무 치수 갱신에 부정적인 영향을 미칠 수 있다는 연구결과를 미루어 볼 때 미역줄나무의 세력이 비교적 강하게 나타난 군집 I, II는 덩굴식물 제거 사업 등 인위적 개입을 시도하고 짧은 주기의 모니터링을 장기적으로 수행함으로써 사업의 효과를 관찰할 필요성이 있다.

4. 분비나무숲의 서식지 변화 예측

가. 서론

최근 기후변화로 인한 생물의 서식지 분포 변화는 광범위한 현상으로 인식되고 있으며(Parmesan, 2006), 향후 종의 개체군 감소 및 지속성을 위협할 수 있다.

특히 극지 및 아고산 종들은 분포 범위의 상승 및 이동이 제한되어 적합 서식지 영역이 축소됨에 따라 기후변화에 취약할 것으로 간주된다(Gaston, 1994; Walther et al., 2005; Rubidge et al., 2012). 기후변화로 인한 산림의 변화를 이해하고 대처하기 위해서는 산림의 취약요소를 평가하고 분석하는 연구가 필요하며, 산림생태계를 유지하기 위한 예측 방법론의 필요성이 강조되고 있다(Korea Climate Change Assessment Report, 2020).

특히 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD) 체결로 생물자원의 보호와 이용은 전 세계적으로 중대한 의미를 갖는다(Wang et al., 2023). 생물다양성협약 체결은 생물다양성 보전이 더이상 한 국가만의 문제가 아닌 세계적으로 공통 관심사가 되고 있음을 시사하며 생물 주권에서 우선적으로 고려되어야 할 것이다(CBD, 1992; Kim et al., 2009; Baek, 1999). 그러나 향후 100년간 지구의 온도는 1.5-4.4℃ 상승할 것으로 예측되고 이러한 온도상승은 생태계에 상당한 영향을 미칠 것으로 보고되어, 지속 가능한 자원 이용을 위한 보전 관리체계가 필요한 실정이다(IPCC, 2021).

한반도에 분포하는 분비나무는 아고산 침엽수종이면서 기후변화에 매우 민감한 수종으로 알려져 있다. 분비나무 보전관리 전략의 첫 과정으로, 생물종 서식지 예측모형인 종 분포 모형(Species Distribution Model; SDM)을 활용하고자 한다. 이는 샘플링된 정보를 바탕으로 샘플링되지 않은 장소를 예측할 수 있는 장점이 있으며 향후 기후변화로 인한 분비나무의 미래 분포 변화를 평가하여 보존 우선순위를 계획하고 설계하는 전략 수립에 사용될 수 있다(Hijmans and Graham 2006, Gallagher et al., 2013, Duckett et al., 2013).

한반도 분비나무 서식지 예측모형 분석을 위한 통계적 모형(Regression

model)과 기계학습 모형(Machine learning model)을 종합한 앙상블 모형(Ensemble model)을 적용하여 단일모형이 갖는 불확실성을 줄이고자 하였다(Bussion et al., 2010).

나. 연구방법

(1) 출현/비출현 좌표 구축

분비나무 출현자료는 멸종위기 고산지역 침엽수종 모니터링 조사를 통해 2021년 6월부터 2022년 9월까지 316개의 GPS(Global Positioning System) 좌표를 수집하였다. 또한 국립생태원 3차 현존식생도 자료에서 분비나무가 기록된 지점 중 선행연구와 현장 조사지의 입지조건 비교를 통해 추가 좌표를 확보하였다. 위치 좌표는 표본 편향(Sampling bias)에 의한 공간적 자기상관을(Spatially autocorrelated occurrence points)을 방지하기 위해 환경변수 격자당 1개씩 나타나도록 중복포인트를 제거하여 총 211개의 출현좌표를 구축하였다(Betts et al., 2006; Segurado et al.,; Dormann, 2007; Pearson et al., 2007; Veloz, 2009; Naimi et al., 2011).

비출현좌표 구축은 확보한 출현좌표를 통해 분비나무 서식지의 지형환경 특성을 파악하였으며 추가로 분비나무 분포 영역에 관한 선행연구를 포함하여 서식지의 경향성을 종합한 후, 분비나무 서식지 특징이 나타나지 않는 지점을 중심으로 3,097개의 비출현 좌표를 출현좌표 주변에 구축하였다. 동시에 임의비출현(Pseudo-absence, PA) 자료를 구축하여 실제 현장조사를 통한 비출현자료 획득의 한계를 보완하고자 하였다. 1,000개 이상의 PA 위치자료를 10회 반복 수행하여 구축하면 모든 모형에서 정합성이 확보되므로(Barbet-Massin et al., 2012), 6,903개의 임의비출현 위치자료를 10회 반복하여 연구지역 내 무작위(Random point) 위치자료를 생성하였다.

(2) 환경변수 구축

기후변화에 따른 한반도에서의 기온상승과 강수량 변화는 현재의 자연환경에 적응해온 생물과 생태계에 다양한 영향을 미친다(Kong et al., 2004). 따라서 생물 종의 적합한 서식환경에 영향을 줄 수 있는 변수를 판단하기 위

해, Worldclim(<http://www.worldclim.org>)에서 제공하는 30arcsec(약1km²) 19가지 Bioclim 변수들을 1970-2000년 데이터를 평균값으로 추출하여 현재값으로 적용하였다. 19가지 Bioclim은 서로 상관관계를 가지기 때문에 Pearson's r correlation 방법으로 상관관계가 0.7보다 높은 상관관계를 보이는 변수들은 두 변수 중 한 변수를 제외하여 구축하였다. 그 결과 분비나무 생장에 영향을 줄 수 있는 기온 관련 변수 Bioclim 1, 2, 4와 강수량 관련 변수 Bioclim 12, 13, 14을 선정하였다. 또한 SRTMv3의 DEM 데이터를 가공하여 사면향 자료를 도출하였으며 30arcsec 기상자료 해상도와 동일하게 맞추어 총 8개 지형환경변수를 분석에 사용하였다(표 11).

미래 기후자료는 UKESM1-0-LL 기후자료 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오를 사용하였으며, 2041년부터 2060년까지의 자료는 2050년대로 2061년부터 2080년까지의 자료는 2070년대로 각각 평균값을 적용하여 나타내었다. 주제도 구축 및 서식지 평가의 전 과정은 ArcGis 10.8과 Qgis 3.16 프로그램을 이용하여 수행하였고 좌표계는 WGS84를 사용하였다.

표 11. 분비나무 SDM 분석에 사용된 지형환경변수 데이터

Variables	Variable Name	Description
Climate Factor	Bioclim1	Annual mean temperature
	Bioclim2	Mean Diurnal Range
	Bioclim4	Temperature Seasonality (standard deviation × 100)
	Bioclim12	Annual precipitation
	Bioclim13	Precipitation of Wettest month
	Bioclim14	Precipitation of Driest month
Topographical Factor	DEM	Digital Elevation Model
	Aspect direction	Aspect direction

(3) 모형 개발

통계적 기반인 GLM(Generalized Linear Model), GAM(Generalized Additive Model) 기계학습 기반인 RF(Random Forest), FDA(Flexible Discriminant Analysis), CTA(Classification Tree Analysis), GBM(Generalized Boosted Model) 총 6가지 모형을 선정하였고, 모형의 개발을 위해 출현/비출현 자료와 환경변수 자료를 80:20 비율로 훈련자료(training data)와 시험자료(test data)로 분할 하였다. 훈련자료는 종 분포 모형의 개발에 시험자료는 모형의 검증에 사용되었으며 자료의 분배는 무작위로 이루어졌고 모형의 개발과 검증은 10회 반복(10 k-fold)하여 종합하였다. 앙상블 모형 구축은 각 개별모형에서 도출된 TSS(True Skill Statistics)값에 가중치를 부여하여 R Package 내 Biomod 2를 활용하여 구현하였다.

도출된 잠재서식 가능구역은 확률로 제시된 결과로 종의 출현 여부를 결정짓는 임계값(Threshold) 설정은 매우 중요하다. 임계값 설정은 출현지점의 정확도를 설명하는 Sensitivity(민감도)와 비출현지점의 정확도를 설명하는 Specificity(특이도)의 합이 최대가 되는 지점을 임계점으로 설정하여 출현/비출현 지도로의 변환을 수행하였다(Franklin et al., 2009).

(4) 모형 검증

모형의 검증은 ROC(Receiver Operating Characteristic)의 AUC(Area Under the Curve)값과 TSS값을 통해 판단하였다. AUC는 최소 0.5를 기준으로 모형의 정확도가 높을수록 1.0의 값을 나타내며, AUC 값이 0.8 이상이면 모형의 설명력이 우수하다고 판단하였다(Franklin, 2010). TSS 값은 -1에서 +1 사이의 범위를 갖는다. 본 연구는 0.4-0.6까지는 모형의 설명력이 “보통”, 0.6-0.7은 “높음”, 0.7 이상은 “매우 우수”로 분류하여 평가하였다(Allouche et al., 2006).

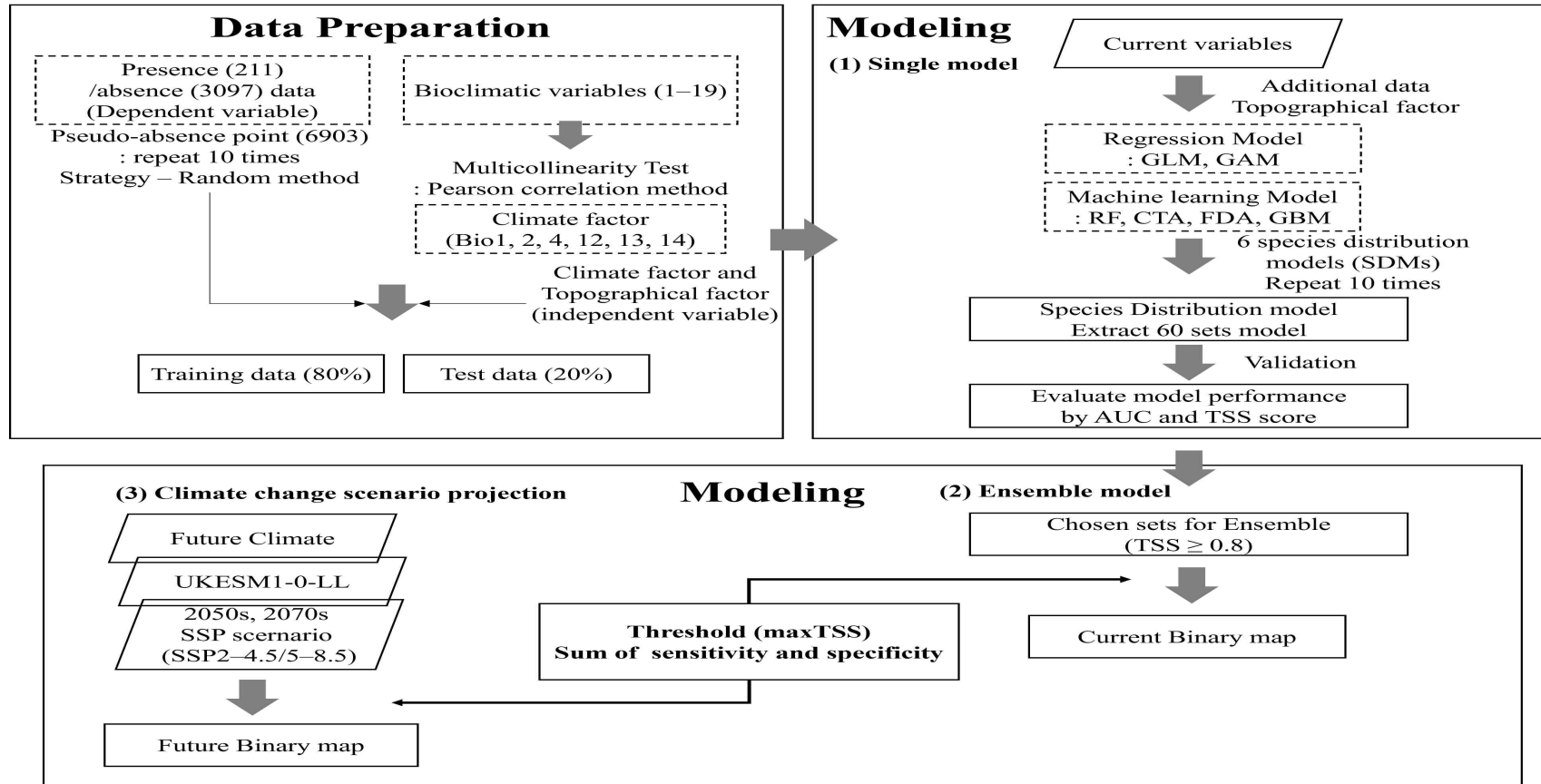


그림 18. SDM 적용 모식도(Lee et al., 2023)

다. 연구결과

(1) 현재 분비나무의 잠재서식 가능 구역 분석 및 모형 불확실성 평가

개별모형별 평균값, 최대값, 최소값 등을 산출하였고(표 12), RF 모형은 AUC와 TSS 값 모두 가장 높은값을 보였으며 대부분 모형의 성능은 우수한 것으로 나타났다.

양상블 방법론을 적용하기 위해 단일모형 중 TSS 값이 0.8 이상인 모형을 대상으로 TSS값에 가중치를 부여하여 구축하였고(그림 19), 구축한 양상블 모형의 AUC값과 TSS값은 0.999와 0.983으로 개별 중 분포 모형보다 향상된 정확도를 나타내었다.

양상블 모형 분석을 통해 분비나무의 분포 가능지역은 설악산, 오대산-계방산, 백운산-함백산-장산, 화악산-석룡산, 소백산 등에서 넓은 면적으로 나타나고, 치악산, 흥정산, 명지산 등은 다른 지역과 비교하였을 때 비교적 좁은 서식 가능지역이 도출되었다.

또한, 출현자료가 나타나지 않는 대암산, 일월산, 용문산, 선달산, 구룡산, 매봉산, 태기산에서도 서식 가능지역이 나타났다. 특히 남부지역의 지리산, 덕유산, 한라산 등에서도 그 분포가 나타났는데 이는 구상나무와 분비나무 서식지의 입지환경이 유사한 조건이기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

양상블 모형 구현에 따른 기여도가 큰 변수는 연평균온도(Bioclim1)가 45%로 가장 높았고, 해발고도(Elevation) 16%, 연평균강수량(Bioclim12) 11%, 가장 다습한 달의 강수량(Bioclim13) 5% 순으로 나타났다.

8개 환경변수의 Response curve를 바탕으로 이변량 분석(Bivariate analysis)을 수행하여 독립변수 사이의 통계적 연관성을 살펴본 결과, 해발고도가 1,000m 이상이면서 연평균기온(Bioclim1)이 4-6℃ 일 때 분비나무 서식지에 가장 적합한 것으로 분석되었다(그림 20).

표 12. 모형별 정확도 평가

Model	AUC			TSS		
	Average (S.D)	Maximum	Minimum	Average (S.D)	Maximum	Minimum
GLM	0.986±0.019	0.999	0.915	0.936±0.030	0.984	0.830
RF	0.994±0.006	0.999	0.981	0.950±0.022	0.992	0.902
CTA	0.950±0.022	0.993	0.898	0.907±0.030	0.958	0.849
FDA	0.957±0.024	0.996	0.910	0.882±0.042	0.955	0.803
GAM	0.946±0.025	0.998	0.899	0.885±0.045	0.992	0.799
GBM	0.991±0.007	0.999	0.978	0.943±0.024	0.988	0.883

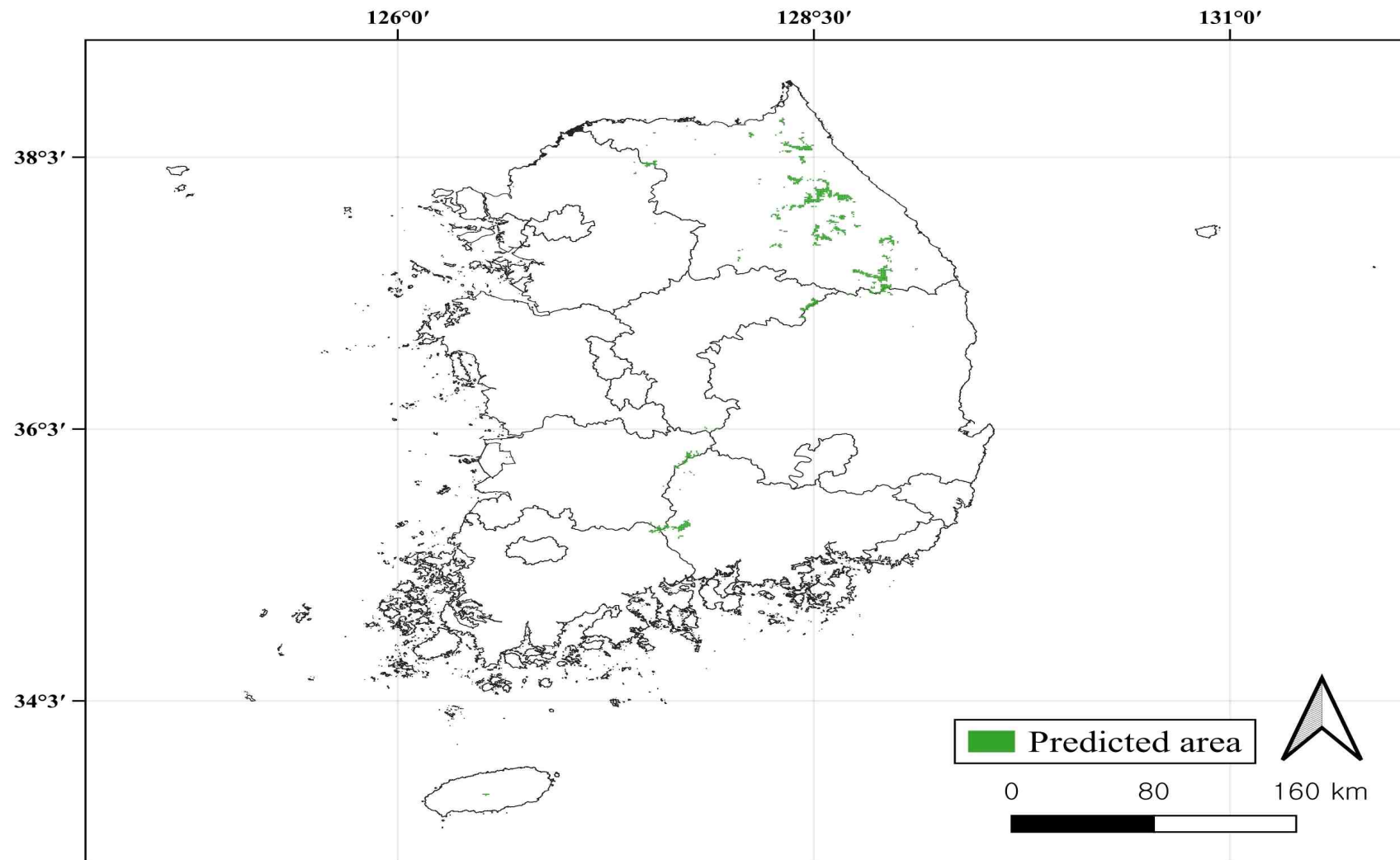


그림 19. 현재 분비나무 서식가능구역 분석결과(Lee et al., 2023)

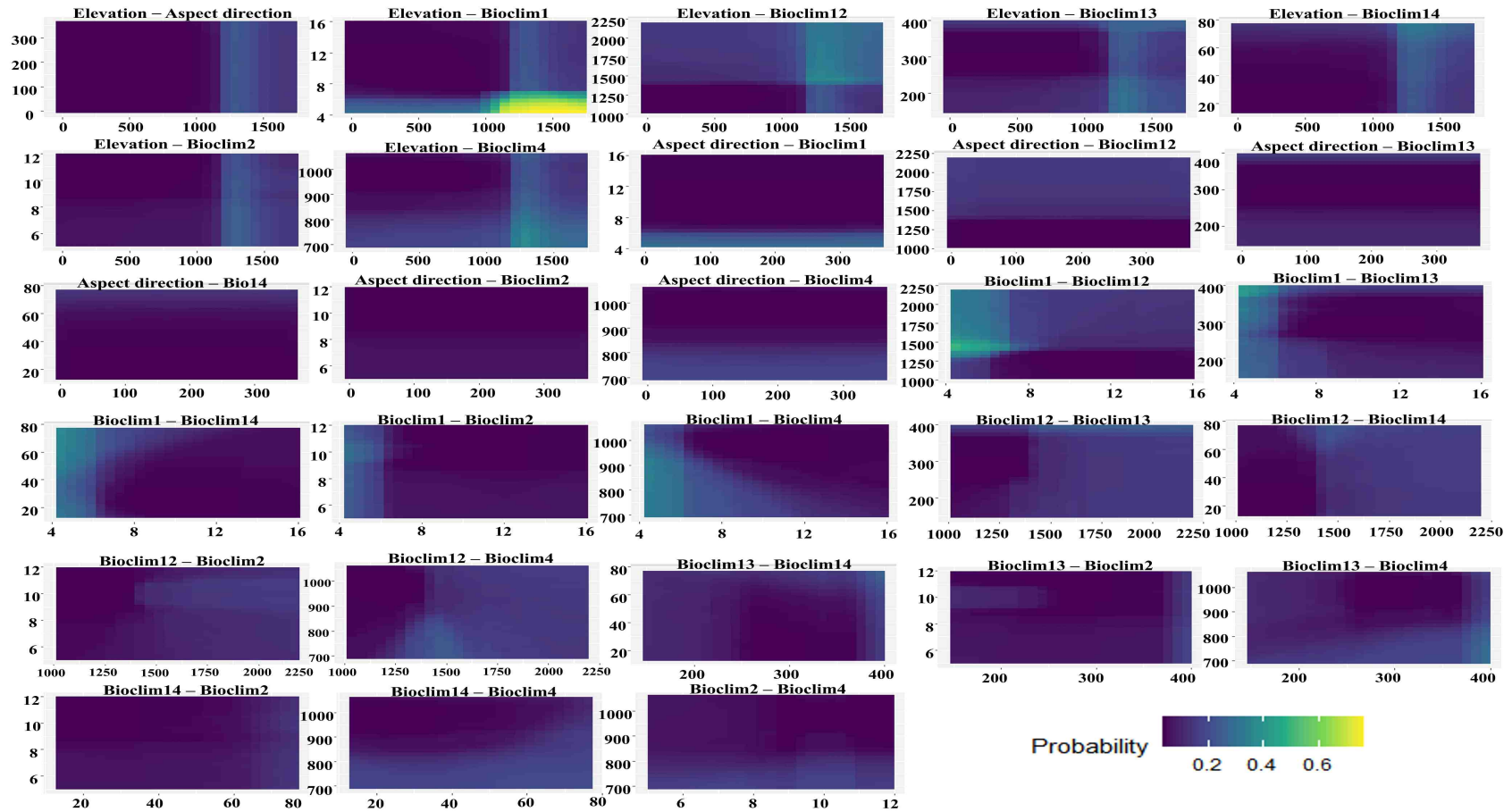


그림 20. 이변량 분석을 통한 지형환경변수 간의 관계 분석(Lee et al., 2023)

(2) SSP 기후변화 시나리오에 따른 분비나무 잠재서식지 분포 변화

UKESM1-0-LL 모델의 공통사회 경제경로(SSP) 2-4.5와 5-8.5를 적용하여 미래 잠재서식지 분포 변화를 TSS값에 가중치를 부여하여 앙상블 모형을 구축하였다.

미래 잠재서식지 분포 변화 분석 결과 대부분의 분비나무 자생지는 대부분 감소하는 것으로 분석되었고, 일부 서식지는 절멸이 예상되었다.

SSP 2-4.5 시나리오에서 2050년대에는 현재 잠재서식 가능지역과 비교하여 65%, 2070년대에는 71% 감소하는 것으로 나타났다(그림 21, 22). SSP 5-8.5 시나리오에서 2050년대에는 현재 잠재서식 가능지역과 비교하여 74%, 2070년대에는 88% 줄어들 것으로 예측되어(그림 23, 24) 향후 분비나무 서식지에 관하여 대책 마련이 시급한 것으로 판단된다.

특히, 모형 평가 시 연평균온도의 기여도가 가장 크게 분석되었으나 시나리오에 따른 분포 변화 결과에서 지리산, 덕유산과 강원 중부와 북부지역에서 비교적 넓은 잠재서식 가능지역이 지속적으로 도출되었다.

이러한 결과는 향후 분비나무가 온난화에 따른 생리적 임계치를 넘는 상황에 있어, 강수량을 분비나무 잠재서식 가능구역을 조절하는 주요한 요인으로 주목할 필요가 있다.

이와 관련하여 한라산은 남한 내 가장 풍부한 강수량을 기록하는 것으로 알려져 있으나, 지구온난화에 따른 임계치 이상의 기온상승은 분비나무 생육지에 적합하지 않을 것으로 판단된다(Lee et al., 2023).

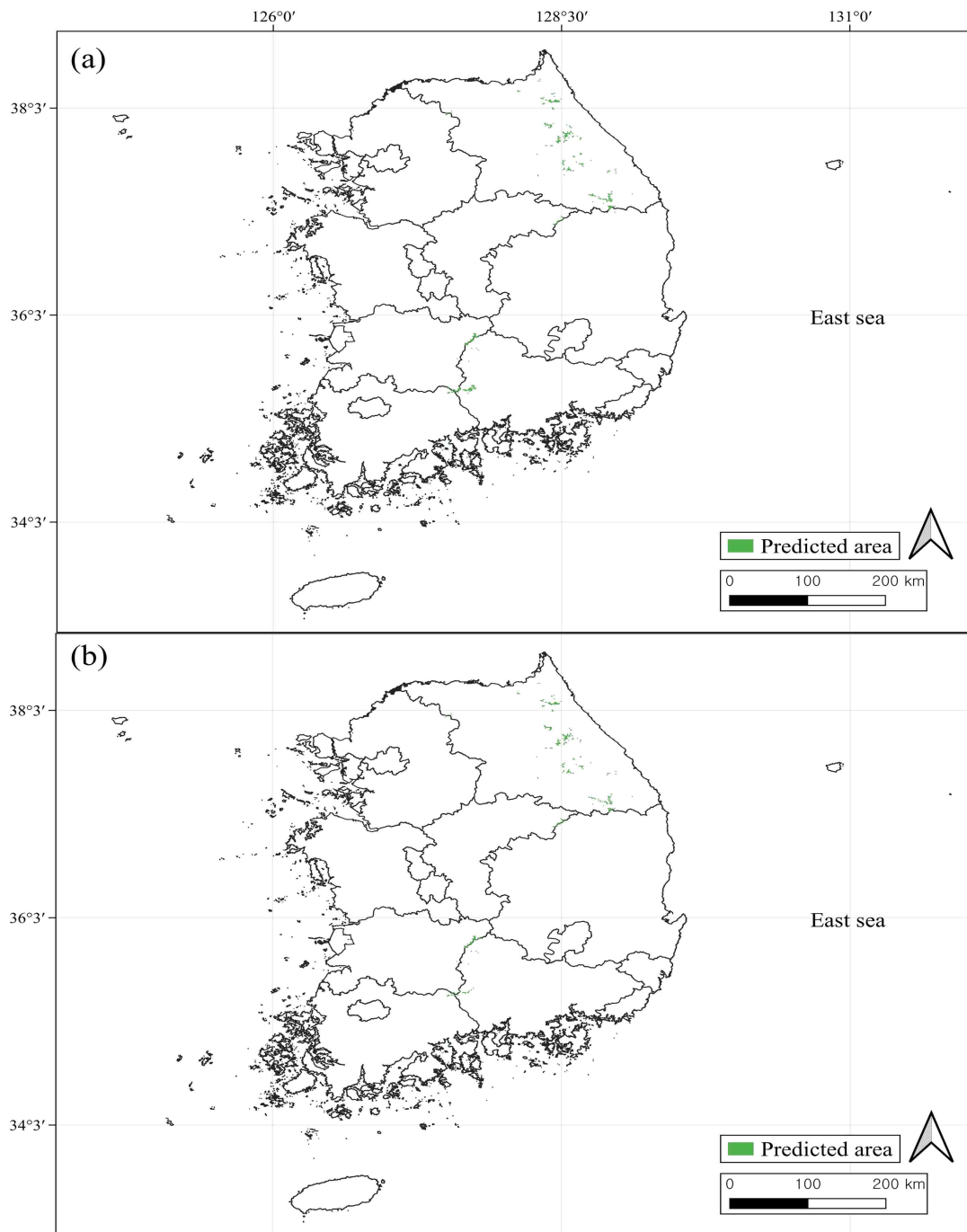


그림 21. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석결과. (a) 2050(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)

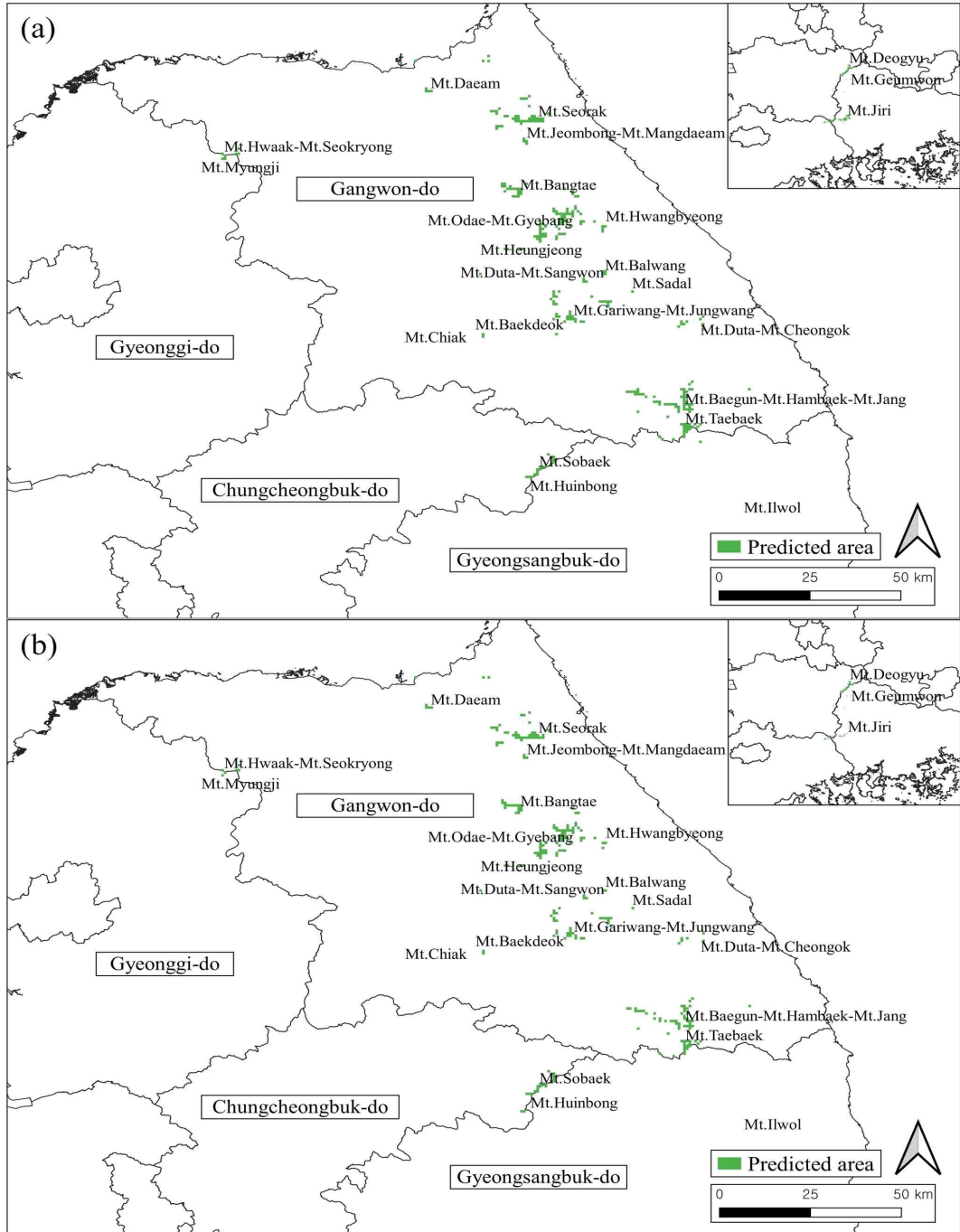


그림 22. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석 지리산 강원도 구역 확대 결과. (a) 2050(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP2-4.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)

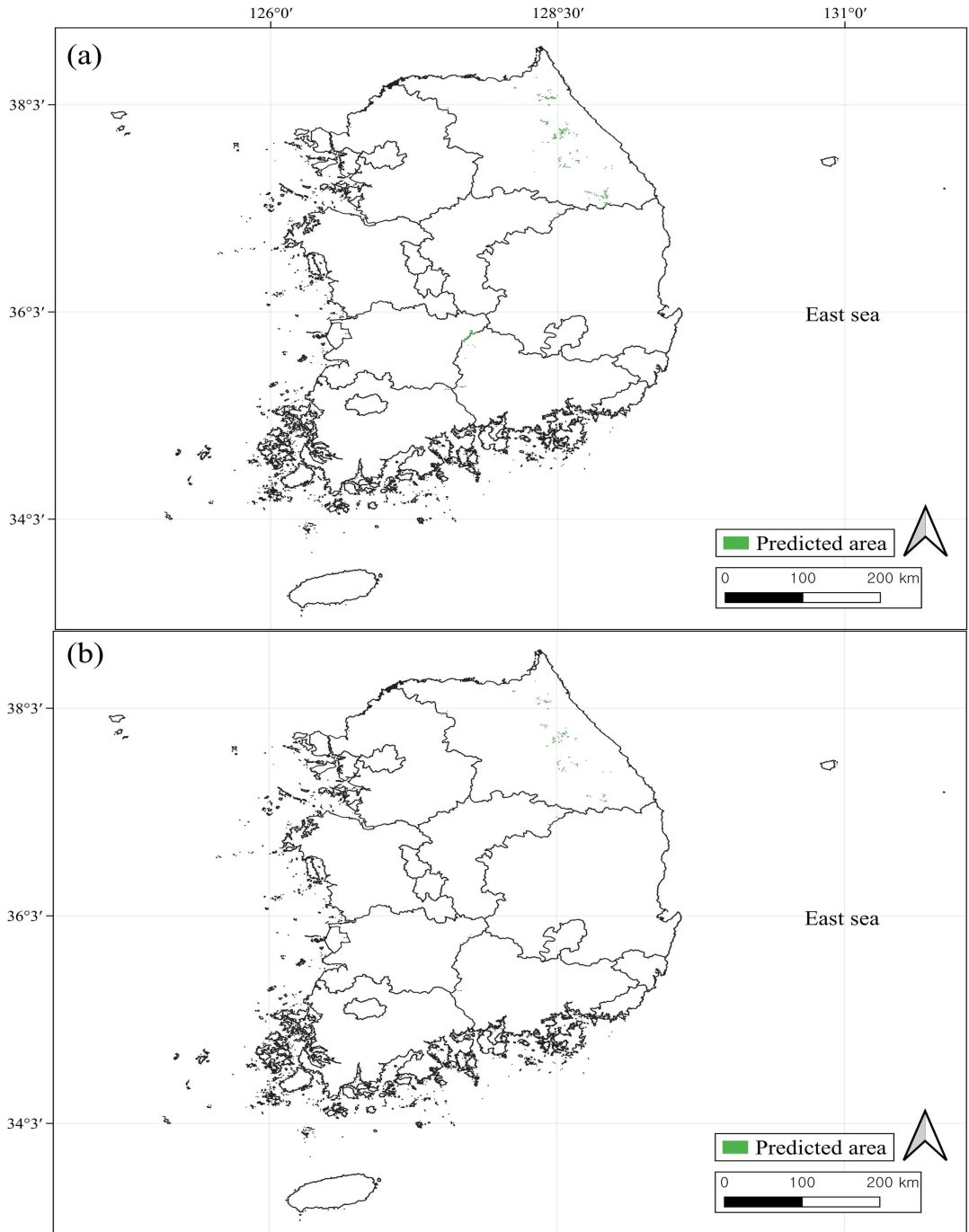


그림 23. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석결과. (a) 2050(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)

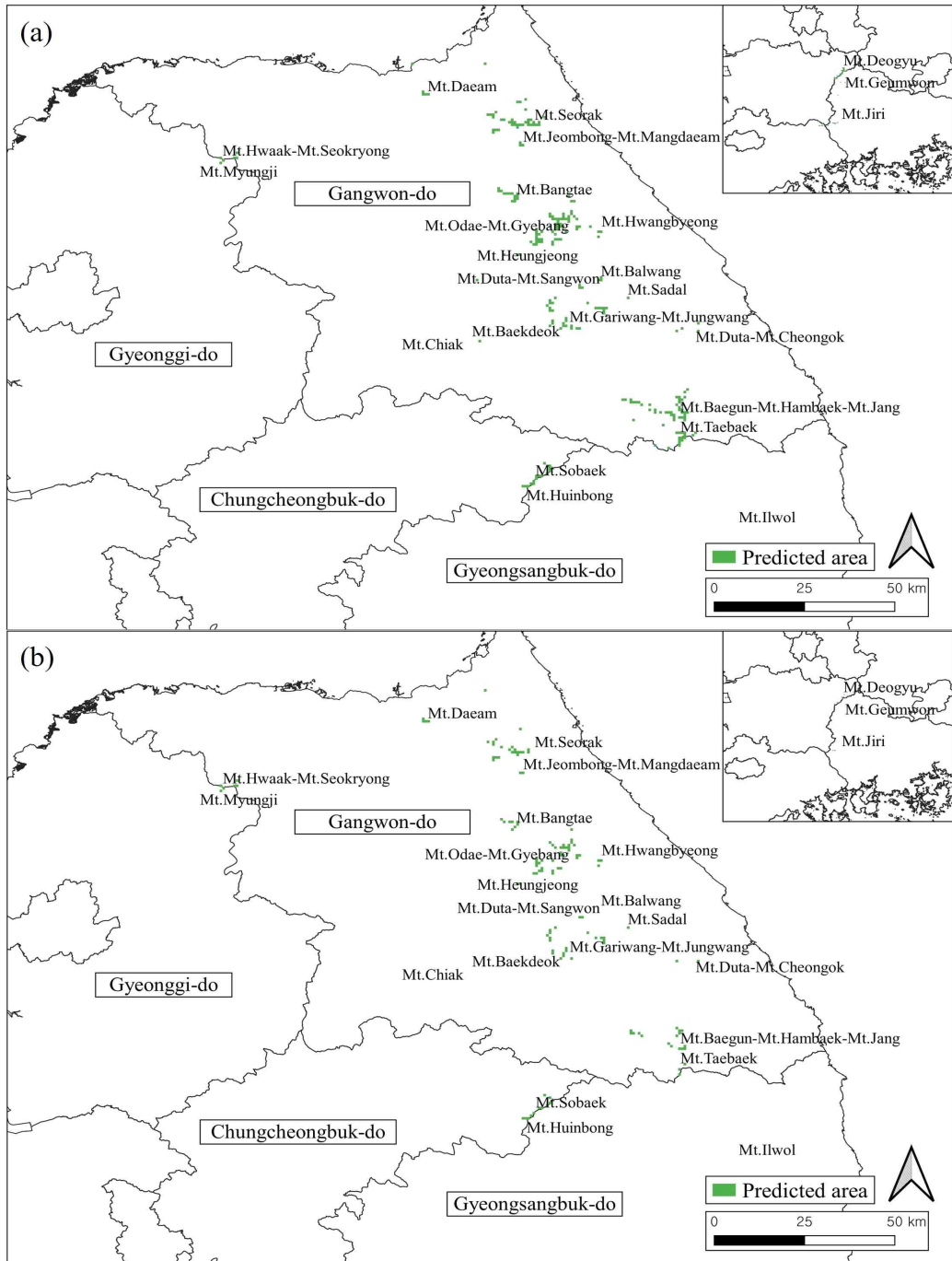


그림 24. SSP 시나리오를 기반으로 한 분비나무 향후 서식가능구역 분석 지리산 강원도 구역 확대 결과. (a) 2050(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역 (b) 2070(SSP5-8.5)년 분비나무 서식가능구역(Lee et al., 2023)

라. 고찰

분비나무 서식지 적합성에 영향을 미치는 다양한 변수 중 연평균기온(Bioclim1), 해발고도(Elevation), 연평균강수량(Bioclim12)은 분비나무 생육에 지대한 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 이변량 분석을 통해 해발고도 1,200m 이상이면서 연평균기온이 4-6℃인 지역은 분비나무가 선호하는 지형 환경적 특징임을 도출하였다(Lee et al., 2023).

시나리오에 따른 분비나무 분포 변화를 고려할 때 강수량을 분비나무 서식지 적합성에 주요한 요인으로 주목하였다. 그러나 전반적으로 강수량의 역할은 과거 수많은 연구에서 그 중요성이 강조되었지만, 구체적으로 종의 원활한 생육에 대한 기후 임계값 이해는 크게 부족하다(Simon et al., 2019; Naudiyal et al., 2021). 따라서 향후 분포 변화에 따른 잠재서식가능 유지 지역과, 절멸 지역을 대상으로 기상장비를 설치하여 분비나무 서식에 적합한 기후 임계값 이해가 동반되어야 한다(Lee et al., 2023).

강원 중·북부 지역과 지리산, 덕유산은 서식지 적합성 감소가 나타났지만, 다른 자생지와 비교하여 비교적 넓은 서식 가능지역이 도출되었다. 특히 지리산과 덕유산, 금원산은 분비나무 자생지로 확인되지 않았으나 지속적으로 분비나무 생육에 적합한 것으로 분석되어 향후 분비나무 자생지의 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

명지산, 치악산, 흰봉산, 황병산, 점봉산-망대암산, 백덕산, 소백산은 기후변화에 따른 서식 가능지역과 비교하였을 때 서식지 절멸 혹은 크게 감소하는 것으로 예측되었다. 이중 소백산 내 분비나무는 높은 수준의 유전적 다양성과 고유한 유전자형이 보고되나(Lee et al., 2008), 기후변화 시나리오에 따라 서식가능지역이 크게 감소하는 것으로 분석되어 보전 우선순위를 뒤야 한다(Lee et al., 2023).

4. 분비나무숲의 산림해충

가. 서론

분비나무(*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.)는 국내에서 전나무속(*Abies*)에 속하는 구상나무(*A. koreana*)와 함께 기후변화에 취약한 고산성 침엽수종으로 알려져 있으며 러시아로부터 중국, 한반도에 걸쳐 분포하며, 한반도에는 지리산에 이르기까지 해발 700m 이상의 고도에 분포하는 것으로 보고되어 있다(이, 2021). 특히, 국내 덕유산, 가야산, 지리산, 한라산의 아고산 지대에 분포하는 침엽수종으로 조경수, 공원수, 건축재, 펄프재, 용재수로 이용되는 수종이다(이, 2009).

분비나무의 주요 분포지의 해발고도가 상대적으로 매우 높고 수목 개체가 약 25m까지 자라는 큰 종인 관계로 국내외에서 본 종을 가해하는 해충에 대한 연구는 매우 드물게 이루어져 있는 상황이다. 그 중에서도 국내에서 알려진 분비나무의 해충으로는 솔알락명나방(*Dioryctria abietella* (Denis & Schiffermüller))(Shin et al., 2018), 젓나무잎응애, 전나무잎말이진딧물(산림청) 등이 알려져 있고, 국외에서는 나무좀류인 *Polygraphus proximus* Blandf. (Department for Environment Food & Rural Affairs), *Ips typographus* (L.) (Department of Agriculture, Food and the Marine, 2021) 정도가 알려져 있을 뿐이다.

나. 조사 및 방법

(1) 조사지

국내에서 분비나무가 군락으로 분포하는 대표적이고 해발고도 1,400 m 이상인 총 5개 고산지역에서 분비나무를 비롯한 침엽수를 가해하는 해충 조사를 수행하였다. 자세한 조사지 정보는 다음 표 13과 같다.

표 13. 분비나무 해충 조사를 수행한 조사지 정보

구분	행정구역	경도 및 위도	방형구 면적(m)
가리왕산	강원도 정선군 북평면 숙암리 산400	N37°28'8" E128°34'0"	60×80
계방산	강원도 평창군 용평면 노동리 산1-1	N37°43'53" E128°28'37"	40×80
말왕산 I	강원도 평창군 대관령면 용산리 산142	N37°36'29" E128°40'13"	40×60
말왕산 II	강원도 평창군 대관령면 용산리 산142	N37°36'33" E128°40'25"	60×60
장산	강원도 영월군 상동읍 구래로 252-3	N37°07'41" E128°51'51"	40×60

(2) 곤충 트랩

1) 설치 트랩 종류 및 개수

분비나무 우점 산림내에서의 산림해충에 대한 정량적인 조사를 위하여 3가지 곤충 트랩(말레이즈 트랩, 린드그렌 퍼넬 트랩, 윈도우 트랩)을 각 조사지(방형구)에 설치하여 샘플 조사를 수행하였는데, 각 조사지(방형구) 내에는 말레이즈 트랩(Malaise trap, MT) 1개, 린드그렌 퍼넬 트랩(Lindgren funnel trap, LFT) 3개, 윈도우 트랩(Window trap, WT) 3개를 설치하였다.

2) 트랩 설치 위치

말레이즈 트랩은 각 방형구 중심부에 설치하였고 린드그렌 퍼넬 트랩과 윈도우 트랩은 각 트랩 간의 간섭을 최소화하기 위하여 서로 교차적(지그재그 형식)으로 설치하였다.

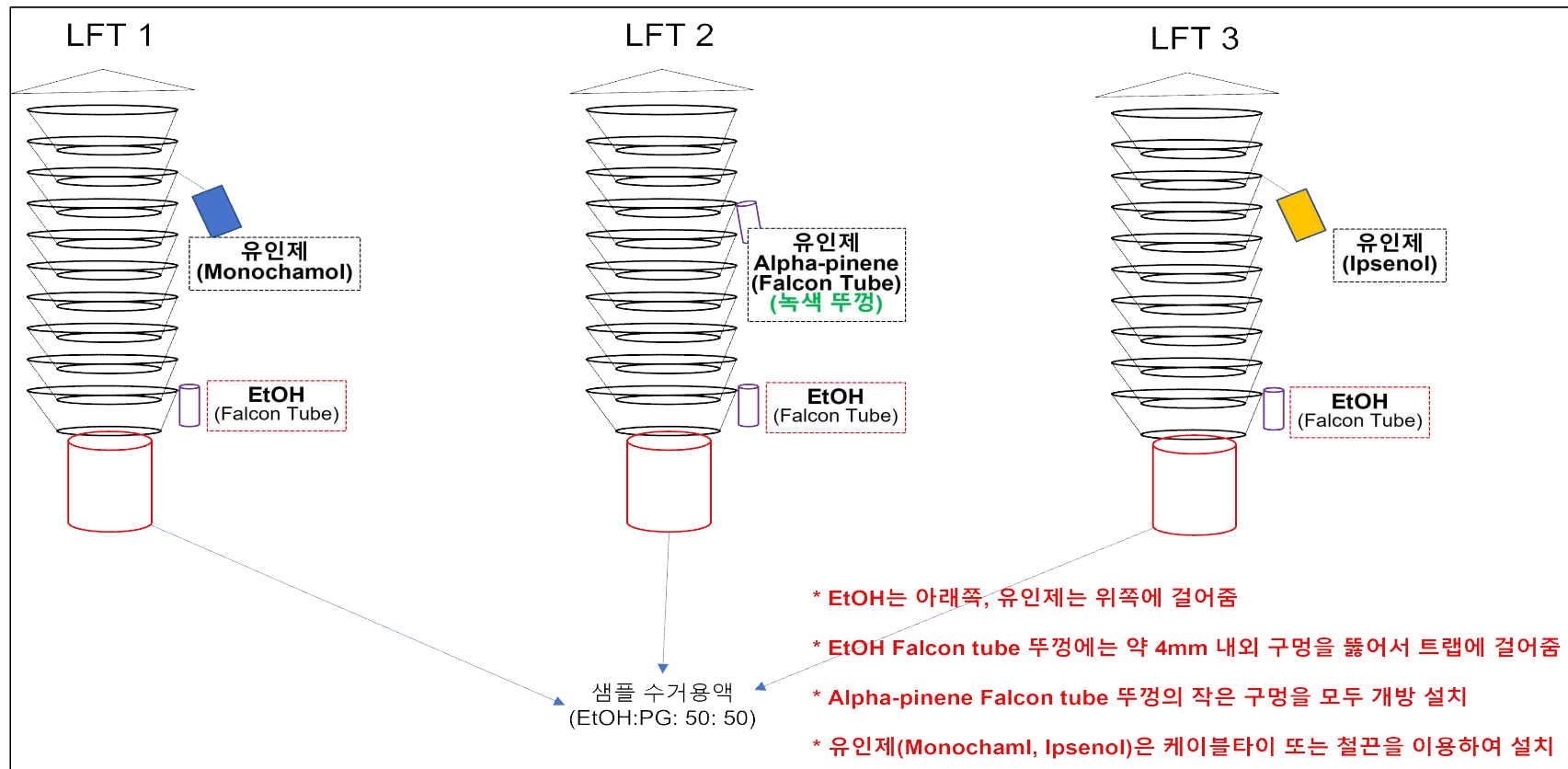
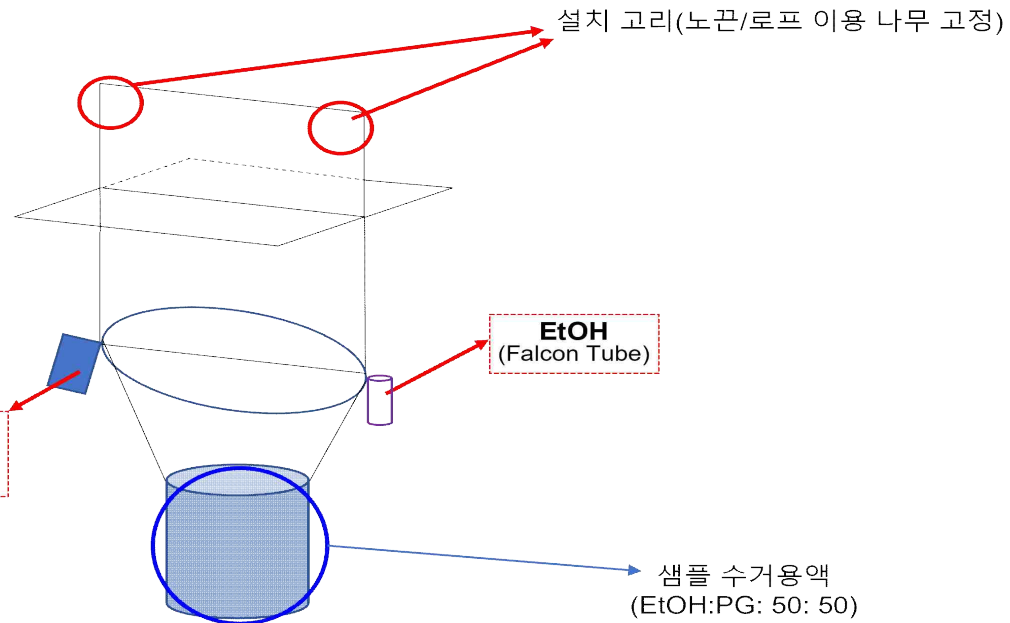


그림 25. 린드그렌 퍼넬 트랩(LFT) 구성도



유인제
(각 트랩별 Monochamol
또는 Ipsenol) 설치



* Window trap은 지상 5m 높이 정도에 설치

* 매 조사 시, 샘플통 입구에 있는 불순물(낙엽, 가지, 거미줄 등) 제거

그림 26. 윈도우 트랩(WT) 구성도

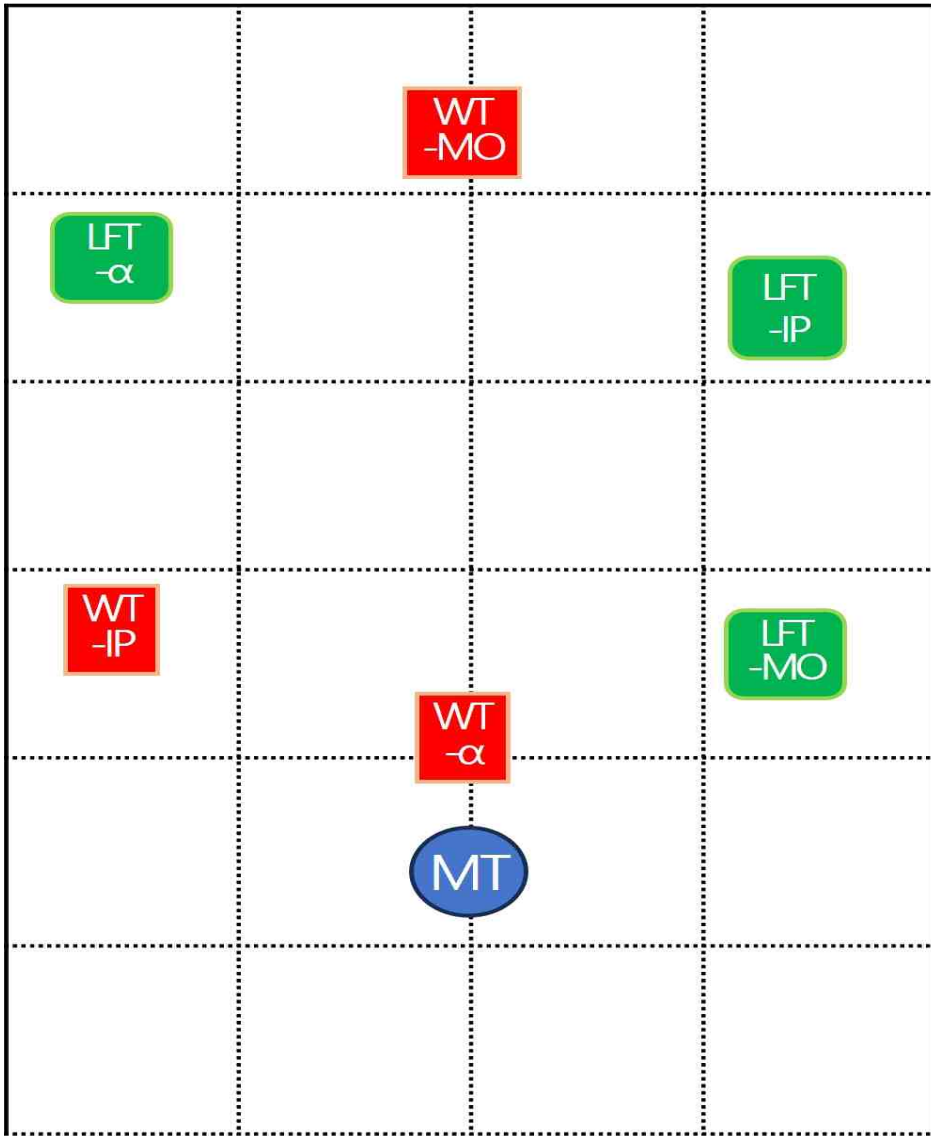


그림 27. 가리왕산 조사지 내 트랩종류 및 배치

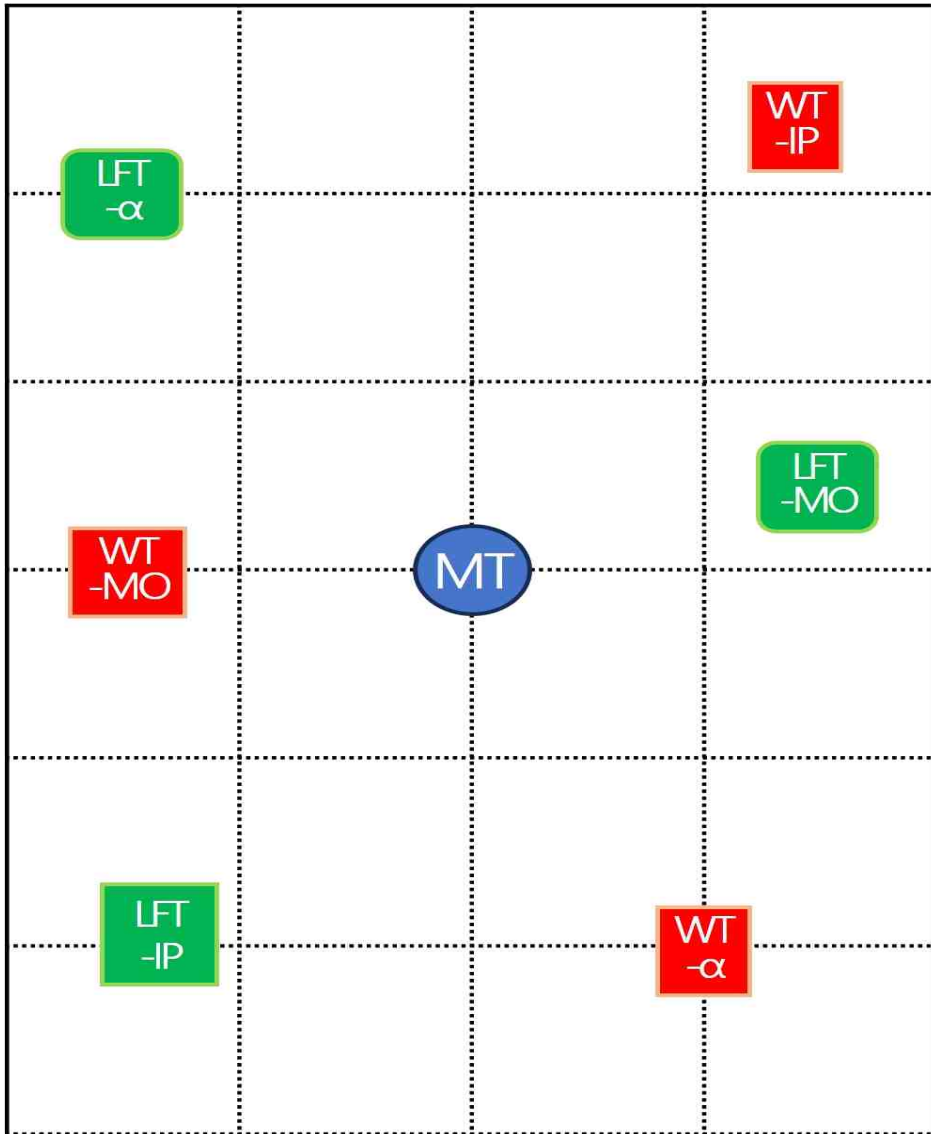


그림 28. 계방산 조사지 내 트랩종류 및 배치

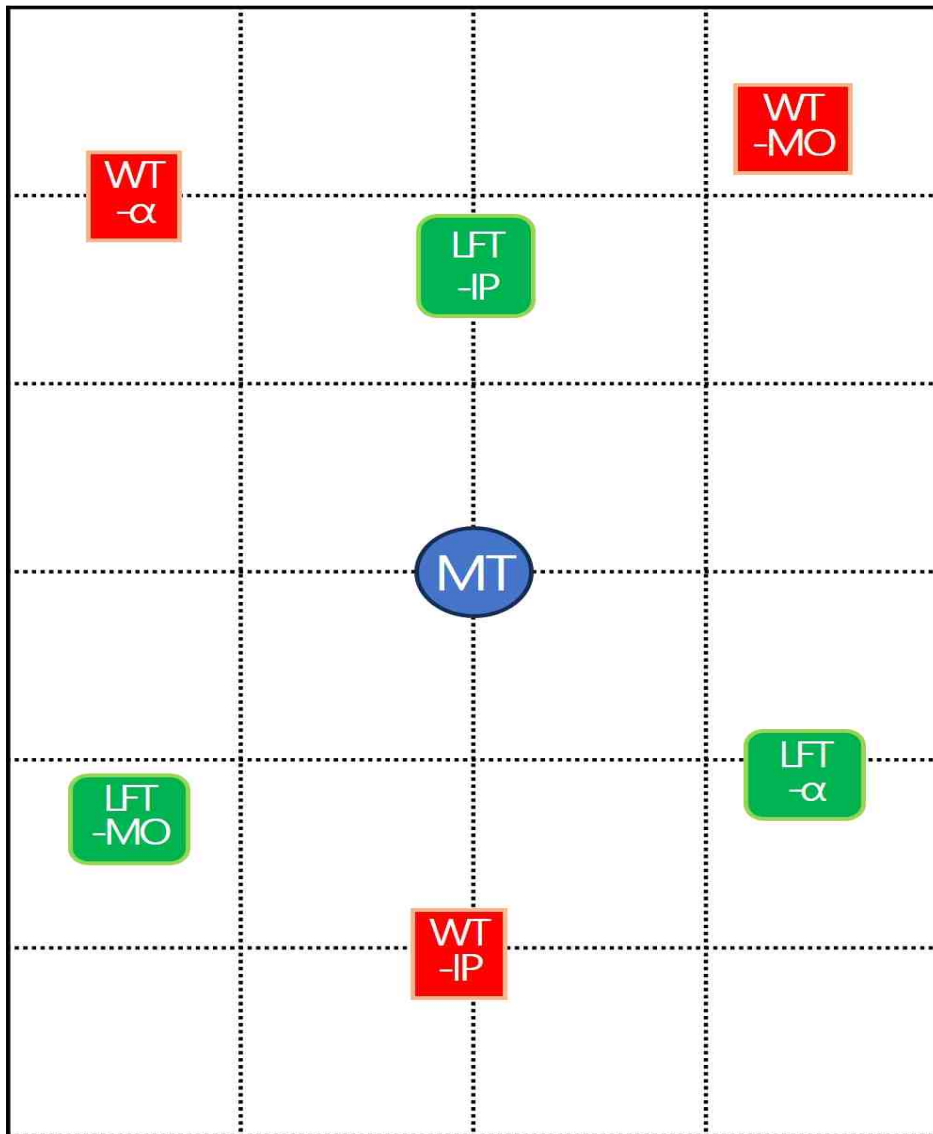


그림 29. 발왕산(I) 조사지내 트랩 종류 및 배치

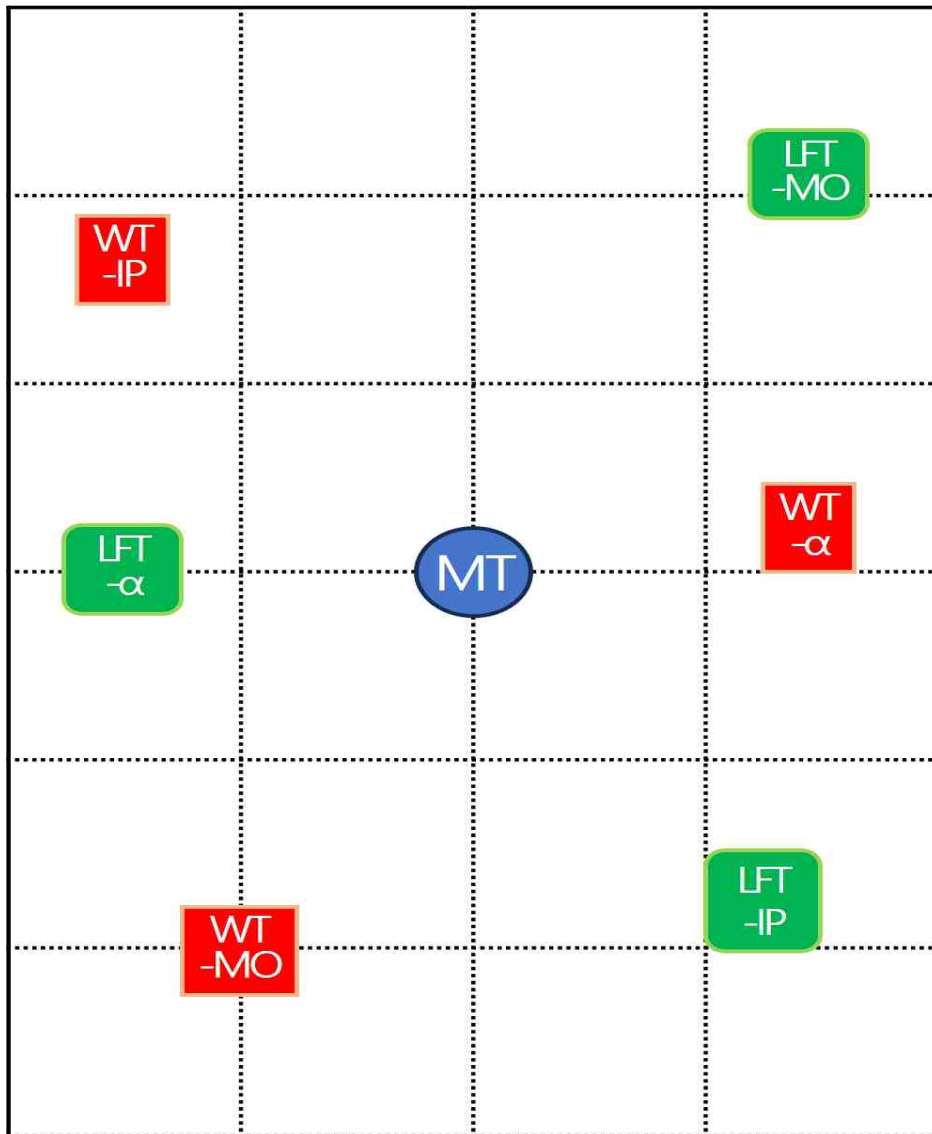


그림 30. 발왕산(II) 조사지 내 트랩종류 및 배치

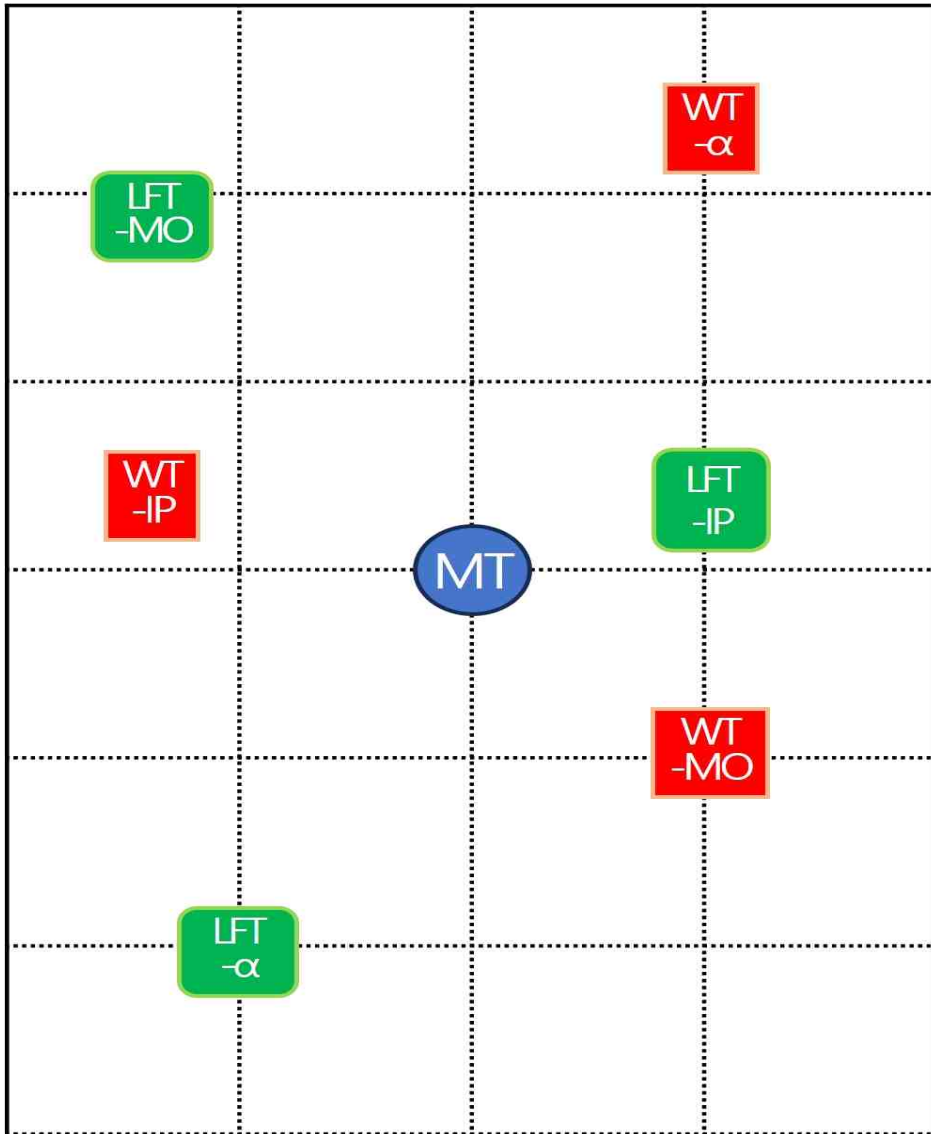


그림 31. 장산 조사지 내 트랩종류 및 배치

(3) 유인제

침엽수 해충(천공성 해충 중점)을 유인할 수 있는 유인제 총 3가지를 활용하였다. Alpha-pinene, Monochamol, Ipsenol이 이에 포함된다. 말레이즈 트랩은 유인제 없이 무작위적(randomly)으로 방형구 내에서 비행하는 산림해충을 조사하였으며, 교차적으로 설치한 린드그렌 퍼넬 트랩과 윈도우 트랩에는 에탄올(99.5%, Ethanol)과 3가지 각 유인제를 별도로 설치하였다. 각 트랩별 설치한 유인제의 종류와 개수는 다음 표 14와 같다.

표 14. 조사에 활용한 곤충 트랩 및 유인제 조건

트랩 구분		유인제 조건
말레이즈 트랩 (MT)		유인제 없이 무작위(random)적으로 조사지 내에서 비행성 곤충 및 특정 대상 분류군 조사
린드그렌 퍼넬 트랩 (LFT)	I	Ethanol(99.5%) 1개 + Monochamol 1개
	II	Ethanol(99.5%) 1개 + Alpha-pinene 1개
	III	Ethanol(99.5%) 1개 + Ipsenol 1개
윈도우 트랩 (WT)	I	Ethanol(99.5%) 1개 + Monochamol 1개
	II	Ethanol(99.5%) 1개 + Alpha-pinene 1개
	III	Ethanol(99.5%) 1개 + Ipsenol 1개

(4) 수거액

수집되는 산림해충 샘플의 양호한 상태 유지를 위하여 수거액은 에탄올(99.5%)과 프로파일렌 글라이콜(Propylene glycol)을 1:1로 혼합한 용액을 활용하였다.

(5) 조사기간

2023년 5월 25일~6월 9일 중에 각 조사지에 트랩을 설치하여 조사를 착수하고 10월 9일까지 총 5차례에 걸쳐서 샘플을 확보하였다.

표 15. 각 조사지에서의 산림해충 조사 기간

구분	조사 기간(샘플 확보 기간)(2023년)					
	트랩 설치	1차	2차	3차	4차	5차
가리왕산	06.01.	06.01.~06.22.	06.22.~07.21.	07.21.~08.21.	08.21.~10.09.	10.09.~10.24.
계방산	06.02.	06.02.~06.23.	06.23.~07.18.	07.18.~08.22.	08.22.~10.09.	10.09.~10.24.
발왕산I	06.08.	06.08.~06.22.	06.22.~07.17.	07.17.~08.21.	08.21.~10.09.	10.09.~10.24.
발왕산 II	05.19.	05.19.~06.22.	06.22.~07.17.	07.17.~08.21.	08.21.~10.09.	10.09.~10.24.
장산	06.09.	06.09.~06.22.	06.22.~07.20.	07.20.~08.21.	08.21.~09.21.	09.21.~10.19.



그림 31. 가리왕산 내 설치한 트랩 모습

(좌: 말레이즈 트랩, 중: 린드그렌 퍼널 트랩, 우: 윈도우 트랩)



그림 32. 발왕산 I 내 설치한 트랩 및 조사 활동 모습

(좌: 말레이즈 트랩, 중: 린드그렌 퍼넬 트랩, 우: 윈도우 트랩)



그림 33. 장산 내 설치한 트랩 및 조사 활동 모습
(좌: 말레이즈 트랩, 중: 린드그렌 퍼넬 트랩, 우: 윈도우 트랩)



그림 34. 발왕산 II 내 설치한 트랩 모습
(좌: 말레이즈 트랩, 중: 린드그렌 퍼널 트랩, 우: 윈도우 트랩)

(7) 중점 연구 대상 분류군

본 조사연구를 통해 확인한 주요 산림해충 중 침엽수를 기주식물로 하거나 밀접한 관계를 가지는 대표적인 해충 분류군인 딱정벌레목(나무좀류, 하늘소류) 및 노린재목(매미충류, 거품벌레류, 멸구류)에 대한 집중적인 분석을 진행하였다.



그림 35. 현장조사 및 정리된 샘플 모습

다. 연구결과 및 고찰

(가) 가리왕산

1) 나무좀류

총 10종 383개체를 확인하였다. 확인된 종 중에서 단풍나무좀, 북한나무좀, 오리나무좀이 다른 종들에 비하여 상대적으로 많은 개체가 확인되었으며 단풍나무좀의 경우는 전체의 약 45%를 차지하였다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 북한나무좀(126개체), 가문비털나무좀(20개체), *Dryocoetes* sp. 1(1개체), 가문비가는나무좀(1개체)이 확인되었다.

조사시기별 출현하는 나무좀류의 종과 개체수를 분석한 결과, 1차 시기('23.6.1.~22.)에 가장 많은 종과 개체수(총 8종 330개체)가 확인되었으며 2차 시기부터 종과 개체수가 급격하게 감소하는 경향을 확인하였다. 특히, 우점종으로 확

인된 3종(단풍나무좀, 북한나무좀, 오리나무좀)과 가문비털나무좀이 1차 조사 시기 중에 가장 많은 개체가 확인되었다.

유인제별로 확인한 나무좀류의 종 수는 유인제간 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만, 개체수면에서 Ipsenol으로부터 184개체로 가장 많은 개체를 확인할 수 있었으며 Monochamol 118 개체, Alpha-pinene 81개체로 Ipsenol와 Monochamol이 많은 개체를 유인하는 것을 확인할 수 있었다.

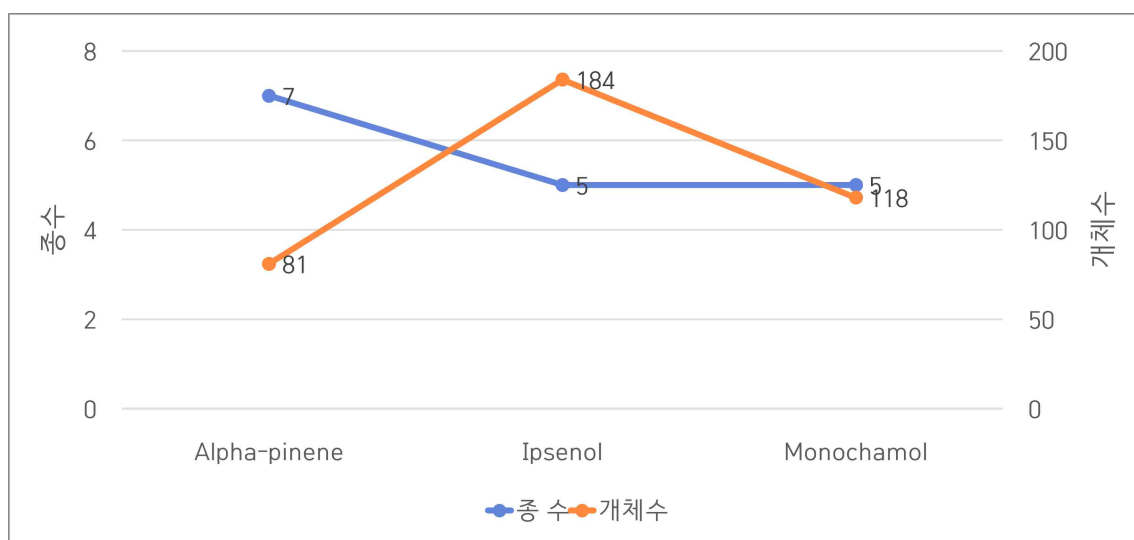


그림 36. 가리왕산 내 유인제별 확인된 나무좀류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 나무좀류를 분석한 결과, 윈도우 트랩으로부터 가장 다양한 9종과 가장 많은 208개체를 확인하였고, 다음으로 린드그렌 퍼넬 트랩으로부터 5종 175개체를 확인하였다. 이는 2가지 트랩에 에탄올과 유인제를 설치한 결과인 것으로 판단되며 이를 통해 2가지 트랩이 해충 밀도와 종을 파악하기에 적합한 것으로 확인되었다.

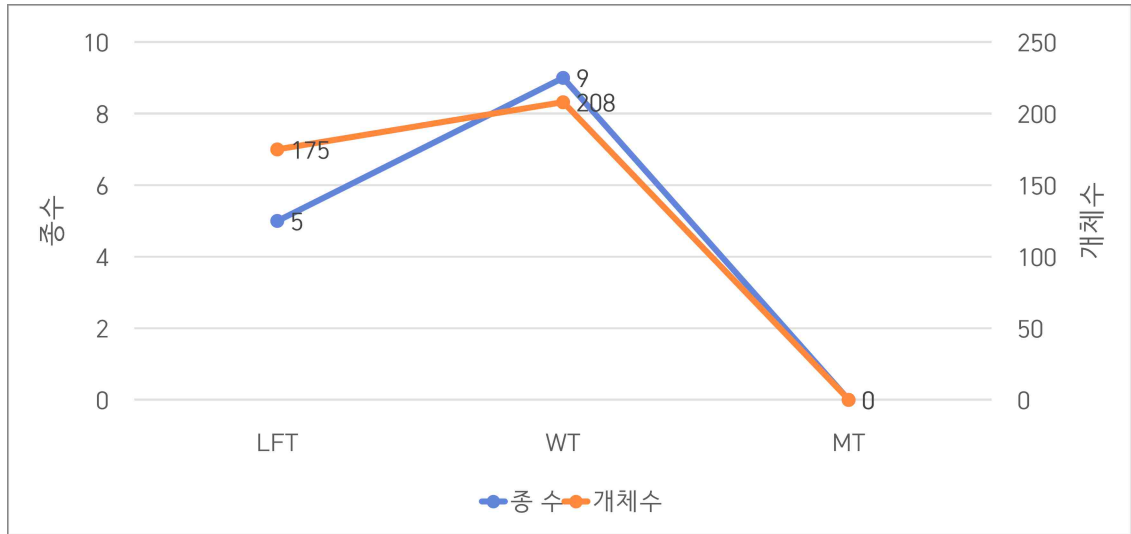


그림 37. 가리왕산 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교

2) 하늘소류

총 7종 13개체를 확인하였다. 가리왕산 조사지에서는 상대적으로 적은 종 수와 개체가 확인되었다. 그 중에서도 녀점각시하늘소 5개체, 수염하늘소 2개체, 산각시하늘소 2개체 순으로 확인되었다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 수염하늘소(2개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 하늘소류의 종과 개체수를 분석한 결과, 전체적으로 다른 조사지와 비교하였을 때 적은 종수와 개체가 확인되었지만, 1차 시기(‘23.6.1.~22.)에 가장 많은 개체수가 확인되었다.

유인제별로 확인한 하늘소류를 분석하였을 때, Alpha-pinene에서 가장 다양하고 많은 개체(3종 3개체)가 확인되었다.

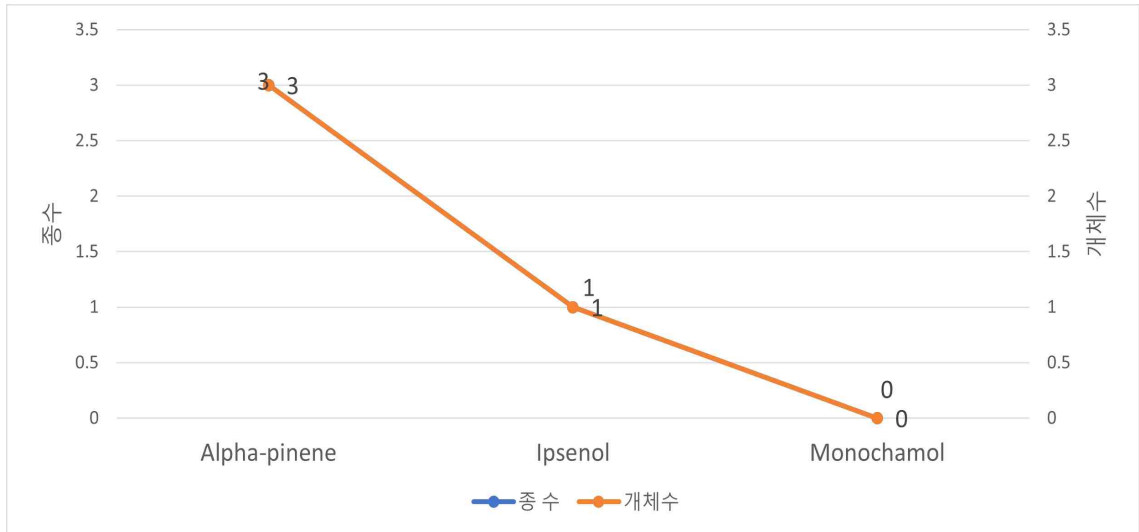


그림 38. 가리왕산 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 하늘소류를 분석한 결과, 총 13개체가 확인된 가리왕산에서 말레이즈 트랩을 통해 4종 9개체로 가장 다양하고 많은 개체가 확인되었다.

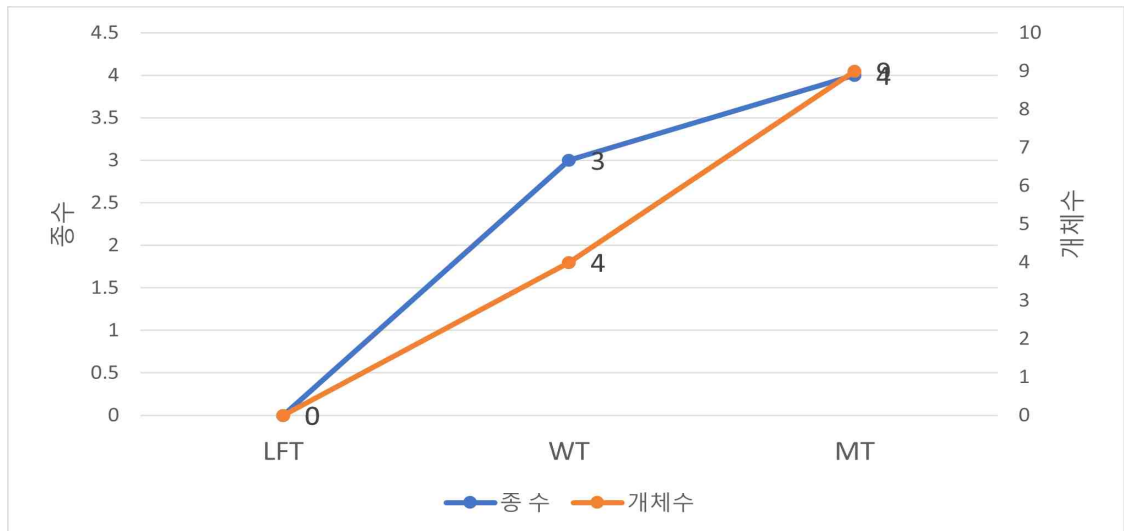


그림 39. 가리왕산 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

3) 노린재류(거품벌레류, 매미충류, 멸구류)

총 20종 197개체가 확인되었다. 검정거품벌레가 70개체(전체 중 약 36%)로 가장 많이 확인되었으며, *Aguriahana sichotanus* (Anufriev) 39개체, 노랑애매미충속 22개체 등으로 확인되었다. 우점종으로 확인된 검정거품벌레의 약충은 기주식물 뿌리 부근에 거품을 형성하여 그 속에 은신하는 특성을 가진 종으로 알려져 있으며, *A. sichotanus*는 국내 미기록 종으로 잣나무와 종비나무 등을 기주식물로 삼고 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 검정거품벌레(70개체), 검정복판거품벌레(16개체), 가문비거품벌레(4개체), 가문비애매미충속(3개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 노린재류의 종과 개체수를 분석한 결과, 3차 조사기간(7.21.~8.21.) 중 가장 다양하고 많은 개체수가 확인되어 총 9종 57개체가 확인되었으며, 4차 조사기간부터 점차 감소하는 경향을 확인하였다.

유인제별로 확인한 노린재류를 분석하였을 때, Alpha-pinene에서 가장 다양하고 많은 개체가 확인되어 총 6종 23개체가 확인되었다.

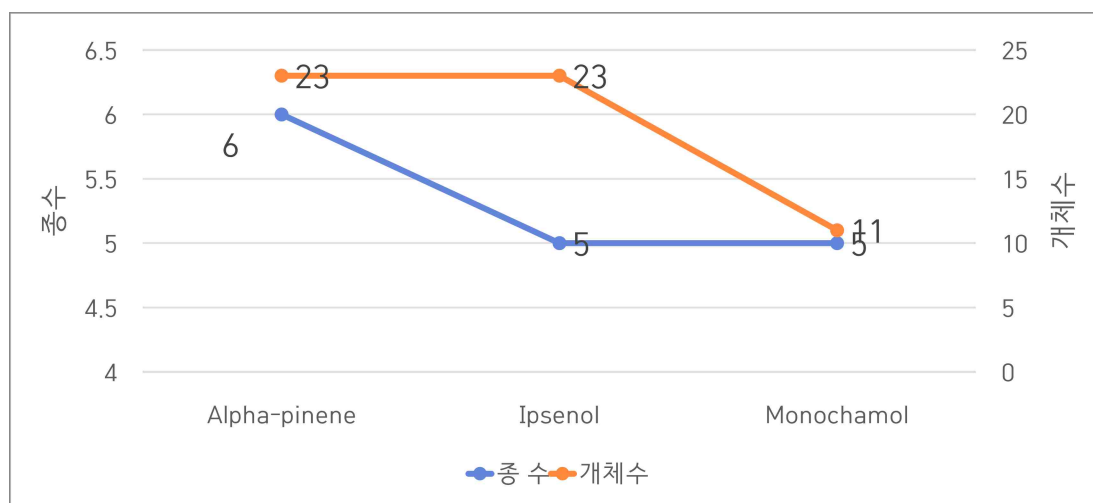


그림 40. 가리왕산 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 노린재류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩을 통해 상대적으로 차이가 많이 나는 총 18종 140개체를 확인하였다.

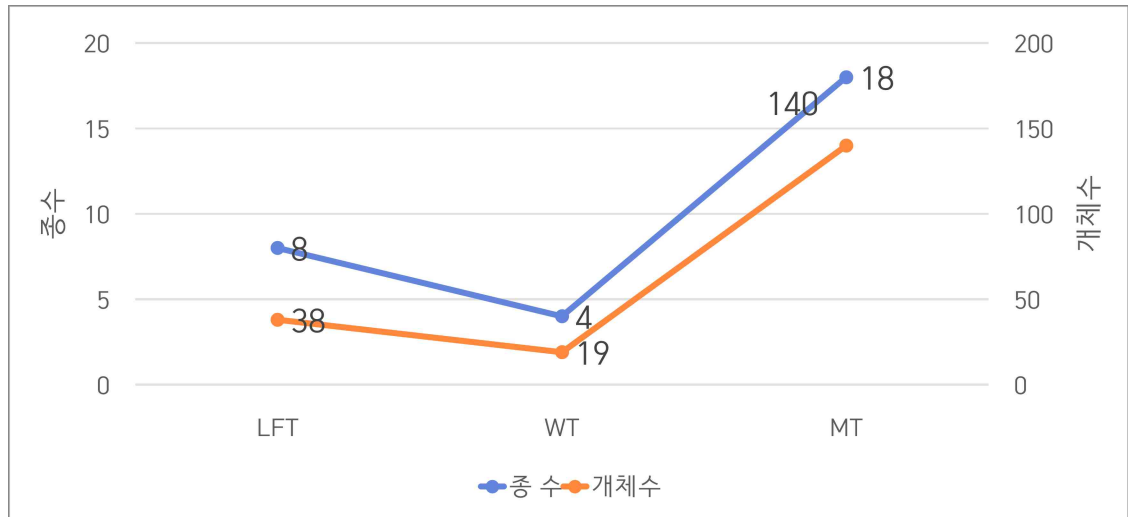


그림 41. 가리왕산 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

(나) 계방산

1) 나무좀류

총 17종 579개체가 확인되었다. 단풍나무좀이 다른 종에 비해서 우점적으로 많은 개체수가 확인되었고 단풍나무좀이 전체의 약 70%를 차지하였다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 북한나무좀(91개체), 가문비털나무좀(30개체), *Dryocoetes* sp. 2 (19개체), *Dryocoetes* sp. 4(8개체), *Dryocoetes* sp. 3 (5개체), *Dryocoetes* sp. 1(4개체), 애전나무좀(2개체), 사과둥근나무좀(2개체), 소나무검정좀붙이(1개체), 패일나무좀(1개체)이 확인되었다.

조사시기별 출현하는 나무좀류의 종과 개체수를 분석한 결과, 1차 시기('23.6.2.~6.23.)에 가장 많은 종 및 개체수(총 17종 558개체; 전체의 약 96%)가 확인되었으며 2차 시기부터('6.23.~) 종 및 개체수가 급격하게 감소하는 것으로 확인

되었고, 3차 시기('7.18.~)부터는 나무좀류가 확인이 되지 않았다. 특히, 우점종으로 확인된 단풍나무좀은 1차 시기에 가장 많은 개체가 확인되었다.

유인제별로 확인한 나무좀류를 분석한 결과, Alpha-pinene에서 확보한 종수가 Ipsenol에서 확보한 종수대비 약 2배 정도 차이가 있지만, 개체수에서는 크게 차이를 보이지 않았다. 3가지 유인제 모두 계방산에서 다양한 나무좀류의 많은 개체를 확인할 수 있는 유인제임을 확인하였다.

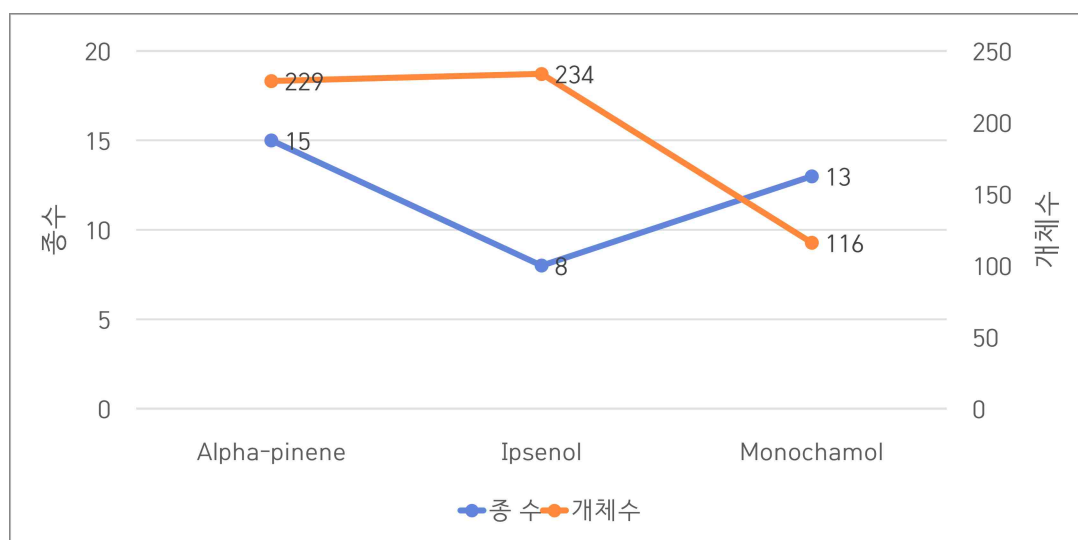


그림 42. 계방산 내 유인제별 확인된 나무좀류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 나무좀류를 분석한 결과, 윈도우 트랩으로부터 가장 다양한 14종과 가장 많은 386개체를 확인하였고, 다음으로 린드그렌 퍼넬 트랩으로부터 9종 193개체를 확인하였다. 이는 2가지 트랩에 에탄올과 유인제를 설치한 결과인 것으로 판단되며 이를 통해 2가지 트랩이 해충 밀도와 종을 파악하기에 적합한 것으로 확인되었다.

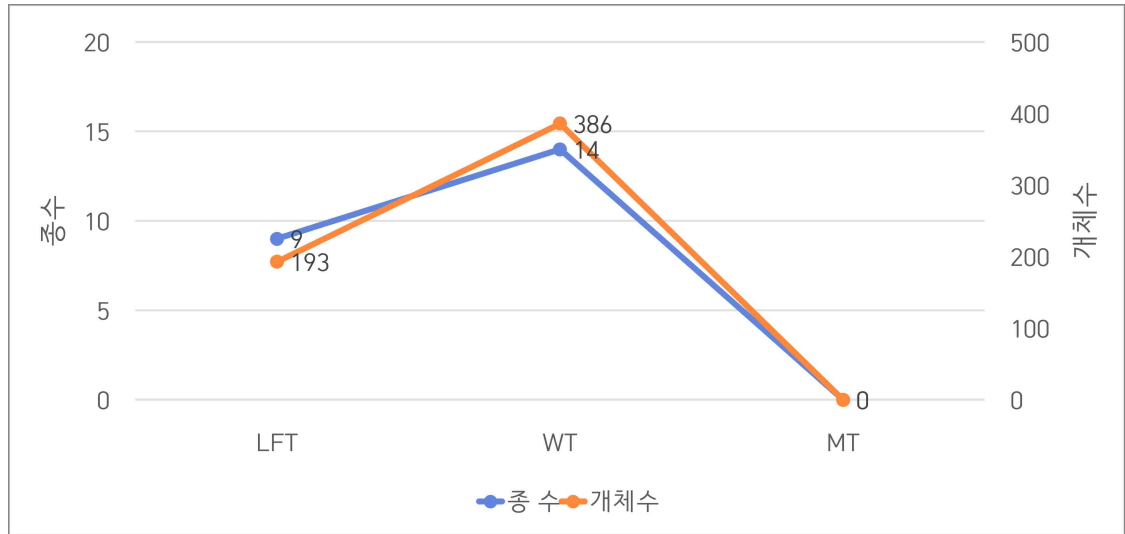


그림 43. 계방산 내 트랩별 확인된 나무좀류 종 수 및 개체수 비교

2) 하늘소류

총 13종 21개체가 확인되었다. 종 수는 상대적으로 다양하게 확인되었지만, 각 종별로 확인한 개체수면에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 별박이산하늘소(2개체), 수염하늘소(1개체), 무늬박이긴하늘소(1개체), 긴다리범하늘소(1개체), 매꽃하늘소(1개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 하늘소류의 종과 개체수를 분석한 결과, 1차 조사기간(6.2.~6.23.) 중에 가장 다양하고 많은 개체(총 12종 19개체)가 확인되었지만, 2차기간부터 종수와 개체수가 급격하게 감소하였고 3차 조사기간 이후(7.18.~10.24.)로 확인하지 못하였다.

유인제별로 확인한 하늘소류를 분석하였을 때, Alpha-pinene으로부터 가장 다양하고 많은 개체(총 7종 9개체)를 확인할 수 있었으며, 다음으로 Ipsenol, Monochamol 순으로 확인되었다.

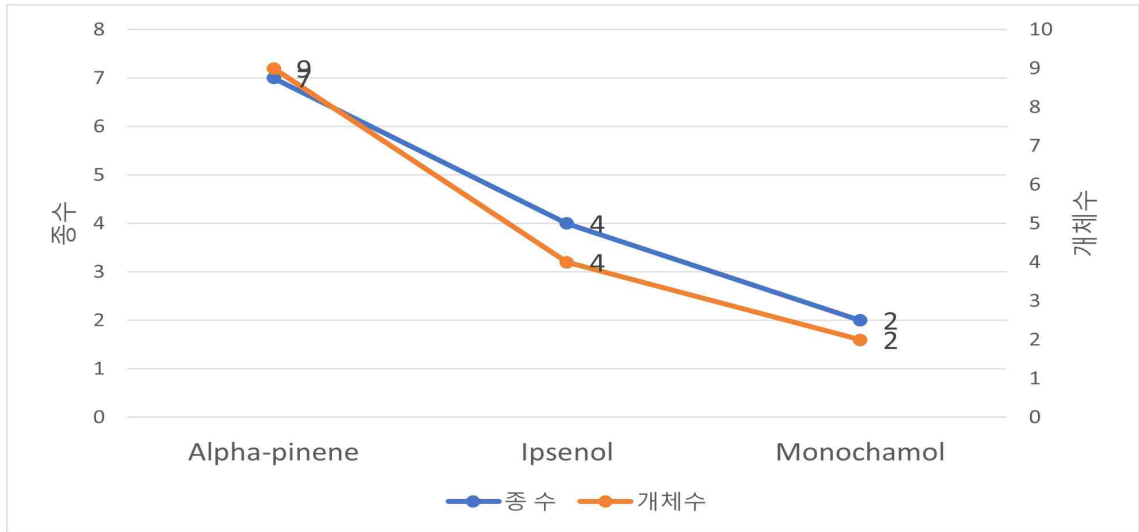


그림 44. 계방산 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 하늘소류를 분석한 결과, 다른 트랩과는 다르게 원도우 트랩에 가장 다양하고 많은 개체(총 11종 13개체)가 확인되었다.

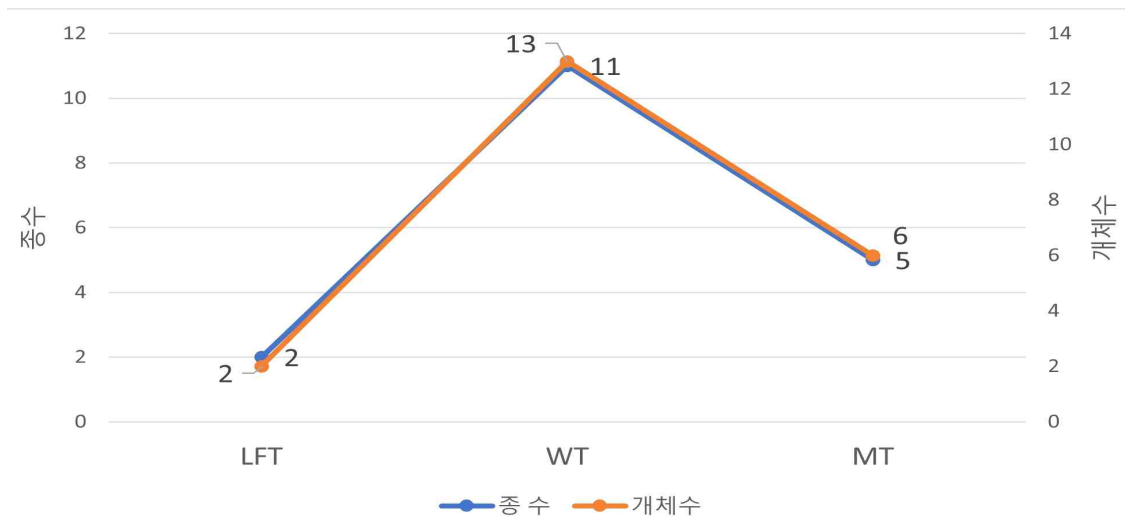


그림 45. 계방산 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

총 22종 187개체가 확인되었으며, 검정거품벌레가 총 62개체로 가장 많이 확인되었고 *Igutettix oculatus* 26개체, 검정복판거품벌레 21개체 순으로 확인되었다. 우점종으로 확인된 검정거품벌레의 약충은 기주식물 뿌리 부근에 거품을 형성하여 그 속에 은신하는 특성을 가진 종으로 알려져 있다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 검정거품벌레(62개체), 검정복판거품벌레(21개체), 가문비아매미충속(9개체), 솔거품벌레(2개체), 가문비거품벌레(1개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 노린재류의 종과 개체수를 분석한 결과, 3차 조사기간(7.18.~8.22.)에 가장 다양한 12종이 확인되었지만 4차 조사기간(8.22.~10.9.) 중에 11종과 가장 많은 82개체가 확인되어 3차~4차 조사기간 중 가장 성충 활동이 많은 것으로 판단된다.

유인제별로 확인한 노린재류를 분석하였을 때, Ipsenol과 Monochamol에서 각각 10종, 11종이 확인되어 큰 차이를 보이지 않았으며, 개체수 역시 Ipsenol 33개체, Monochamol에서 31개체로 가장 많은 개체가 확인되었다.

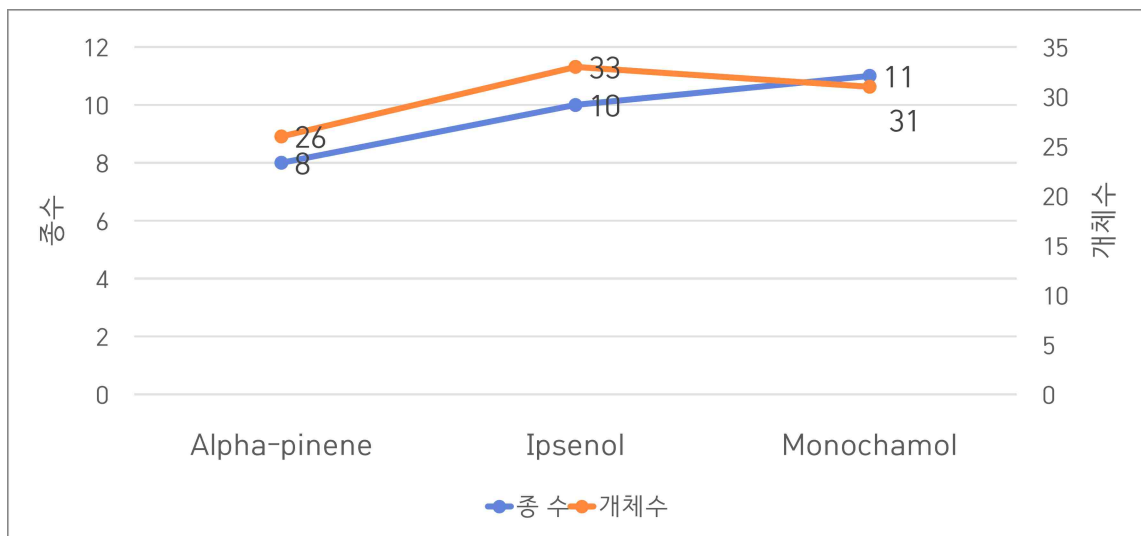


그림 46. 계방산 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 노린재류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩을 통해 가장 다양하고 많은 개체가 확인되어 총 16종 97개체가 확인되었다.

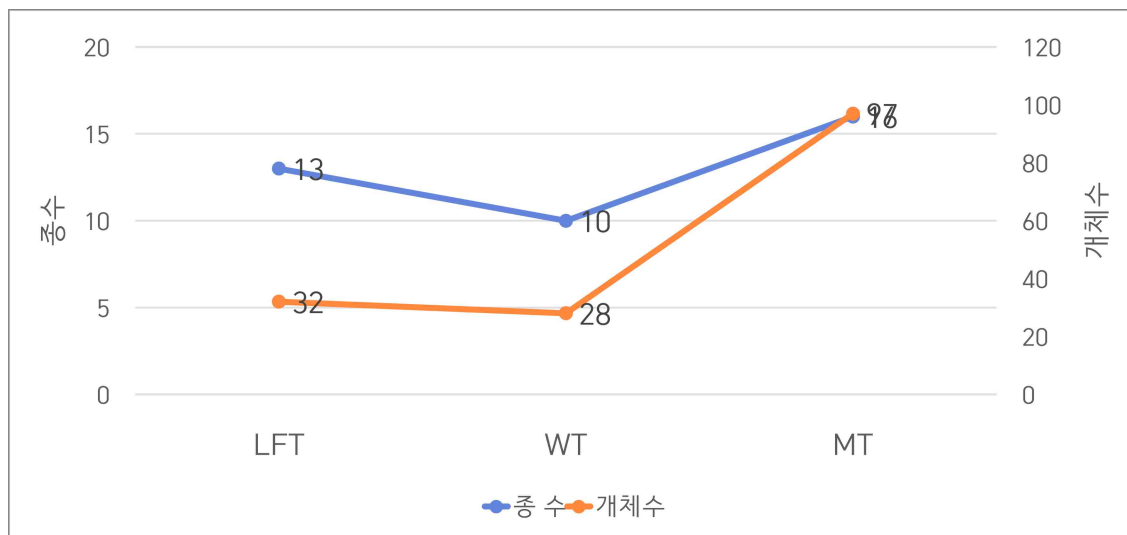


그림 47. 계방산 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

(다) 발왕산 I

1) 나무좀류

총 14종 225개체가 확인되었다. 단풍나무좀이 다른 종들과는 대조적으로 매우 많은 개체가 확인되었다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 사과둥근나무좀(18개체), 이깔여덟이발나무좀(10개체), *Dryocoetes* sp. 2 (7개체), 솔여섯가시나무좀(6개체), 북한나무좀(6개체), *Dryocoetes* sp. 1(2개체), 여섯가시나무좀(2개체), 가문비털나무좀(1개체), 소나무검정좀붙이(1개체), *Dryocoetes* sp. 2(1개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 나무좀류의 종과 개체수를 분석한 결과, 1차 시기('23.6.8.~6.22.)에 가장 많은 종 및 개체수(총 8종 187개체; 전체의 약 83%)가 확인되었으며 2차 시기부터('6.22.~) 종 및 개체수가 급격하게 감소하는 것으로 확인되

었다. 특히, 우점종으로 확인된 단풍나무좀이 1차 시기에 가장 많은 개체가 확인되었다.

유인제별로 확인한 나무좀류를 분석한 결과, Ipsenol에서 총 8종 151개체가 확인 (전체의 81%)되어 가장 많은 개체가 확인되었다. 다음으로 Alpha-pinene에서 10종 61개체, Monochamol에서 4종 11개체가 확인되었다.

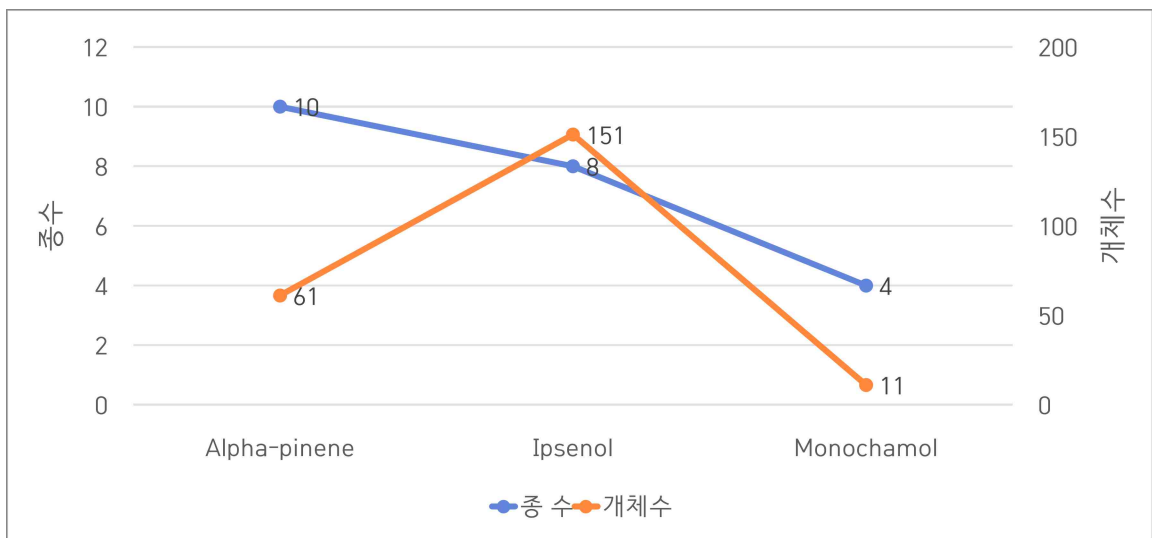


그림 50. 발왕산(I) 내 유인제별 확인된 나무좀류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 나무좀류를 분석한 결과, 린드그웬 퍼넬 트랩으로부터 가장 다양한 10종과 가장 많은 156개체를 확인하였고, 다음으로 린드그웬 퍼넬 트랩으로부터 9종 67개체를 확인하였다. 이는 2가지 트랩에 에탄올과 유인제를 설치한 결과인 것으로 판단되며 이를 통해 2가지 트랩이 해충 밀도와 종을 파악하기에 적합한 것으로 확인되었다.

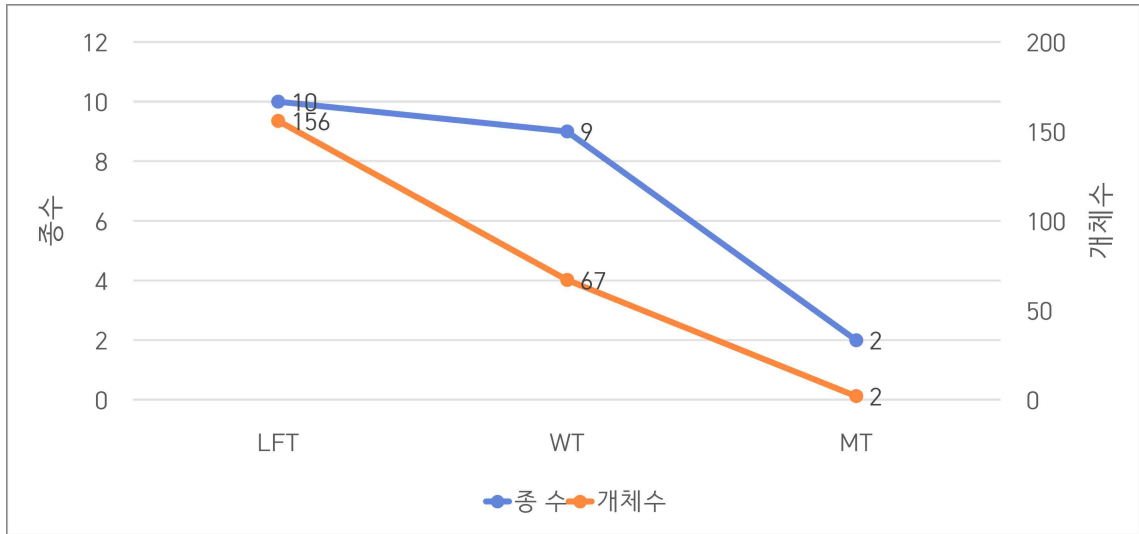


그림 49. 발왕산(I) 내 트랩별 확인된 나무좀류 종 수 및 개체수 비교

2) 하늘소류

총 19종 56개체가 확인되었다. 가장 많은 개체수가 확인된 종은 녀점각시하늘소(총 13개체)이었으며 먹당나귀하늘소(9개체), 긴다리범하늘소(7개체) 등 순으로 확인되었다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 긴다리범하늘소(7개체), 무늬박이긴하늘소(3개체), 북방수염하늘소(2개체), 수염하늘소(2개체), 꼬마수염하늘소(1개체), 별박이산하늘소(1개체), 알락수염붉은산꽃하늘소(1개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 하늘소류의 종과 개체수를 분석한 결과, 종수는 1차 조사기간(6.8.~6.22.) 중에 가장 많았으며, 개체수는 1~2차 기간(6.8.~7.17.) 중 가장 많은 개체가 확인되었다.

유인제별로 확인한 하늘소류를 분석하였을 때, Alpha-pinene과 Ipsenol이 유사한 유인효과를 보여 각 6종 6개체와 5종 6개체가 확인되었다.

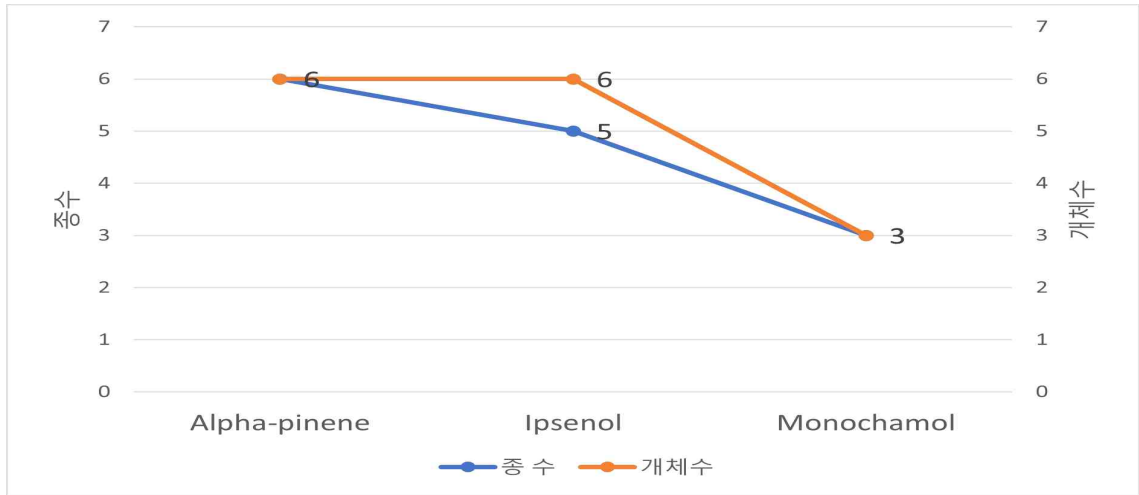


그림 50. 발왕산(I) 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 하늘소류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩을 통해서 가장 다양하고 많은 개체(12종 41개체)가 확인되었으며, 다음으로 린드그렌 퍼넬 트랩, 윈도우 트랩 순으로 종 및 개체수 다양성을 확인하였다.

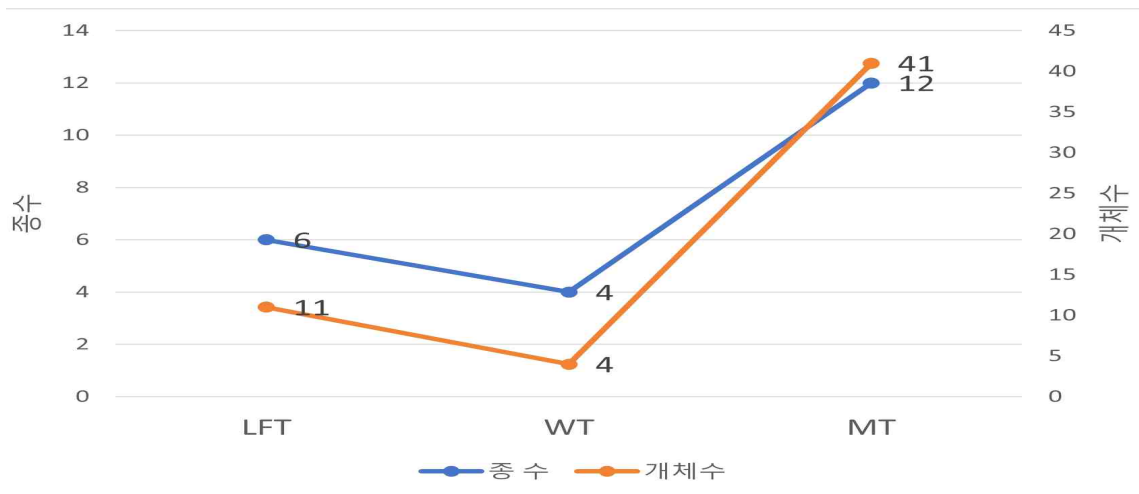


그림 51. 발왕산(I) 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

3) 노린재류

총 27종 298개체가 확인되었으며, 검정거품벌레가 다른 종에 비해서 상대적 매우 많은 개체인 141개체(전체 중 약 47%)가 확인되었다. 다음으로 *Iguttix oculatus* 32개체, 검정복판거품벌레 21개체 순으로 확인되었다. 우점종으로 확인된 검정거품벌레의 약충은 기주식물 뿌리 부근에 거품을 형성하여 그 속에 은신하는 특성을 가진 종으로 알려져 있다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 검정거품벌레(141개체), 검정복판거품벌레(21개체), 가문비아매미충속(9개체), 가문비거품벌레(!개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 노린재류의 종과 개체수를 분석한 결과, 4차 조사시기(8.21.~9.21.)에 가장 다양하고 많은 개체가 확인되어 총 10종 82개체가 확인되었다.

유인제별로 확인한 노린재류를 분석하였을 때, Alpha-pinene에서 가장 다양한 8종이 확인된 반면 개체수는 Ipsenol에서 가장 많은 78개체가 확인되었다.

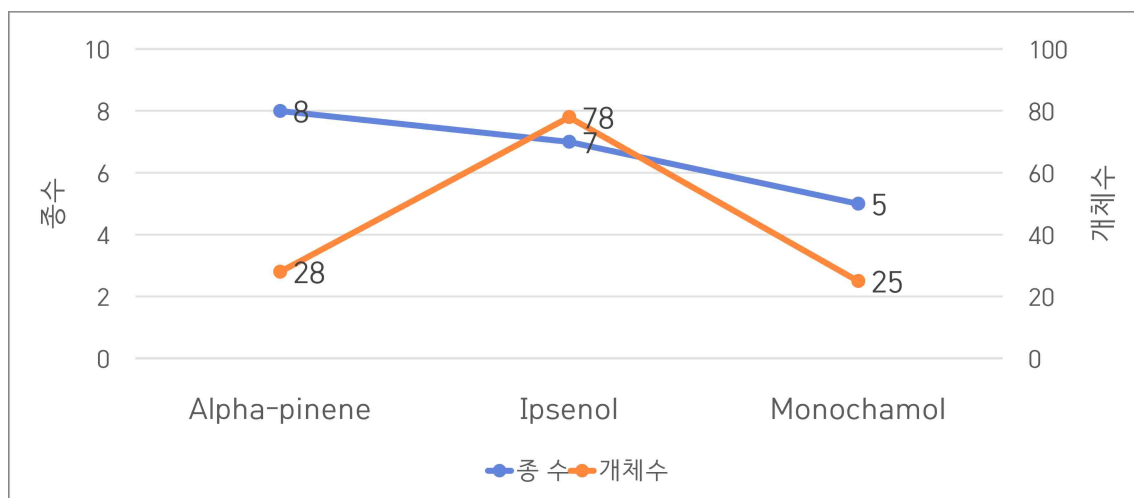


그림 52. 발왕산(I) 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 노린재류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩을 통해 가장 다양하고 많은 개체가 확인되어 총 23종 167개체가 확인되었다.

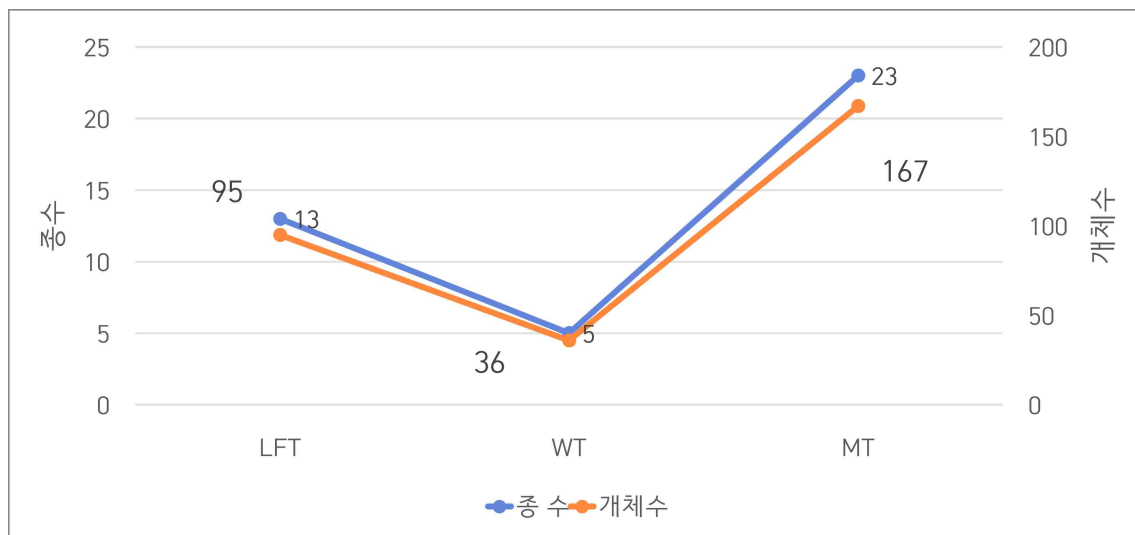


그림 53. 발왕산(I) 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

(라) 발왕산 II

1) 나무좀류

총 12종 630개체가 확인되었다. 확인된 종 중, 단풍나무좀이 전체의 93%인 총 588개체가 확인되어 우점 종임을 확인하였다. 침엽수를 기주식물로 하는 종은 총 5종 23개체 확인되었다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 *Dryocoetes* sp. 1 (8개체), 북한나무좀(8개체), 사과둥근나무좀(5개체), *Dryocoetes* sp. 2 (1개체), 이깔여덥이발나무좀(1개체)이 확인되었다.

조사시기별 출현하는 나무좀류의 종과 개체수를 분석한 결과, 1차 시기('23.5.19.~6.22.)에 가장 많은 종 및 개체수(총 11종 548개체)가 확인되었다. 본 시기에 확인한 개체수는 전체의 약 87%에 달한다.

유인제별로 확인한 나무종류를 분석한 결과, Alpha-pinene에서 다른 유인제인 Ipsenol과 Monochamol에 확인된 개체수의 2배 이상 차이가 나는 총 321개체가 확인되었다.

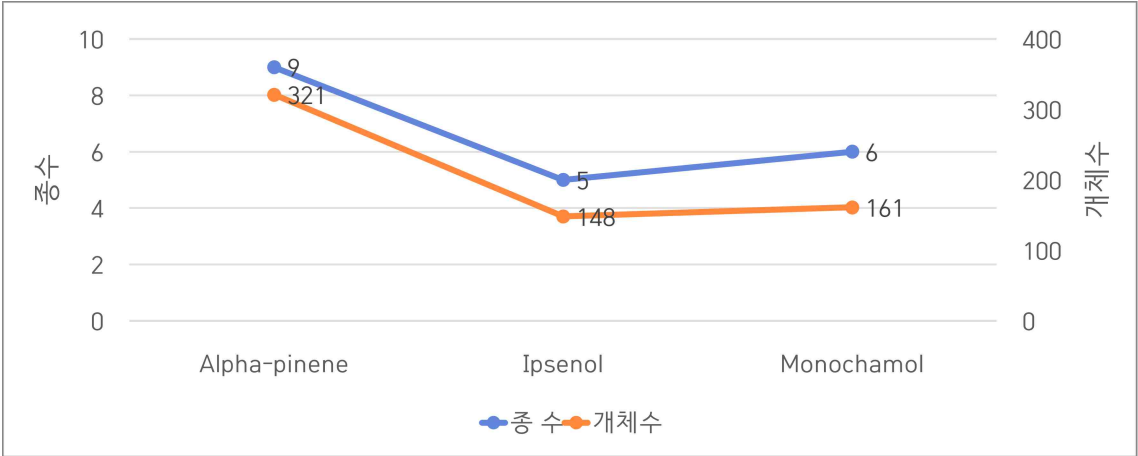


그림 54.. 발왕산(II) 내 유인제별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 나무종류를 분석한 결과, 린드그렌 퍼넬 트랩으로부터 가장 다양한 종과 많은 개체수가 확인되었다(11종 417개체). 이는 윈도우 트랩에서 확인한 개체수의 약 2배 정도임을 확인하였다.

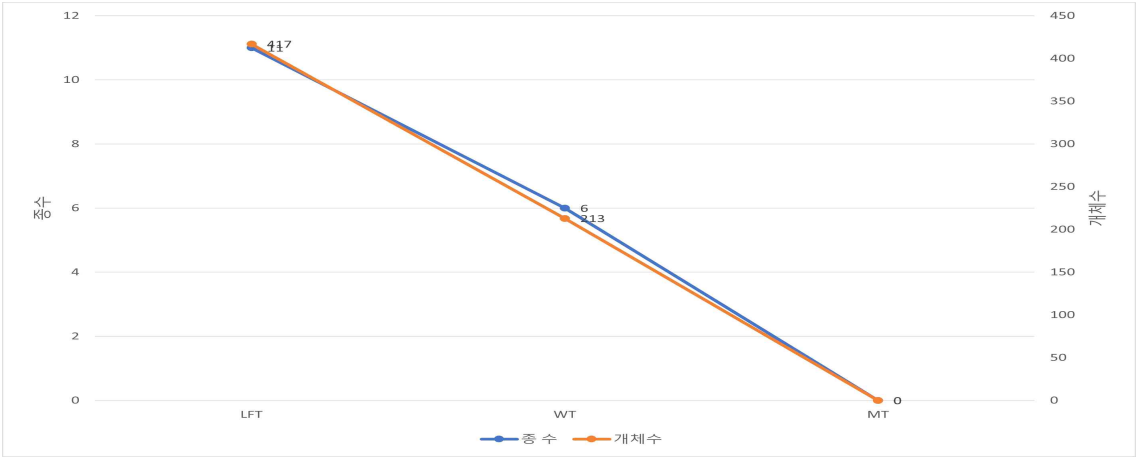


그림 55. 발왕산(II) 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교

2) 하늘소류

총 18종 43개체가 확인되었다. 녀점각시하늘소가 총 11개체로 가장 많이 확인되었으며, 다음으로 산각시하늘소, 줄각시하늘소 순으로 확인되었다. 상대적으로 다양한 종들이 확인되었지만 각 종별 개체수는 적게 조사되었다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 긴다리범하늘소(3개체), 무늬박이긴하늘소(1개체), 북방각시하늘소(1개체), 수염하늘소(1개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 하늘소류의 종과 개체수를 분석한 결과, 1차 조사기간(5.19.~6.22.) 중 가장 다양하고 많은 개체(총 11종 23개체)가 확인되었고 2차 기간부터 점차 감소, 3차기간부터 급격하게 감소하는 경향을 확인하였다.

유인제별로 확인한 하늘소류를 분석하였을 때, Alpha-pinene에서 상대적으로 다양하고 많은 개체(총 5종 6개체)가 확인되어 다른 유인제와 차이를 나타냈다.

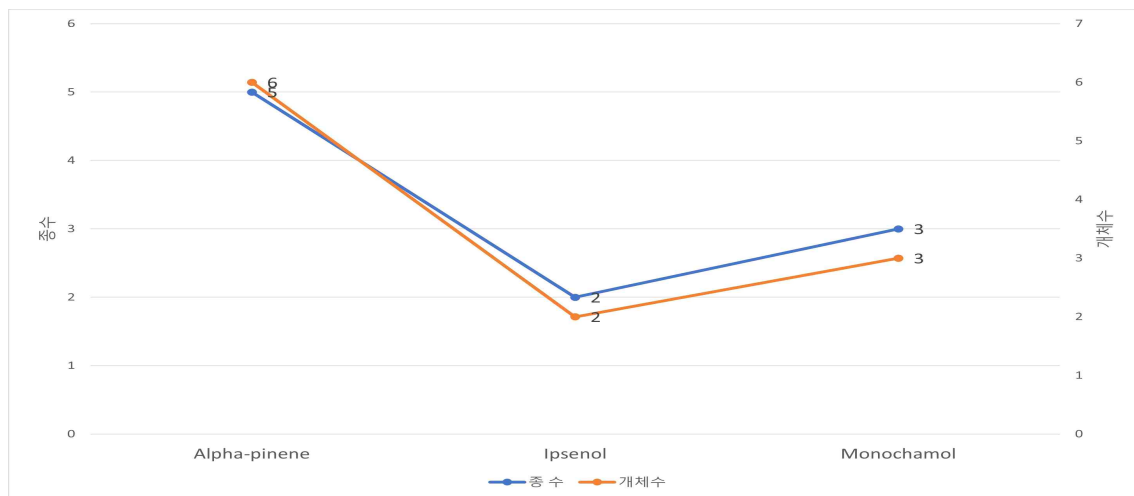


그림 56. 발왕산(II) 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 하늘소류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩에서 가장 다양하고 많은 개체(총 12종 32개체)가 확인되었으며, 다음으로 윈도우 트랩, 린드그렌 퍼널 트랩 순으로 확인되었다.

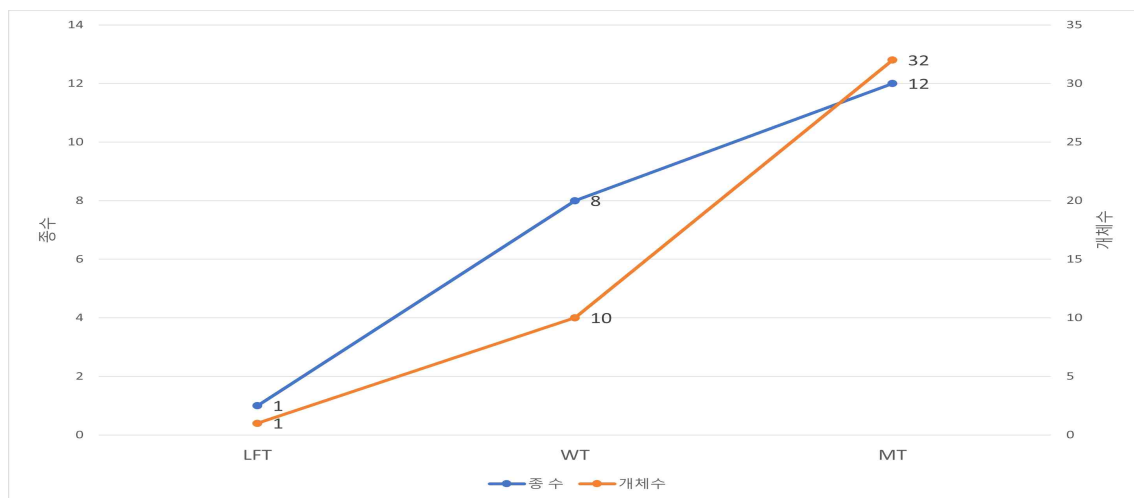


그림 57. 발왕산(II) 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

3) 노린재류

총 28종 318개체가 확인되었다. 이 중 검정거품벌레가 136개체로 전체의 약 43%에 해당하며, 다음으로 오누키양치매미충 38개체, *Igutettix oculatus* 37개체 순으로 확인되었다. 우점종으로 확인된 검정거품벌레의 약충은 기주식물 뿌리 부근에 거품을 형성하여 그 속에 은신하는 특성을 가진 종으로 알려져 있다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 검정거품벌레(136개체), 검정복판거품벌레(21개체), 가문비거품벌레(8개체), 가문비아매미충속(6개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 노린재류의 종과 개체수를 분석한 결과, 3차 조사기간('23.7.17.~8.21.) 중, 가장 다양하고 많은 개체가 확인되어 총 14종 147개체가 확인되었다.

유인제별로 확인한 노린재류를 분석하였을 때, Alpha-pinene과 Ipsenol에서 각각

6종으로 가장 많이 확인하였으며, Alpha-pinene에서 가장 많은 개체인 총 44개체를 확인하였다.

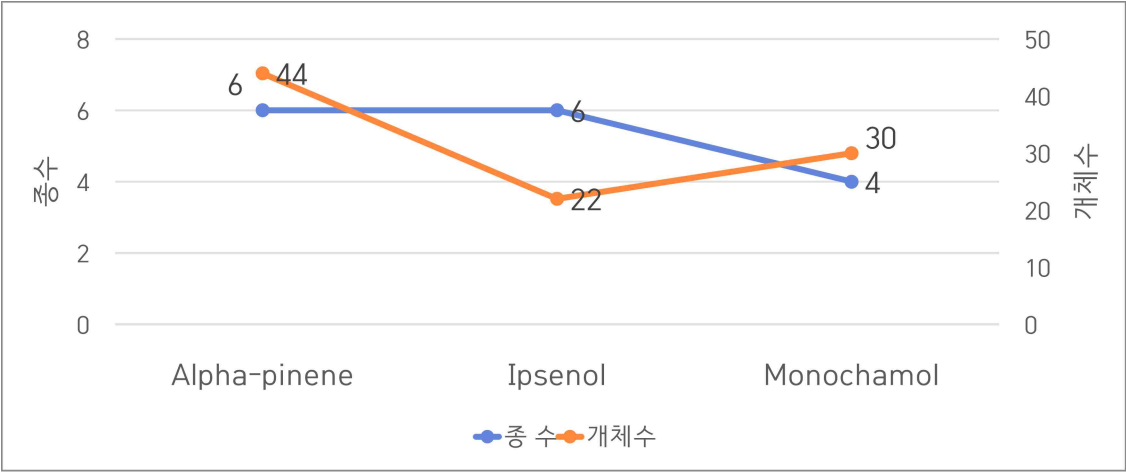


그림 58. 발왕산(II) 내 유인제별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 노린재류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩을 통하여 가장 다양하고 많은 개체인 27종 222개체를 확인하였다.

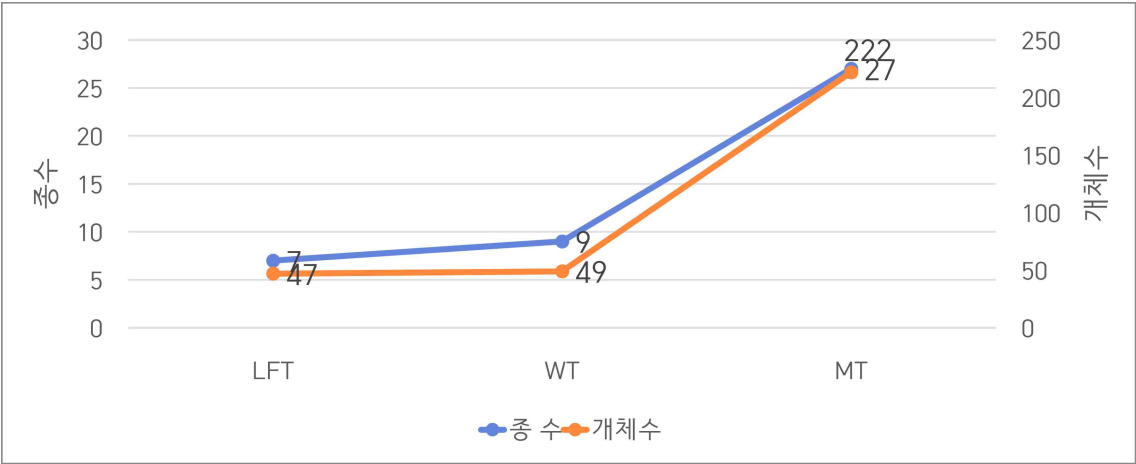


그림 59. 발왕산(II) 내 트랩별 확인된 노린재류 종 수 및 개체수 비교

(마) 장산

1) 나무좀류

총 19종 167개체가 확인되었다. 확인된 종 중, 북한나무좀이 총 93개체로 전체의 약 56%를 차지하였으며, 다음으로 단풍나무좀이 21개체 확인되었다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 북한나무좀(93개체), 세쌍니나무좀(7개체), Dryocoetes sp. 3(6개체), 이깔여덟이발나무좀(6개체), 솔여섯가시나무좀(5개체), Dryocoetes sp. 1(1개체), Dryocoetes sp. 2(1개체), 가문비털나무좀(1개체), 여섯가시나무좀(1개체), 사과둥근나무좀(1개체)이 확인되었다.

조사시기별 출현하는 나무좀류의 종과 개체수를 분석한 결과, 1차 시기('23.6.9.~6.22.)에 가장 많은 종 및 개체수(총 13종 136개체)가 확인되었으며 2차 시기부터('6.22.~) 종 및 개체수가 급격하게 감소하는 것으로 확인되었다. 특히, 우점종으로 확인된 북한나무좀 역시 1차 기간중에 87개체가 확인되어 본 시기에 성충 활동이 가장 왕성한 것으로 확인되었다.

유인제별로 확인한 나무좀류를 분석한 결과, Alpha-pinene과 Monochamol에서 11종으로 다양한 종이 확인되었고, 개체수 면에서 Monochamol에 총 76개체의 가장 많은 개체가 확인되었다.

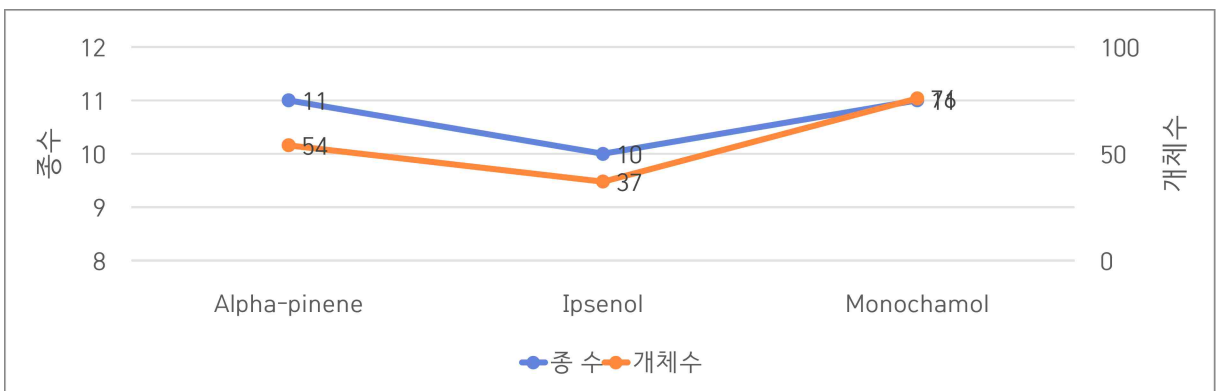


그림 60. 장산 내 유인제별 확인된 나무좀류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 나무종류를 분석한 결과, 다른 조사지에서보다는 상대적으로 개체수 확인되었고 린드그렌 퍼넬 트랩에서 14종 90개체로 가장 다양하고 많은 개체가 확인되었다.

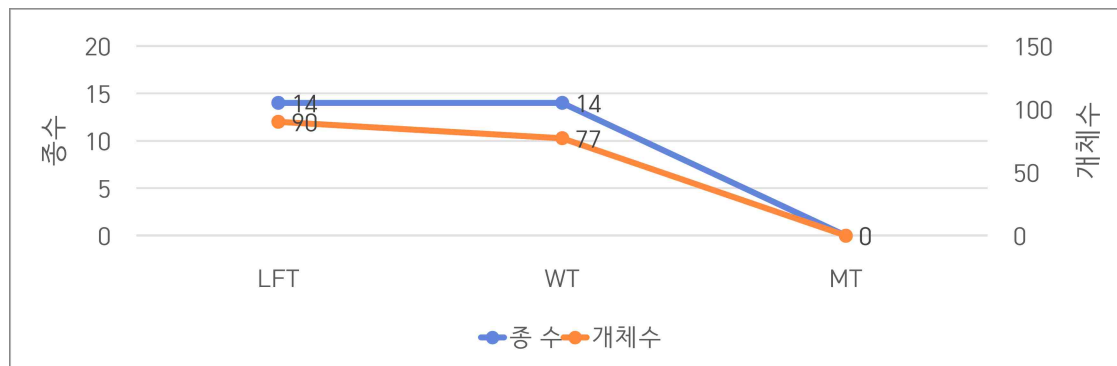


그림 61. 장산 내 트랩별 확인된 나무종류 종 수 및 개체수 비교

2) 하늘소류

총 11종 18개체가 확인되었다. 본 조사지에서는 다양한 하늘소류가 확인되었지만 각 종별로 확인된 개체수는 상대적으로 적게 확인되었다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 수염하늘소(2개체), 북방수염하늘소(2개체), 무늬박이긴하늘소(2개체), 세줄호랑하늘소(1개체), 긴다리범하늘소(1개체), 깔따구하늘소(1개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 하늘소류의 종과 개체수를 분석한 결과, 3차 조사기간(7.20.~8.21.) 중 가장 다양하고 많은 개체(6종 8개체)가 확인되었으며, 4차 조사기간부터는 확인되지 않았다.

유인제별로 확인한 하늘소류를 분석하였을 때, 각 유인제간 큰 차이를 보이지 않았으며 1~2종, 1~2개체로 상대적으로 적게 확인되었다.

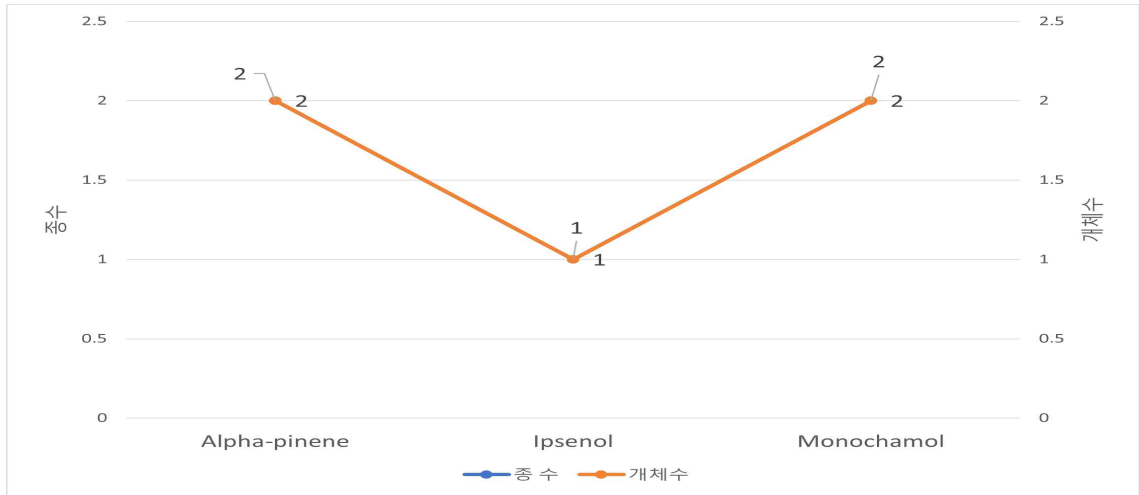


그림 62. 장산 내 유인제별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

연구에 활용한 곤충 트랩별 하늘소류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩으로부터 확인한 종, 개체수가 다른 트랩에서 확인된 종, 개체수보다 상대적으로 높게 확인되었으며 이를 통해 총 8종 13개체가 확인되었다.

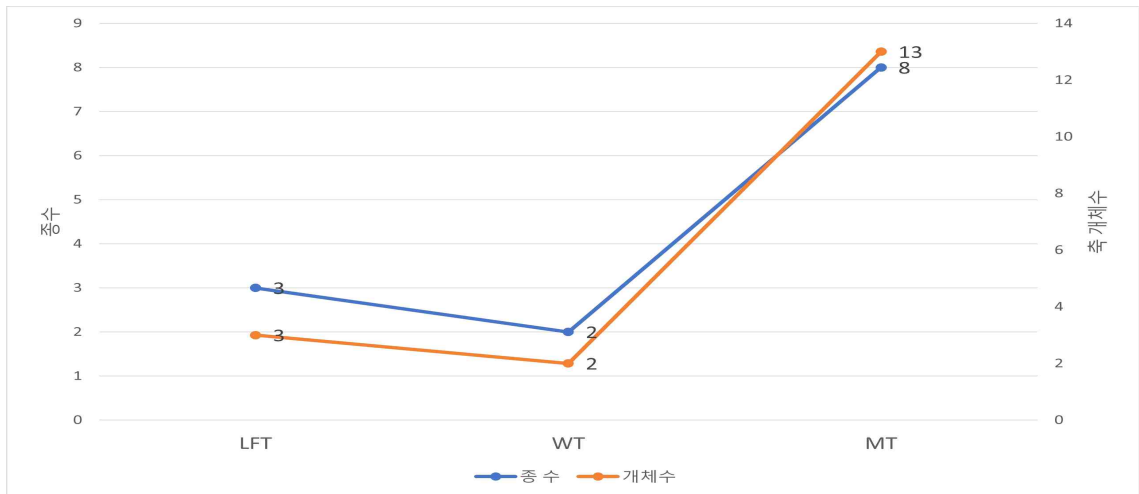


그림 63. 장산 내 트랩별 확인된 하늘소류 종 수 및 개체수 비교

3) 노린재류

총 14종 231개체를 확인하였다. 검정거품벌레가 총 144개체로 전체 중 약 62%를 차지하였으며, *Aguriahana sichotanus* 31개체, 검정복판거품벌레 28개체 순으로 확인되었다. 우점종으로 확인된 검정거품벌레의 약충은 기주식물 뿌리 부근에 거품을 형성하여 그 속에 은신하는 특성을 가진 종으로 알려져 있다. 또한, *A. sichotanus*는 국내 미기록 종으로 잣나무와 종비나무 등을 기주식물로 삼고 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 침엽수가 기주식물로 알려져 있거나 기주식물 범위가 넓어서 침엽수를 가해할 수 있는 종으로는 검정거품벌레(144개체), 검정복판거품벌레(28개체)가 확인되었다.

조사시기별 출현하는 노린재류의 종과 개체수를 분석한 결과, 2차 조사시기(6.22.~7.20.) 중 가장 다양하고 많은 개체가 확인되어 총 9종 84개체가 확인되었다.

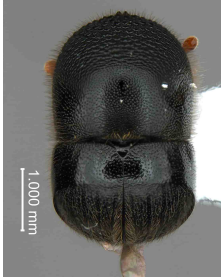
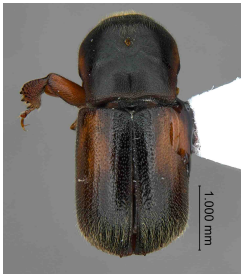
유인제별로 확인한 노린재류를 분석하였을 때, Alpha-pinene과 Ipsenol에서 각 3종이 확인되었으며, Monochamol에서 가장 많은 41개체가 확인되었다.

연구에 활용한 곤충 트랩별 노린재류를 분석한 결과, 말레이즈 트랩을 통해서 가장 다양하고 많은 개체인 총 13종 157개체가 확인되었다.

(바) 각 조사지에서 확인된 주요 산림해충 자료

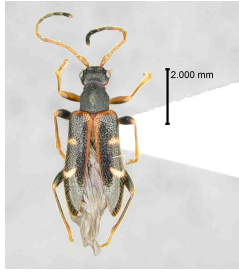
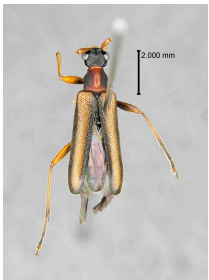
1) 나무좀류

표 16. 각 조사지에서 확인된 나무좀류

구분	왕녹나무좀	단풍나무좀	북한나무좀
표본 사진			
기주식물	매우 넓은 기주식물 범위	후박나무 등 활엽수	활엽수 및 소나무과 등
분포	한국, 중국, 일본, 대만, 호주, 북미, 동양구 등	한국, 중국, 일본, 극동러시아, 대만 등	한국, 중국, 일본, 러시아, 북미 등
구분	암브로시아나무좀	가문비털나무좀	
표본 사진			
기주식물	침엽수 및 활엽수	구주소나무, 독일가문비나무	
분포	한국 및 전 세계	한국, 일본, 극동러시아, 유럽	

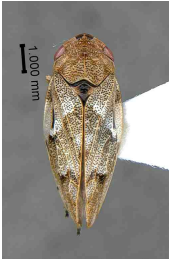
2) 하늘소류

표 17. 각 조사지에서 확인된 하늘소류

구분	세줄호랑하늘소	수염하늘소	넙점각시하늘소	산각시하늘소
표본 사진				
기주식물	느릅나무속, 전나무속, 신갈나무 등	전나무, 구상나무, 분비나무, 전나무속, 일본잎갈나무, 전나무속, 청잎갈나무, 가무비나무, 잣나무	밝혀지지 않음	밝혀지지 않음
분포	한국, 러시아, 북한, 일본, 중국	한국, 러시아, 몽골, 북한, 중국, 카자흐스탄	한국, 러시아, 몽골, 북한, 일본, 중국	한국, 러시아, 북한, 일본, 중국
구분	홍가슴각시하늘소	먹당나귀하늘소	긴다리범하늘소	줄각시하늘소
표본 사진				
기주식물	밝혀지지 않음	개굴피나무, 너도밤나무, 물참나무, 음나무, 줄참나무, 피나무	팽나무, 느티나무, 분비나무, 만주잎갈나무, 잎갈나무, 층층나무	밝혀지지 않음
분포	한국, 러시아, 북한	한국, 북한, 러시아, 중국	한국, 러시아, 몽골, 북한, 카자흐스탄	한국, 러시아, 북한, 일본, 중국

3) 노린재류

표 18. 각 조사지에서 확인된 노린재류

구분	검정거품벌레	오누키양치매미충	황백매미충
표본 사진			
기주식물	가문비나무	고사리류	사위질빵
분포	한국, 러시아, 북한, 일본, 중국	한국, 중국, 일본, 러시아(극동)	한국, 북한, 중국, 러시아
구분	A. sichotanus	I. oculatus	검정복판거품벌레
표본 사진			
기주식물	잣나무	개회나무류, 물푸레나무류	가문비나무류
분포	한국, 러시아	한국, 러시아, 일본, 유럽	한국, 러시아, 일본

4	사이트	트랩 유인제	기간	Dryocoetes sp.	Dryocoetes sp.	Dryocoetes sp.	Dryocoetes sp.	가문비벌나무	이깔여덩이발나무	애전나무	소나무검정좀벌	소나무좀나무	솔여섯가시나무	여섯가시나무	가문비가느나무	북방가문비나무	Cryphalus sp.
4	발왕산1	WT-Monochamol	1차(2023-06-22)														
7	발왕산1	LFT-Monochamol	1차(2023-06-22)														
12	발왕산1	WT-Monochamol	2차(2023-07-18)														
14	발왕산1	LFT-Monochamol	2차(2023-07-18)		1												
17	발왕산1	LFT-Monochamol	3차(2023-08-23)		1			2					1				
20	발왕산1	WT-Monochamol	3차(2023-08-23)														
24	발왕산1	LFT-Monochamol	4차(2023-10-09)					1									
27	발왕산1	WT-Monochamol	4차(2023-10-09)		1			1									
31	발왕산1	LFT-Monochamol	5차(2023-10-24)														
34	발왕산1	WT-Monochamol	5차(2023-10-24)														
38	발왕산2	WT-Monochamol	1차(2023-06-22)	1													
42	발왕산2	LFT-Monochamol	1차(2023-06-22)														
48	발왕산2	WT-Monochamol	2차(2023-07-18)	7													
49	발왕산2	LFT-Monochamol	2차(2023-07-18)														
52	발왕산2	LFT-Monochamol	3차(2023-08-23)														
55	발왕산2	WT-Monochamol	3차(2023-08-23)														
59	발왕산2	LFT-Monochamol	4차(2023-10-09)														
62	발왕산2	WT-Monochamol	4차(2023-10-09)														
66	발왕산2	LFT-Monochamol	5차(2023-10-24)														
69	발왕산2	WT-Monochamol	5차(2023-10-24)														
74	계방산	WT-Monochamol	1차(2023-06-23)			1		1									
77	계방산	LFT-Monochamol	1차(2023-06-23)		7		8				1						
80	계방산	LFT-Monochamol	2차(2023-07-18)		9												
83	계방산	WT-Monochamol	2차(2023-07-18)		1												
87	계방산	LFT-Monochamol	3차(2023-08-23)														
90	계방산	WT-Monochamol	3차(2023-08-23)														
94	계방산	LFT-Monochamol	4차(2023-10-09)														
97	계방산	WT-Monochamol	4차(2023-10-09)														
101	계방산	LFT-Monochamol	5차(2023-10-24)														
104	계방산	WT-Monochamol	5차(2023-10-24)														
109	가리왕산	WT-Monochamol	1차(2023-06-22)												1		
112	가리왕산	LFT-Monochamol	1차(2023-06-22)														
119	가리왕산	LFT-Monochamol	2차(2023-07-17)														
120	가리왕산	WT-Monochamol	2차(2023-07-17)														
122	가리왕산	LFT-Monochamol	3차(2023-08-23)														
125	가리왕산	WT-Monochamol	3차(2023-08-23)														
129	가리왕산	LFT-Monochamol	4차(2023-10-09)														
132	가리왕산	WT-Monochamol	4차(2023-10-09)														
136	가리왕산	LFT-Monochamol	5차(2023-10-24)														
139	가리왕산	WT-Monochamol	5차(2023-10-24)														

그림 64. 나무점류 분석을 위한 원자료(raw data) 화면
(조사시기별, 장소별, 트랩별, 유인제별 결과자료 포함)

조사지	트랩	유인제	조사기간	Aguriahana anufrievi (당단풍애매미충)	Aguriahana pictilis (물푸레애매미충)	Aguriahana sichotanus (국동애매미충)	Alnetoidia sp. (노랑애매미충)	Aphlaenus nigripes (검약거품벌레)	Dayus tsdakti (빨간애매미충)	Diodontophorus koreanus (우리산물애매미충)
발왕산1(문비초화)	WT	α-pinene	1차(2023-06-22)							
발왕산1(문비초화)	WT	ipnenol	1차(2023-06-22)							
발왕산1(문비초화)	WT	Monochamol	1차(2023-06-22)							
발왕산1(문비초화)	WT	ipnenol	2차(2023-07-17)							
발왕산1(문비초화)	WT	α-pinene	2차(2023-07-17)							
발왕산1(문비초화)	WT	Monochamol	2차(2023-07-17)							
발왕산1(문비초화)	WT	ipnenol	3차(2023-08-21)							
발왕산1(문비초화)	WT	Alpha-pinene	3차(2023-08-21)							
발왕산1(문비초화)	WT	Monochamol	3차(2023-08-21)							
발왕산1(문비초화)	WT	ipnenol	4차(2023-10-09)							
발왕산1(문비초화)	WT	Alpha-pinene	4차(2023-10-09)		1					
발왕산1(문비초화)	WT	Monochamol	4차(2023-10-09)							
발왕산1(문비초화)	WT	Monochamol	5차(2023-10-24)				1			
발왕산1(문비초화)	WT	ipnenol	5차(2023-10-24)							
발왕산1(문비초화)	WT	Alpha-pinene	5차(2023-10-24)							
발왕산2(주목)	WT	α-pinene	1차(2023-06-22)							
발왕산2(주목)	WT	Monochamol	1차(2023-06-22)							
발왕산2(주목)	WT	ipnenol	1차(2023-06-22)							
발왕산2(주목)	WT	α-pinene	2차(2023-07-17)							
발왕산2(주목)	WT	Monochamol	2차(2023-07-17)							
발왕산2(주목)	WT	ipnenol	2차(2023-07-17)							
발왕산2(주목)	WT	ipnenol	3차(2023-08-21)							
발왕산2(주목)	WT	Alpha-pinene	3차(2023-08-21)							
발왕산2(주목)	WT	Monochamol	3차(2023-08-21)							
발왕산2(주목)	WT	ipnenol	4차(2023-10-09)		1					
발왕산2(주목)	WT	Alpha-pinene	4차(2023-10-09)							
발왕산2(주목)	WT	Monochamol	4차(2023-10-09)							
발왕산2(주목)	WT	ipnenol	5차(2023-10-24)							
발왕산2(주목)	WT	Alpha-pinene	5차(2023-10-24)							
발왕산2(주목)	WT	Monochamol	5차(2023-10-24)							
계왕산(가문비유지)	WT	α-pinene	1차(2023-06-23)							
계왕산(가문비유지)	WT	ipnenol	1차(2023-06-23)							
계왕산(가문비유지)	WT	Monochamol	1차(2023-06-23)							
계왕산(가문비유지)	WT	ipnenol	2차(2023-07-18)							
계왕산(가문비유지)	WT	α-pinene	2차(2023-07-18)							
계왕산(가문비유지)	WT	Monochamol	2차(2023-07-18)							
계왕산(가문비유지)	WT	ipnenol	3차(2023-08-22)							
계왕산(가문비유지)	WT	Alpha-pinene	3차(2023-08-22)							
계왕산(가문비유지)	WT	Monochamol	3차(2023-08-22)	1	1					
계왕산(가문비유지)	WT	ipnenol	4차(2023-10-09)		1					
계왕산(가문비유지)	WT	Alpha-pinene	4차(2023-10-09)							
계왕산(가문비유지)	WT	Monochamol	4차(2023-10-09)		1					
계왕산(가문비유지)	WT	Monochamol	5차(2023-10-24)				1			
계왕산(가문비유지)	WT	ipnenol	5차(2023-10-24)							
계왕산(가문비유지)	WT	Alpha-pinene	5차(2023-10-24)							

그림 66. 노린재류 분석을 위한 원자료(raw data) 화면
(조사시기별, 장소별, 트랩별, 유인제별 결과자료 포함)

5. 분비나무 종자 활력 검정

가. 서론

종자의 장기저장 및 활용을 위해서는 종자 활력을 확인하는 것이 필요하다. 활력이 좋은 종자는 일반적인 종자저장 조건($-18^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$)에서 더 오래 저장이 가능하며, 재배에 이용하는 경우 일괄적으로 발아가 이루어지고, 생산량(Biomass)이 증가한다.

지금까지는 농사에 사용하는 작물종자에 한해 주로 활력 연구가 이루어져왔다. 작물종자의 경우 활력검정방법을 종별, 품종별 등으로 나눈 매뉴얼 및 국제 규약이 있으나(International Seed Testing Association), 야생식물종자 및 수목종자는 특별한 활력검정방법이 수립되어 있지 않으며, 대부분이 FAO-BI(Biodiversity international)에서 고시한 가이드라인이나 선행 연구 결과를 따라 수행되고 있다.

전세계적으로 침엽수 쇠퇴는 기온이 상승하고, 가뭄의 영향으로 일어나고 있다(IPCC, 2014). 아고산대종은 또한 지구온난화를 포함한 극심한 가뭄과 이상고온, 기후변화로 영향을 받고 있다(Kim et al., 2019).

한반도도 기후변화로 인한 지구 온난화의 영향으로 기온이 상승하면 우리나라의 남해안에 분포하고 있는 상록활엽수림의 분포는 확대되지만, 고산·아고산지대에 서식하는 식생들은 쇠퇴하거나 멸종하는 등 생태적 부작용이 발생할 수 있다(Lee and Kim, 2007; Chun et al., 2015).

보전중요성이 있는 종의 관리에서 실행되는 일반적인 관행에는 종자 수집, 저장 및 번식이 포함된다(Guerrant E.O. 2004; CBD, 2011; CPC, 2019). 종자 발아 및 저장특성에 대한 종의 특정 지식은 성공적인 현지 외 종 보전 및 복원 프로젝트에 필수적이다.

수목종자의 안전한 저장 및 활용을 위해서는 채집 종자 별 활력검정이 수행되어야 하며, 종 별 활력검정방법이 수립되어야 한다. 활력검정을 실시하는 두 가지

이유는 첫 번째, 종자 수집의 활력을 모니터링하기 위해, 두 번째로는 종자를 식물로 변화시키는 프로토콜을 개발하기 위해 실시한다. 모니터링과 프로토콜 개발을 통해 복원 대책에 대한 방향성을 제시할 수 있다.

멸종위기 침엽수 중 가문비나무는 아고산지역 대표 수종 중의 하나로 국내에서 분포하는 면적이 적어 지구온난화에 의해 크게 영향을 받을 것으로 예상되기도 한다(Yoon and Kong, 2011).

절멸되어가는 한반도 멸종위기 침엽수의 복원 및 보존에 활용하기 위한 기초자료를 위한 연구를 진행하였다. 이에 따라 멸종위기 고산지역 침엽수종인 가문비나무에 대한 보전 및 복원 대책에 따른 종자 활력을 파악하여 가문비나무의 관리와 보전대책을 수립하는 것이 필요하다.

나. 조사 및 방법

멸종위기 고산지역 침엽수종의 보전 및 복원의 재원을 마련하기 위하여 종자 활력검정을 시행함에 앞서, 시험에 필요한 종자수집을 진행하였다.

(1) 조사방법 및 기간

멸종위기 고산지역 침엽수종 결실기를 고려하여 2019-2023년 10월과 11월중순 사이 수집을 진행하였다. 채집 산지는 발왕산, 가리왕산, 방태산, 화악산, 오대산, 장산, 황병산, 함백산, 화악산, 장산 등 지역의 산지에서 수집을 수행하였다. 복원용 종자 수집을 위해 각 지역의 분비나무를 무작위로 수집하였다.

(2) 채집방법

종자 수집에 필요한 도구는 멸종위기 침엽수종의 구과형태에 따라 수집 방법을 고려하였다. 종자 채집 방법은 고지가위를 사용하거나 나무를 흔들어서 종자를 따거나, 지면에 자연적으로 떨어진 종자를 수집하거나, 사다리 및 로프를 이용하여 나

무에 직접 올라 종자를 채집하였다. 관목층 및 손에 닿는 거리에서의 수종은 손으로 훑어서 종자망에 저장하였다. 채집된 종자는 국립백두대간수목원 내 시드뱅크(Seed bank)에 저장한 후 활력검정에 필요한 종자에 대하여 실험재료로 이용하였다.

표 19. 종자수집에 필요한 물품

구분	품목	
종자수집	필수 도구	- 종자망, 굴취삽, 모종삽, 전정가위 고지가위 - 배낭 및 GPS, 야장
	보조 도구	- 종이봉투, 망원경, 확대경, 호미, 고지톱
안전물품	- 등산화, 조사복, 조끼, 장갑, 모자, 우의, 안전로프, 응급용품 등	

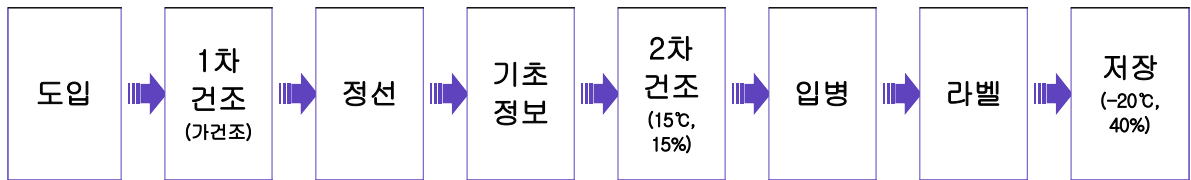


그림 67. 멸종위기 고산지역 침엽수종 종자 수집 모습

(3) 재료도입 및 보관

1) 재료도입

도입부터 정선, 검사 등의 단계를 거쳐 종자를 저장하고, 활력 검정을 통해 상태를 관리하였다. 도입번호는 당해연도 들어오는 순서대로 도입을 시키고 일차적으로 건조를 하고 아래와 같이 일련의 과정 순서대로 진행을 하였다.



- ① 도입: 저장할 종자 목록과 실물 종자를 확인하여 취득 순서대로 도입번호를 부여한다.
- ② 1차 건조: 열매에서 종자를 탈리시키기 위한 과정으로 1주~4주 동안 건조시킨다.
- ③ 정선: 열매로부터 이물질 등을 제거하여 충실한 종자만을 선별한다.
- ④ 기초정보조사: 건조상태 확인을 위해 평형상대습도를 측정하고, 종자 상태 및 총 립수 추정을 위해 천립중을 측정한다.
- ⑤ 2차 건조: 종자의 안전한 저장을 위하여 1주 정도 재건조시킨다.
- ⑥ 입병: 흡습제(실리카겔 등)와 함께 종자를 밀봉포장한다.
- ⑦ 라벨: 종자 정보, 저장 위치 등을 표기한다.
- ⑧ 저장: 사용 목적에 따라 단기저장(4℃, RH30%) 또는 장기저장(-20℃, RH40%)한다.



그림 68. 종자도입을 위한 절차

(4) 기초정보조사

기초정보조사는 천립중, 외부형태 이미지 촬영 순으로 진행하였다.

1) 천립중

천립중은 종자 1,000립의 중량을 뜻하며 종자의 무게를 나타내는 방법으로서 같은 종이라도 수집시기, 수집지역 등에 따라 달라진다. 종자의 천립중은 무게를 통한 종자 상태를 예측할 수 있으며 다른 수집점과의 비교를 위해 필요하다. 측정대상 종자의 천립중을 측정하기 위하여 정선한 종자에서 무작위로 종자를 선발하였다. 계수기 등을 이용하여 1 반복당 종자 100립씩 세어 4 반복으로 진행하였으며, 천립중의 평균값은 소수점 아래 셋째 자리까지 g으로 표시하였다.



그림 69. 천립중 측정을 위한 전자저울 사진

2) 외부형태 이미지

종자 외부 형태를 관찰하기 위하여 이미지 촬영을 실시하였다. 이미지 촬영을 위한 준비물로는 시료(종자), 실체현미경(DVM6, Leica), 핀셋, weighing-dish를 사용하였다.

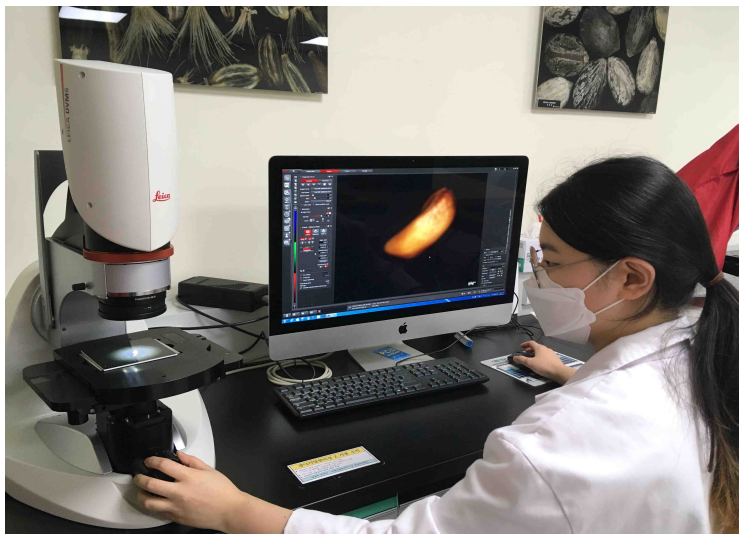


그림 70. 종자 외부형태 이미지 촬영모습

3) X-ray 검정

X-ray 검정은 견과류와 나무 종자처럼 두꺼운 종피를 가진 종자 내부 구조를 밝혀내고, 발달 미성숙 정도를 보여주는데 특히 유용하다.

내부구조적 결함, 빈 종자(empty seed), 기계적 손상과 곤충 침입 등은 종자의 활력에 영향을 미칠 수 있으며 발아능력을 손상시킬 수 있다. X-ray 검정은 직접적인 활력 검정 방법은 아니지만 종자의 활력 정도를 빠르게 파악할 수 있는 가치 있는 정보를 제공한다. X-ray 검정의 주된 원리는 종자 내 다른 조직들이 종자의 두께 또는 밀도에 따라 다양한 범위의 X선(전자기파)을 흡수한다는 것이다. 따라서 각각의 내부 구조에 따라 빛과 어둠의 가시적 이미지가 필름에 생성되고, 이미지를 해석한다. X-ray 촬영장치는 EMT-F70(Softex)를 이용하였으며, 25립씩 4반복(총 100립)으로 무작위로 추출하여 측정하였다.

$$\text{충실률(\%)} = \frac{\text{총 충실종자의 수}}{\text{총 검정종자의 수}} \times 100$$

(5) 발아검정

최소 발아검정은 25립씩 4반복으로 진행한다. 발아검정법이 미보고 된 자원은 BI(Biodiversity-International) 기준으로 발아검정 시험 실시한다.

표 20. BI 기준 발아검정 미보고 종자 발아검정 절차

- 1 단계) 증류수에 적신 발아지에 종자를 치상해서 12 시간 두었는데도 종자가 수분을 흡수하지 않았다면 칼로 종피를 파상한다. 12 시간 후 다시 확인한다. 종자가 수분을 흡수하기 시작하면 발아가 시작된다.
- 2 단계) 1단계에서 발아되지 않았다면 온대성 종자는 15-20℃, 아열대성 종자는 20-25℃로 온도를 처리한다. 원산지를 모를 경우는 15, 20, 25℃에서 온도를 처리한다. 모든 온도처리에서 광을 12시간 처리한다.
- 3 단계) 2단계에서도 발아되지 않았다면 변온을 처리한다. 온대성 종자는 25℃ 12시간/10℃ 12시간, 아열대성종자는 35℃ 12시간/20℃ 12시간 처리한다. 원산지를 모를 경우 두 가지 조건으로 다 처리해본다.
- 4 단계) 3단계에서도 발아되지 않았다면 0.1-0.2 KNO₃를 발아여과지에 넣어서 종자를 치상하고 온도는 2와 3단계의 조건을 모두 해본다.
- 5 단계) 4단계에서도 발아되지 않았다면 8주 동안 2-6℃에 저온처리 한 다음 2-4단계를 실시한다.
- 6 단계) 5단계까지도 발아되지 않았다면 테트라졸리움을 사용하여 활력을 검정한다. 이 방법은 죽은 종자인지를 판별한다. 테트라졸리움 방법에 의해서 종자가 활력이 있고 아직 휴면이 타파되지 않았다는 결과가 나오면 GA를 처리하거나 3-7일 동안 고온처리 한다.

○ 검정 순서 및 발아율 계산

- ① 데이터기록지에 종자 정보(종자번호, 과(Family), 속(Genus), 국명 등)를 입력한다.
- ② 시료(종자)를 준비한다.
- ③ 1% agar 또는 증류수를 적신 filter paper가 들어있는 petri-dish를 준비한다.
- ④ 종자를 petri-dish에 일정한 간격으로 치상한 다음, 정보를 라벨링한다.

※ 단단한 종자의 경우 종피에 상처를 내거나 벗겨서 치상한다.

- ⑤ 치상한 종자를 발아상 조건(온도, 광) 하에 둔 다음 발아조사를 수행한다.
- ⑥ 규정된 발아조사기간이 끝난 후에 발아상태를 관찰하고 발아율을 계산한다.
 ※ 유근이 2mm 이상일 경우, 정상묘로 자랄 수 있다고 보고 발아한 것으로 간주한다.
- ⑦ 발아율이 기준에 미달할 경우 발아촉진물질(GA 등)을 처리하여 다시 검정을 실시한다.

$$\text{발아율}(\%) = \frac{\text{총 발아종자의 수}}{\text{총 치상종자의 수}} \times 100$$

(6) 테트라졸리움(Tetrazolium chloride test) 검정

Tetrazolium(TZ) 검정은 함수상태에 있는 종자의 호흡 여부로 살아있는 조직과 죽은 조직을 판별하는 활력 검정 방법이다. 종자의 살아있는 세포는 호흡할 때 탈수소효소가 발생하는데 이러한 탈수소효소가 무색의 Tetrazolium 수용액(0.1~1%)과 반응하여 붉은색의 formazan으로 염색되며, 염색 부위 및 정도에 따라 종자의 활력을 판단한다. TZ 검정은 휴면에 관계없이 검정 가능하므로 깊은 휴면성을 가지고 있거나 난발아성으로 발아 검정이 어려운 경우, 신속하게 활력을 판별하는데 효과적인 방법이다. 그러나 TZ 검정은 방법이 복잡하고 종자 절단이 필요한 파괴적 방법이며, 결과를 해석하는데 많은 경험을 요구하기 때문에 발아검정이나 다른 활력검정들과 병행하여 실행할 필요가 있다. TZ용액은 KH₂PO₄, Na₂HPO₄·2H₂O를 섞은 완충용액에 1%로 2,3,5-triphenyl tetrazolium chloride를 녹인 후 용액을 제조하였다. 수량이 부족한 계방산종자(2021-006558)에 한해서 종자 10립을 테트라졸리움으로 염색한 후, 염색 정도를 디지털현미경(DVM6, Leica)으로 관찰하였다. 염색되지 않은 경우, 활력을 상실한 죽은종자로 판별하였으며, 발아는 되지 않았으나 배가 염색된 경우, 휴면상태의 종자로 추정하였다.

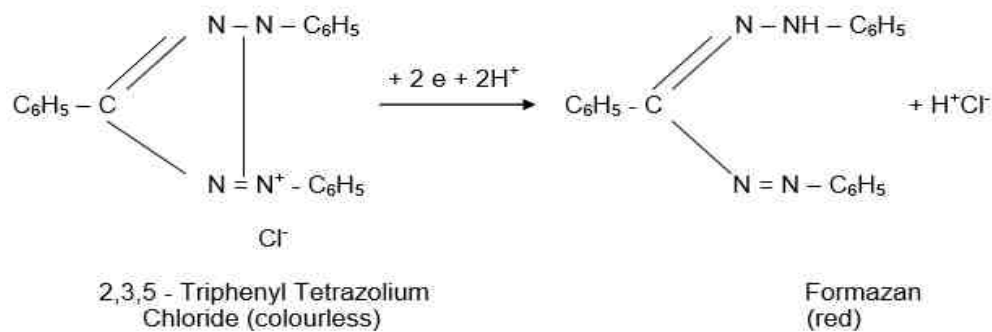


그림 72. Tetrazolium 염색 원리

(7) 활력검정 결과 기준

종자의 수집량에 따라, 종자의 수가 부족한 경우에는 발아검정 대신 테트라졸륨 검정을 통해서 활력검정을 실시하였다. 발아 및 활력을 활력판독기준에 따라 0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상은 (좋음)으로 활력을 파악하였다.

다. 연구결과

(1) 기초정보조사

1) 천립중

6지역 20점의 분비나무 종자의 천립중을 조사한 결과, 가리왕산1,2, 화악산2, 장산, 황병산 지역의 종자는 10g 이상의 천립중을 확인하였다. 그중 사리왕산1(2021년)의 천립중이 $12.925 \pm 0.767\text{g}$ 으로 가장 높게 확인되었다. 화악산(2020년)는 3.652g로 가장 낮은 천립중이 확인되었다. 분비나무의 종자는 지역별, 점별로 큰 차이가 나는 것을 확인하였다.

2) 외부형태이미지

분비종자의 외부형태를 관찰한 결과, 날개를 달고 있으며, 갈색을 띄고 있었다.

날개를 제외한 종자는 약 4mm 크기의 종자로 확인되었다.

표 21. 분비나무 종자의 수집지별 천립중

수집년도	채집지	천립중(g)
2020	가리왕산	4.891
	화악산	3.652
2021	오대산	8.353 ± 0.107
	가리왕산1	12.925 ± 0.767
	가리왕산2	11.542 ± 0.146
	가리왕산3	9.377 ± 0.061
	가리왕산4	7.874 ± 2.496
	발왕산	9.499 ± 0.223
	장산	7.425 ± 0.129
	황병산	9.035 ± 0.189
	발왕산	9.068 ± 0.155
2023	화악산1	4.677±0.130
	화악산2	10.115±0.244
	화악산3	6.046±0.253
	화악산4	7.415±0.419
	장산1	7.428±0.051
	장산2	8.274±±0.075
	장산3	13.088±0.211
	장산4	7.383±0.136
	황병산	11.155±0.367

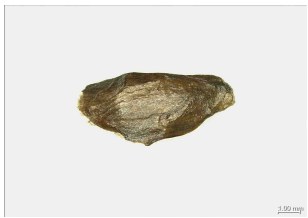
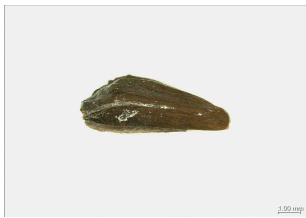
3) X-ray

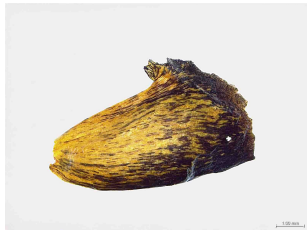
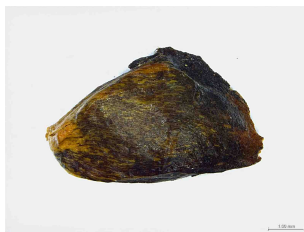
X-ray를 통하여 충실율을 확인한 결과, 자생지별로 충실율에서 많은 차이를 보였다. 발왕산(2019년), 함백산2(2022년), 같은 자생지에서도 개체별로 종자의 충실율 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 분비나무 종자의 종피는 광택이 있어 X-ray를 통하여 충실율을 파악하기에는 어려움이 있었다.

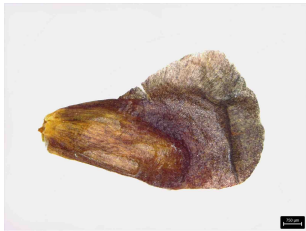
표 22. 분비나무 종자의 수집지별 충실율

수집년도	수집지	충실율(%)
2019	발왕산	100.0±0.0
	가리왕산	90.0±3.5
	방태산	96.0±1.6
2020	가리왕산	20.0±1.08
	화악산	12.0±0.91
2021	오대산	90.0±2.6
	가리왕산1	92.0±1.6
	가리왕산2	45.0±3.4
	가리왕산3	90.0±4.3
	가리왕산4	87.0±4.4
	발왕산	35.0±4.4
	장산1	91.0±4.1
	황병산	91.0±1.9
	발왕산	51.0±8.1
2022	함백산1	55.0±7.7
	함백산2	100.0±0.0
	함백산3	43.0±1.9
	함백산4	45.0±7.5
	함백산5	100.0±0.0
	함백산6	15.0±3.0
	함백산7	36.6±1.6
	설악산(귀때기청)	43.0±10.1
2023	화악산1	0.0±0.0
	화악산2	0.0±0.0
	화악산3	7.5±2.5
	화악산4	0.0±0.0
	장산1	12.50±4.79
	장산2	0.0±0.0
	장산3	0.0±0.0
	장산4	0.0±0.0
	황병산	2.5±2.5

표 23. 분비나무 종자의 수집지별 형태 이미지

수집연도	수집지	종자 형태 이미지	채집지	종자 형태 이미지
2019	발왕산		가리왕산	
	방태산			
2020	가리왕산		화악산	
2021	오대산		가리왕산1	
	가리왕산 2		가리왕산3	
	가리왕산 4		발왕산	

2021	장산		황병산	
	발왕산			
2022	함백산		함백산	
	함백산		함백산	
	함백산		함백산	
	설악산 귀때기청			

2023	화악산1		화악산2	
	화악산3		화악산4	
	장산1		장산2	
	장산3		장산4	
	황병산			

4) 발아검정

2019년도 분비나무의 최적 발아온도를 확인하기 위해 15, 20, 25℃의 온도조건에서 발아검정을 실시하였다. 발아율을 확인한 결과, 분비나무는 20~25℃의 온도조건에서 발아율이 높은 것으로 확인하였다. 이에 따라 2019년 이후의 분비나무 종자는 20~25℃의 조건에서 발아검정을 진행하였다.

5) 활력검정

수집연도에 따라 산지별로 활력검정 비교를 실시하였다.

표 24. 분비나무의 화악산지역의 종자 활력검정

수집연도	수집지	충실율	온도조건	발아율	활력율	활력판독
2020	화악산	12.0±0.9	TZ대 체	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
2023	화악산1	0.0±0.0	TZ대 체	-	0.0±0.0	나쁨
	화악산2	0.0±0.0	TZ대 체	-	0.0±0.0	나쁨
	화악산3	7.5±2.5	TZ대 체	-	7.5±2.5	나쁨
	화악산4	0.0±0.0	TZ대 체	-	0.0±0.0	나쁨

* 활력판독기준 : 0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상 (좋음)

분비나무는 화악산지역에서 2020년도 1점, 2023년도 4점의 종자로 활력검정을 실시하였다. 2020년도 종자는 충실율이 12.0±0.9%로 확인되었지만, TZ검정을 통해 활력이 없는 것으로 확인되었다. 2023년도 종자는 4점 모두 충실율이 10% 미만으로 비립종자가 많았으며, 활력도 없는 것으로 판단되었다. 화악산 종자의 경우는 종자가 대다수 비립으로 확인되었으며, 활력판독 결과는 모두 나쁨으로 확인되었다.

표 25. 분비나무의 황병산지역의 종자 활력검정

수집연도	수집지	충실율	온도조건	발아율	활력율	활력판독
2021	황병산	91.0±1.9	TZ대체	-	60	보통
2023	황병산	2.5±2.5	TZ대체	-	2.5±2.5	나쁨

*활력판독기준 :0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상 (좋음)

분비나무는 황병산지역에서 2021년 1점, 2023년 1점의 종자로 활력검정을 실시하였다. 2021년도 종자는 충실율이 91.0±1.9%로 확인되었으며, 활력은 60%로 활력판독결과 보통으로 확인되었다. 2023년도 종자는 충실율이 2.5±2.5 %로 낮게 확인되었으며, 활력판독 결과 나쁨으로 확인되었다.

표 26. 분비나무의 장산지역의 종자 활력검정

수집연도	수집지	충실율	온도조건	발아율	활력율	활력판독
2021	장산	91.0±4.1	TZ대체	TZ대체	100	좋음
2023	장산1	12.5±4.8	TZ대체	TZ대체	12.5±4.8	나쁨
	장산2	0.0±0.0	TZ대체	TZ대체	0.0±0.0	나쁨
	장산3	0.0±0.0	TZ대체	TZ대체	0.0±0.0	나쁨
	장산4	0.0±0.0	TZ대체	TZ대체	0.0±0.0	나쁨

*활력판독기준 :0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상 (좋음)

분비나무는 장산지역에서 2021년 1점, 2023년 4점의 종자로 활력검정을 실시하였다. 2021년도 종자는 충실율이 91.0±1.9%로 확인되었으며, 활력율은 100%로 활력판독결과 좋음으로 확인되었다. 2023년도 종자는 4점 중 1점이 12.5±4.8%로 확인되었으며, 나머지 3점은 0%로 확인되었다. 또한 충실율 또한 유사하게 확인되었다. 활력판독 결과, 4점의 종자 모두 나쁨으로 확인되었다.

표 27. 분비나무의 발왕산지역의 종자 활력검정

수집연도	수집지	충실율	온도조건	발아율	활력율	활력판독
2019	발왕산	100	20	52.5±16.0		보통
2021	발왕산1	35.0±4.4	TZ대체	-	40	보통
	발왕산2	51.0±8.1	TZ대체	-	30	보통

*활력판독기준 :0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상 (좋음)

분비나무는 발왕산지역에서 2019년 1점, 2021년 2점의 종자로 활력검정을 실시하였다. 2021년도 종자는 충실율이 100%로 확인되었으며, 발아율은 52.5±16.0%로 활력판독결과 보통으로 확인되었다. 2021년도 2점 종자의 충실율은 각각 35.0±4.4, 51.0±8.1%로 확인되었으며, 활력율은 40, 30%로 보통의 활력으로 확인되었다.

표 28. 분비나무의 가리왕산지역의 종자 활력검정

수집연도	수집지	충실율	온도조건	발아율	활력율	활력판독
2019	가리왕산	90.0±3.5	20	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
2020	가리왕산	20.0±1.1	20	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
2021	가리왕산1	92.0±1.6	TZ대체		80	좋음
	가리왕산2	45.0±3.4	TZ대체		50	보통
	가리왕산3	90.0±4.3	TZ대체		70	보통
	가리왕산4	87.0±4.4	TZ대체		70	보통

*활력판독기준 :0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상 (좋음)

분비나무는 가리왕산지역에서 2019년 1점, 2020년 1점, 2021년 4점의 종자로 활력검정을 실시하였다. 2019년도 종자는 충실율이 90.0±3.5%로 확인되었으며, 발아율은 0%로 활력판독결과 나쁨으로 확인되었다. 2020년도 수집된 종자의 충실율은 20.0±1.1%로 확인되었으며, 활력율은 0%로 활력판독결과 나쁨으로 확인되었다.

2021년도 4점 종자의 충실율은 1점을 제외하고는 80%이상의 높은 충실율을 확인하였다. 활력율은 50~80%로 확인되었으며, 가리왕산1은 활력의 좋음으로 나타났으며, 나머지 3점은 보통으로 판독되었다.

표 29. 분비나무의 함백산지역의 종자 활력검정

수집연도	수집지	온도조건	발아율	활력율	활력판독
2022	함백산1	20	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
	함백산2	20	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
	함백산3	20	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
	함백산4	20	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
	함백산5	20	3.0±1.0	3.0±1.0	나쁨
	함백산6	20	0.0±0.0	0.0±0.0	나쁨
	함백산7	20	2.0±1.15	2.0±1.15	나쁨

*활력판독기준 :0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상 (좋음)

분비나무는 함백산지역에서 2022년 7점의 종자로 활력검정을 실시하였다. 종자는 발아율과 활력율 모두 5% 미만으로 낮게되었다. 활력판독 결과, 7점 모두 낮음으로 확인되었다.

표 30. 분비나무의 채집지별종자 활력검정

수집연도	수집지	온도조건	발아율	활력율	활력판독
2019	방태산	15	12.5±2.5	13.1 ± 2.9	나쁨
		20	10.0±4.1	10.3 ± 4.3	
		25	15.0±8.7	16.0 ± 9.5	
2021	오대산	TZ대체	-	70	보통
2022	설악산 (귀뚜기청)	20	5.0±3.0	5.0±3.0	나쁨

*활력판독기준 :0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상 (좋음)

2019년 수집된 방태산 종자는 모두 활력율이 16%이하로 활력판독결과 나쁨으로 확인되었다. 2021년 수집된 오대산 종자는 활력율이 70%로 보통의 활력으로 판독되었다. 2022년 수집된 설악산종자는 5%대의 발아율 및 활력율로 확인되었으며, 활력판독은 나쁨으로 확인되었다.

라. 고찰

총 6지역, 20점의 분비나무 종자 활력을 확인하기 위하여 X-ray, 발아검정, TZ검정의 검사를 진행하였다. 발아 및 활력을 활력판독기준에 따라 0~30%미만(나쁨), 30~80%미만 (보통), 80%이상은 (좋음)으로 활력을 판별하였다. 분비나무의 충실을 화악산의 분비나무는 2020년, 2023년도 수집된 종자 모두 활력판독 결과, 10% 미만의 활력으로 나쁨으로 확인되었다. 황병산의 분비나무는 2021년도 종자는 활력이 60%로 보통으로 확인되었으며, 2023년도 종자는 2.5%의 활력으로 나쁨으로 확인되었다. 장산의 분비나무 종자는 2021년도 활력이 100%로 좋음으로 확인되었으며, 2023년도 종자는 활력이 거의없는 나쁨으로 확인되었다. 발왕산 분비나무 종자는 2019년, 2021년 종자 모두 보통의 활력으로 확인되었다. 가리왕산 종자의 경우 2019년, 2020년도에는 활력이 0%로 나쁨으로 확인되었으며, 2021년도에는 4점 중 1점이 좋음, 3점이 보통으로 확인되었다. 함백산 분비나무 종자의 경우 2022년 수집된 종자의 활력은 모두 나쁨으로 활력이 확인되었다. 여러 산지 중 대부분이 연도별 활력이 좋지 않음을 유지하였다. 발왕산 지역이 보통의 활력을 유지하였으며, 가리왕산의 경우 활력이 연도별로 나쁨→좋음→보통으로 확인이 되었다. 결과적으로 분비나무의 활력은 지역별·개체별로 차이를 보였다.

분비나무 종자의 경우 X-ray, TZ검정을 통해 얻어진 활력을 통해 정확한 충실을 파악에는 어려움이 있었다. 이는 분비나무의 종피가 광택이 있어 X선을 반사시키기 때문이라 판단된다. 분비나무의 비파괴방법을 통한 충실율을 파악하기 위해서는 X-ray 기기가 아닌 다양한 광과장을 이용하는 시드스캐너 등 다른 방법

이 필요하다.

기후변화나 여러 가지 환경요인으로 대부분의 분비나무 종자의 활력은 저하하고 있는 추세다. 하지만 활력이 좋더라도 높은 고지대에서 유묘가 성묘로 성장하기까지에는 많은 어려움이 있다. 이러한 멸종위기에 처해있는 침엽수를 보전하기 위해서는 현지내·외 보전이 체계적으로 이루어져야 한다. 멸종위기 침엽수 분비나무의 보전 및 복원 대책을 위해서는 종자를 통한 복원과 복원 이후의 자생지와 같은 환경에서도 자랄 수 있는 생육 환경 조건에 대한 연구도 필요할 것이라 판단된다.

6. 분비나무숲의 나이테 분석과 성장량

가. 서론

연륜연대학이란 나무의 나이테와 이에 영향을 미치는 다양한 환경정보를 이용하여 상호관계를 밝히는 학문이다. 나무의 나이테를 통하여 다양한 임업적 연구가 가능하다. 우리나라와 같이 사계절이 뚜렷한 지역의 나무는 대부분 1년에 하나의 연륜을 형성하고 연륜과 연륜사이의 연륜폭은 성장량과 나무의 나이를 아는데 용이하며, 또한 세포크기 및 세포벽 두께와 같은 해부학적 특성을 분석할 수도 있다. 특히, 연륜은 측정이 다른 분서보다 용이하며 성장량을 나타내는 요소이기도 하고 이를 통하여 다양한 환경정보와의 관계를 확인할 수 있다.

아고산대 침엽수종에 대한 연륜분석은 주로 구상나무의 선행연구가 많이 이루어졌는데 연륜폭과 환경간의 상관관계를 분석한 결과 겨울철의 기온상승, 봄철가뭄, 그리고 태풍이 주된 원인으로 밝혀져 왔다.

분비나무(*Abies nephrolepis*)는 주로 해발고도 700~2,540m에 생육하는 아한대의 표징종으로서 IUCN 약관심종(LC)으로 등재되어 있으며 세계적으로 한국, 만주, 시베리아에 분포한다(Zhang et al., 2013). 아고산대는 바람이 강하고, 기온은 낮으며 적설량도 불규칙하는 등 여러 기상요소의 편차가 심하여 식물이 살아가기에 척박한 환경이다(Park et al., 2015). 이러한 아고산지대에 생육하는 분비나무는 기후변화가 가속화되는 시점에 생육과 존속에 어려움을 직면하여 쇠퇴 및 집단고사 현상이 관찰되고 있다(Chun et al., 2019; Kim et al., 2021; Park et al., 2022). 분비나무와 관련된 연구로는 기후변화 민감성 평가에 관한 연구(Park et al., 2015; Lee et al., 2023), 식물의 군집구조 및 동태에 관한 연구(Chun et al., 2019; Park et al., 2020; Lee et al., 2021; Park et al., 2021; Park et al., 2022; Cheon et al., 2022; Shin et al., 2022) 등이 있다.

나. 연구방법

(1) 목편채취

분비나무의 연년생장량과 관계를 살펴보기 위하여 총 8지역 일월산, 가리왕산, 장산, 대암산, 발왕산, 청옥산, 화악산, 향로봉에서 분비나무 66개, 활엽수 47개 총 113개의 목편을 추출하였다. 목편은 흉고높이에서 추출하였으며, 추출 후 천공된 부위에는 수목도포제로 도포하였다. 추출된 목편은 연륜을 관찰자가 확인하는데 용이하게 하기 위하여 코어마운트에 고정시켜 접착시킨 후 2주간 음지에 건조시켰다. 음지에 건조된 목편은 단면을 연마 후 연륜분석프로그램인 Windendro를 이용하여 연륜을 분석하였으며 크로스데이팅 작업을 진행하였다.

표 31. 분비나무 연륜시료 목록

NO	산지명	수종	흉고직경	구분	비고
1	일월산	분비	18.5	실험군	
2	일월산	분비	19.1	실험군	
3	일월산	분비	19.5	실험군	
4	일월산	분비	25.1	실험군	
5	일월산	분비	14.0	실험군	
6	일월산	분비	9.1	실험군	
7	일월산	분비	23.9	실험군	
8	일월산	분비	13.8	실험군	
9	일월산	분비	15.3	실험군	
10	일월산	분비	11.4	실험군	
11	일월산	신갈	18.7	대조구	
12	일월산	신갈	18.5	대조구	
13	일월산	신갈	17.3	대조구	
14	일월산	신갈	12.5	대조구	
15	일월산	신갈	24.1	대조구	
16	일월산	신갈	19.9	대조구	
17	일월산	신갈	21.5	대조구	
18	일월산	신갈	15.5	대조구	
19	일월산	신갈	19.2	대조구	

NO	산지명	수종	흉고직경	구분	비고
20	일월산	신갈	24.5	대조구	
21	가리왕산	분비	25.5	실험군	
22	가리왕산	분비	40.6	실험군	
23	가리왕산	분비	20.9	실험군	
24	가리왕산	분비	32.0	실험군	
25	가리왕산	분비	16.7	실험군	
26	가리왕산	분비	32.0	실험군	
27	가리왕산	분비	13.1	실험군	
28	가리왕산	분비	10.7	실험군	
29	가리왕산	분비	40.3	실험군	
30	가리왕산	분비	22.6	실험군	
31	가리왕산	사스래	13.5	대조구	
32	가리왕산	사스래	12.3	대조구	
33	가리왕산	사스래	18.8	대조구	
34	가리왕산	사스래	11.6	대조구	
35	가리왕산	사스래	18.4	대조구	
36	가리왕산	사스래	27.7	대조구	
37	가리왕산	사스래	10.9	대조구	
38	가리왕산	사스래	14.9	대조구	
39	가리왕산	사스래	33.7	대조구	
40	가리왕산	사스래	34.0	대조구	
41	장산	분비	21.6	실험군	
42	장산	분비	12.4	실험군	
43	장산	분비	29.3	실험군	
44	장산	분비	25.6	실험군	
45	장산	분비	19.5	실험군	
46	장산	분비	34.7	실험군	
47	장산	사스래	16.0	대조구	
48	장산	사스래	10.3	대조구	
49	장산	사스래	18.2	대조구	
50	장산	사스래	14.8	대조구	
51	장산	사스래	9.4	대조구	
52	화악산	분비	53.3	실험군	
53	화악산	분비	43.6	실험군	
54	화악산	분비	16.4	실험군	
55	화악산	분비	28.6	실험군	

NO	산지명	수종	흉고직경	구분	비고
56	화악산	분비	13.3	실험군	
57	화악산	분비	20.4	실험군	
58	화악산	분비	9.6	실험군	
59	화악산	분비	27.3	실험군	
60	화악산	분비	20.7	실험군	
61	화악산	분비	26.0	실험군	
62	화악산	분비	14.1	실험군	
63	화악산	사스래	13.4	대조구	
64	화악산	사스래	8.1	대조구	
65	화악산	사스래	18.2	대조구	
66	화악산	사스래	11.5	대조구	
67	발왕산	분비	23.4	실험군	
68	발왕산	분비	18.8	실험군	
69	발왕산	분비	6.6	실험군	
70	발왕산	분비	6.2	실험군	
71	발왕산	분비	24.5	실험군	
72	발왕산	분비	21.7	실험군	
73	발왕산	분비	11.8	실험군	
74	발왕산	분비	7.4	실험군	
75	발왕산	분비	10.9	실험군	
76	발왕산	분비	8.9	실험군	
77	발왕산	분비	19.3	실험군	
78	발왕산	분비	21.3	실험군	
79	발왕산	분비	12.8	실험군	
80	발왕산	분비	23.9	실험군	
81	발왕산	분비	13.5	실험군	
82	발왕산	신갈	13.3	대조구	
83	발왕산	신갈	20.3	대조구	
84	발왕산	신갈	22.5	대조구	
85	발왕산	신갈	13.2	대조구	
86	청옥산	분비	48.9	실험군	
87	청옥산	분비	30.1	실험군	
88	청옥산	분비	21.0	실험군	
89	청옥산	분비	48.7	실험군	
90	청옥산	분비	43	실험군	
91	청옥산	분비	47.2	실험군	

NO	산지명	수종	흉고직경	구분	비고
92	청옥산	신갈	21.0	대조구	
93	청옥산	신갈	15.9	대조구	
94	청옥산	신갈	21.5	대조구	
95	청옥산	신갈	27.8	대조구	
96	청옥산	신갈	21.8	대조구	
97	청옥산	신갈	22.0	대조구	
98	대암산	분비	12.8	실험군	
99	대암산	분비	10.9	실험군	
100	대암산	분비	6.6	실험군	
101	대암산	분비	17.0	실험군	
102	대암산	분비	12.0	실험군	
103	대암산	신갈	17.7	대조구	
104	대암산	신갈	18.9	대조구	
105	대암산	신갈	16.8	대조구	
106	대암산	신갈	18.8	대조구	
107	대암산	신갈	29.0	대조구	
108	향로봉	분비	18.5	실험군	
109	향로봉	분비	10.1	실험군	
110	향로봉	분비	10.3	실험군	
111	향로봉	신갈	18.9	대조구	
112	향로봉	신갈	19.5	대조구	
113	향로봉	신갈	12.1	대조구	

(2) 연년생장량과 환경인자 상관관계

분비나무의 연년생장량과 환경요인 간의 상호관계를 분석하기 위하여 최근 30년간 기상청 자료를 참조하여 분석하였다. 기상자료는 8개의 자생지 인근의 기상데이터를 기반으로 평균연년생장량 자료와 비교 분석하였다. 분석에 이용된 환경인자는 식물의 생장에 가장 영향을 미치는 6가지인자(평균기온(Mean. Temp.), 연강수량(Annual pre.), 최대 평균 풍속(Max. wind spd.) 평균 풍속(Mean wind spd.), 평균 상대습도(Mean hum.), 연평균적설량(Annual snow))로 선정하였다. 연년생장량과 강수량 및 기온 간 상관관계를 분석하기 위하여 통계프로그램 SPSS 및 R을 활용하였다.

다. 연구결과

(1) 수령-흉고직경 회귀식

분비나무 자생지에서 추출한 목편의 수령을 파악하고 이를 이용하여 목편없이 흉고직경만을 이용한 수령파악을 위한 수령-흉고직경 회귀식을 도출하였다. 총 4가지 방법의 회귀식을 도출하였으며, 종속변수(y)는 수령, 독립변수(x)는 흉고직경으로 지정하였다.

각 회귀식을 도출한 결과, 1차선형 $y=1.6581*x+24.366(R^2=0.5521)$, 자연지수 $y=30.071*e^{0.0289x}(R^2=0.5087)$, 자연로그 $y=36.351*\ln(x)-47.735(R^2=0.5786)$ 지수 $y=7.6223*x^{0.6731}(R^2=0.6032)$ 로 나타났다. 4가지 유형의 회귀식의 통계적유인성은 인정되었다($P<0.05$). 따라서 설명력이 가장 높은 지수 $y=7.6223*x^{0.6731}$ 식을 이용하여 국내 분비나무의 흉고직경에 따른 수령을 간접적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

표 32. 분비나무 흉고직경-수령 회귀식

구분	회귀식 형식	allometry equation	설명력 (R ²)	p-value
1차선형	$y=ax+b$	$y=1.6581*x+24.366$	0.5521	<0.05
자연지수	$y=aebx$	$y=30.071*e^{0.0289x}$	0.5087	
자연로그	$y=\ln(x)+b$	$y=36.351*\ln(x)-47.735$	0.5786	
지수	$y=ax^b$	$y=7.6223*x^{0.6731}$	0.6032	

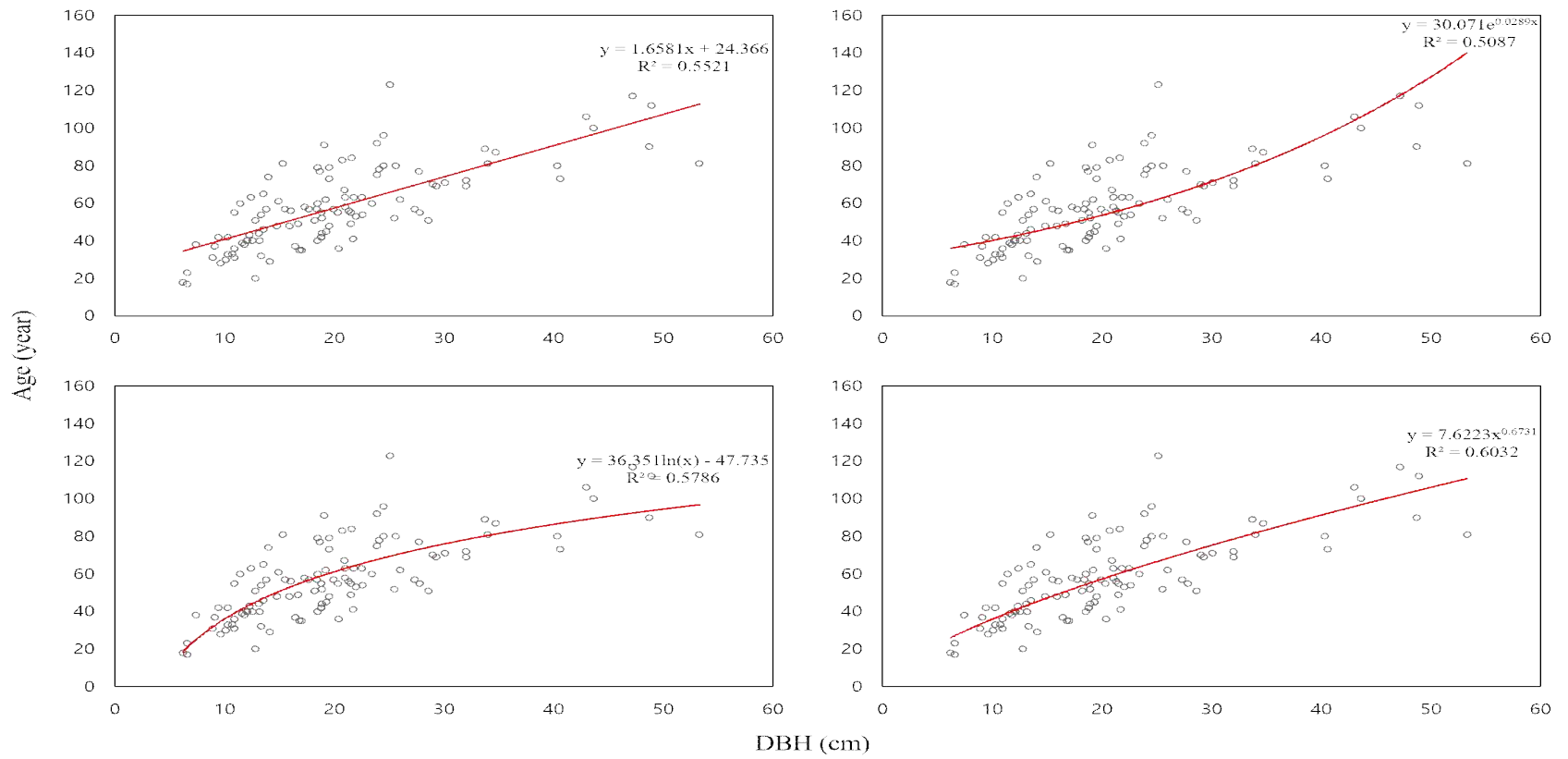


그림 70. 분비나무 흉고직경-수령 회귀식

(2) 분비나무림의 영급과 흉고직경

8개의 분비나무 자생지에서 추측한 목편을 기준으로 분비나무의 평균 수령과 흉고직경을 분석한 결과 분비나무의 평균수령이 가장 높은 지역은 청옥산으로 91.9 ± 19.4 년생으로 X영급이었고, 평균수령이 가장 낮은 지역은 대암산으로 29.6 ± 9.3 으로 IV영급이었다. 분비나무 목편채취 개체목의 대조구인 활엽수와 비교해보면 향로봉과 대암산을 제외하고 V영급이상 노령림으로 나타났다.

표 33. 분비나무림의 영급과 흉고직경

산지	평균 수령		평균 흉고직경(cm)	
	분비나무	활엽수	분비나무	활엽수
일월산	77.3 ± 22.0	63.4 ± 15.3	17.0 ± 4.9	19.2 ± 3.5
가리왕산	59.3 ± 14.3	59.8 ± 17.9	25.4 ± 10.0	19.6 ± 8.5
장산	76.0 ± 8.4	47.8 ± 5.4	23.9 ± 7.1	13.7 ± 3.4
화악산	46.1 ± 17.5	46.8 ± 13.1	19.6 ± 6.4	12.8 ± 3.7
발왕산	46.6 ± 16.5	53.0 ± 8.3	15.4 ± 6.5	17.3 ± 4.1
청옥산	91.9 ± 19.4	56.2 ± 5.4	42.0 ± 10.2	21.7 ± 3.5
대암산	29.6 ± 9.3	49.6 ± 12.4	11.86 ± 3.3	20.24 ± 4.4
향로봉	34.3 ± 4.2	46.7 ± 5.0	13.0 ± 3.9	16.8 ± 3.4

(3) 연년생장량 비교

분비나무와 경쟁수종 간 연년생장량을 분석하기 위해 채취한 목편의 최근 40년간 연년생장량의 평균을 비교하였다. 일월산의 분비나무 10개체와 신갈나무 10개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 2000년도 이전까지 신갈나무의 연년생장량이 우위를 차지하고 있었지만 최근 20년 동안 연년생장량은 비슷한 양상인 것으로 나타났다. 가리왕산의 분비나무 10개체와 사스래나무 10개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 분비나무의 연년생장량이 우위를 점하고 있었으나 2012년 이후 연년생장량은 사스래나무와 비슷한 양상으로 나타났다. 장산의 분비나무 6개체와 사스래나무 5개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 분비나무와 사스래나무의 우위를 번갈아가며 비슷한 양상을 나타내었다. 화악산의 분비나무 9개체와 사스래나무 4개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 분비나무의 연년생장량이 대체로 우위를 점하고 있었으나, 2003년부터 2008년까지는 사스래나무의 연년생장량이 분비나무보다 더 높게 나타났다. 발왕산의 분비나무 15개체와 신갈나무 4개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 분비나무의 연년생장량이 대체로 우위를 점하고 있었다. 청옥산의 분비나무 8개체와 신갈나무 6개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 2002년부터 2014년은 분비나무의 연년생장량이 우점하였지만 이를 제외하고 분비나무와 신갈나무의 연년생장량은 비슷한 양상으로 우위를 번갈아가며 나타났다. 대암산의 분비나무 5개체와 신갈나무 5개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 분비나무와 신갈나무가 2-5년 주기로 번갈아가며 우위를 점하여 비슷한 양상으로 나타났다. 향로봉의 분비나무 3개체와 신갈나무 3개체에 대하여 연도별 연년생장량을 분석한 결과 2002년 이전까지 분비나무와 신갈나무의 우점양상이 비슷하였지만 최근 20년 동안 분비나무의 연년생장량이 신갈나무보다 더 높은 것으로 나타났다.

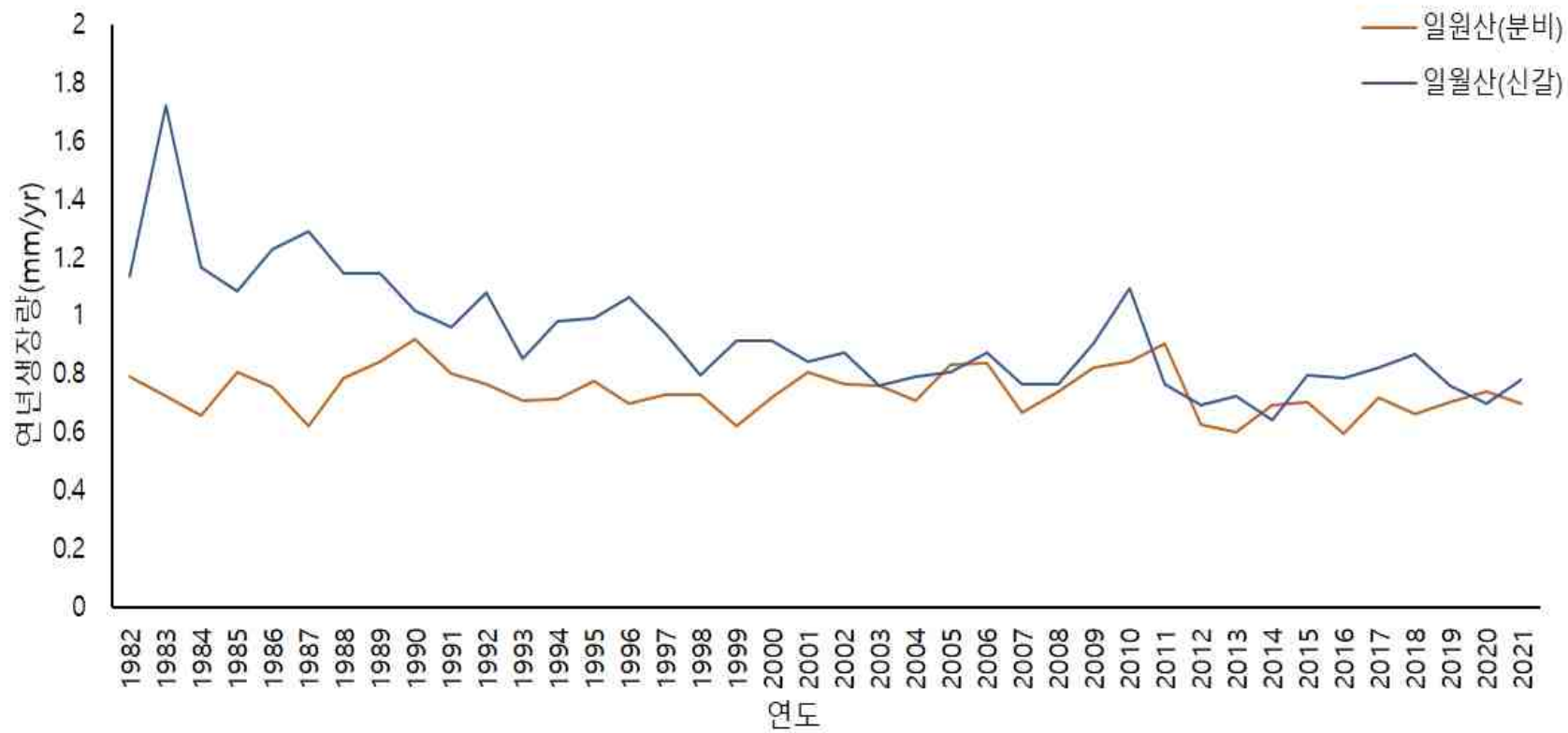


그림 71. 일월산 분비나무와 신갈나무 생장량 비교

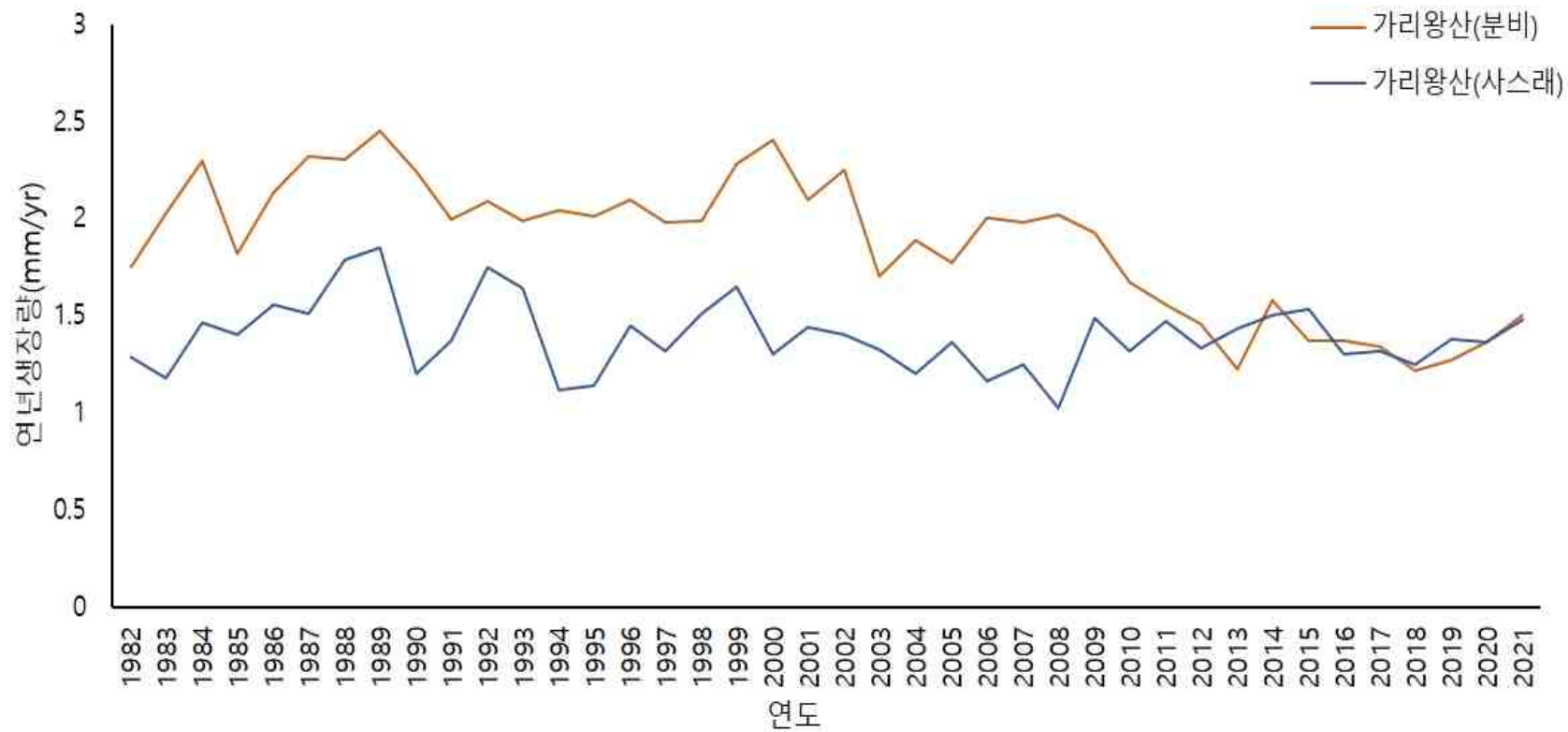


그림 72. 가리왕산 분비나무와 사스래나무 성장량 비교

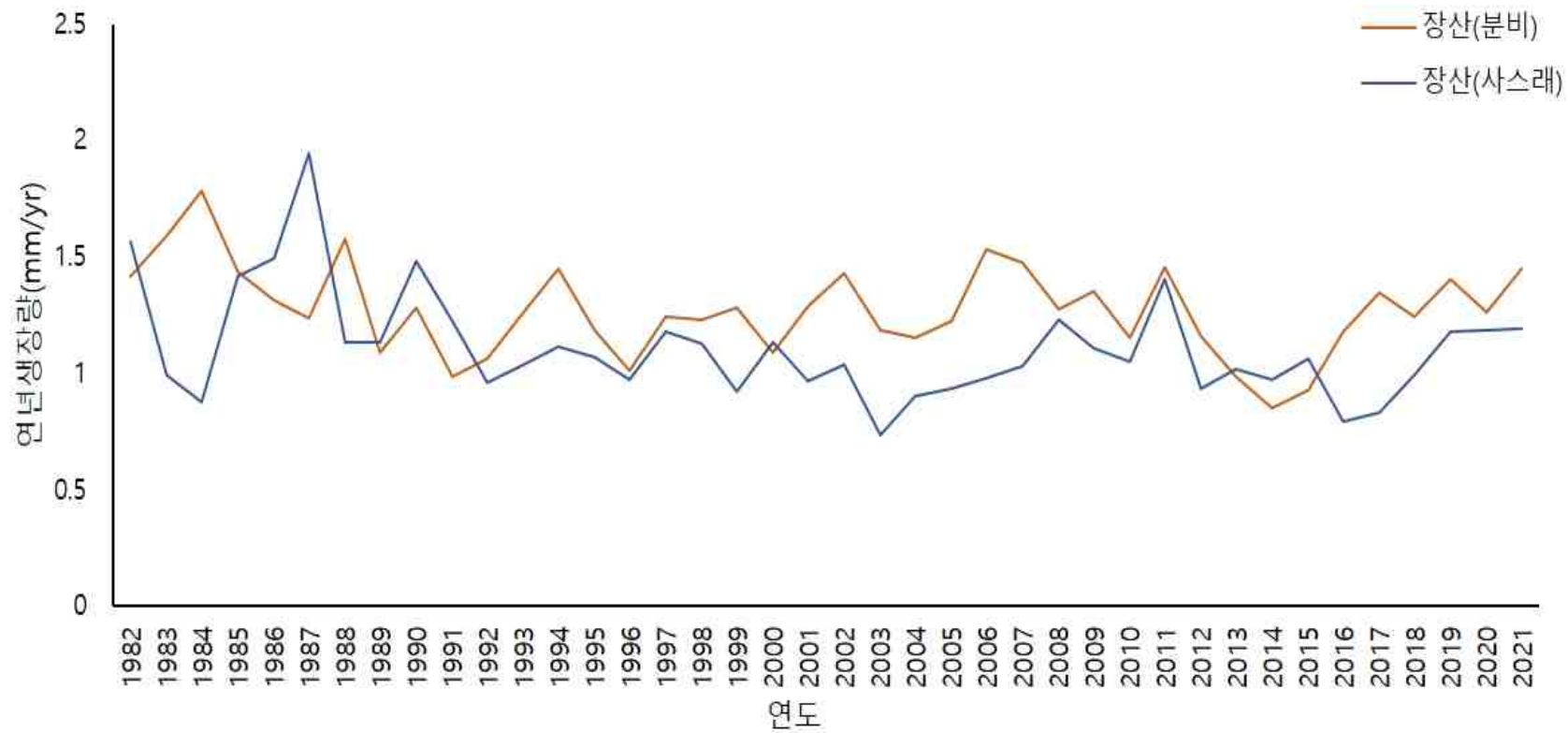


그림 73. 장산 분비나무와 사스래나무 성장량 비교

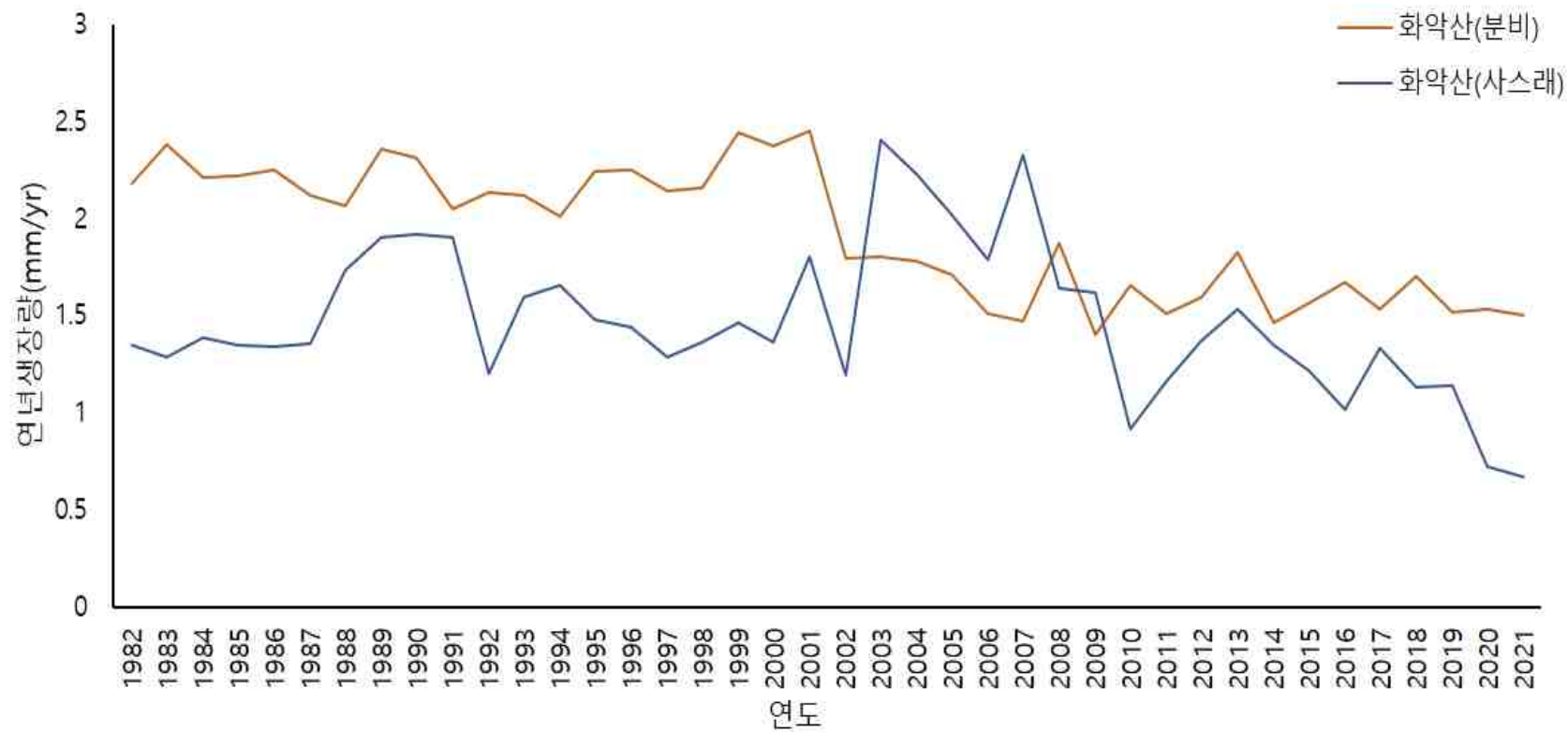


그림 74. 화악산 분비나무와 사스래나무 성장량 비교

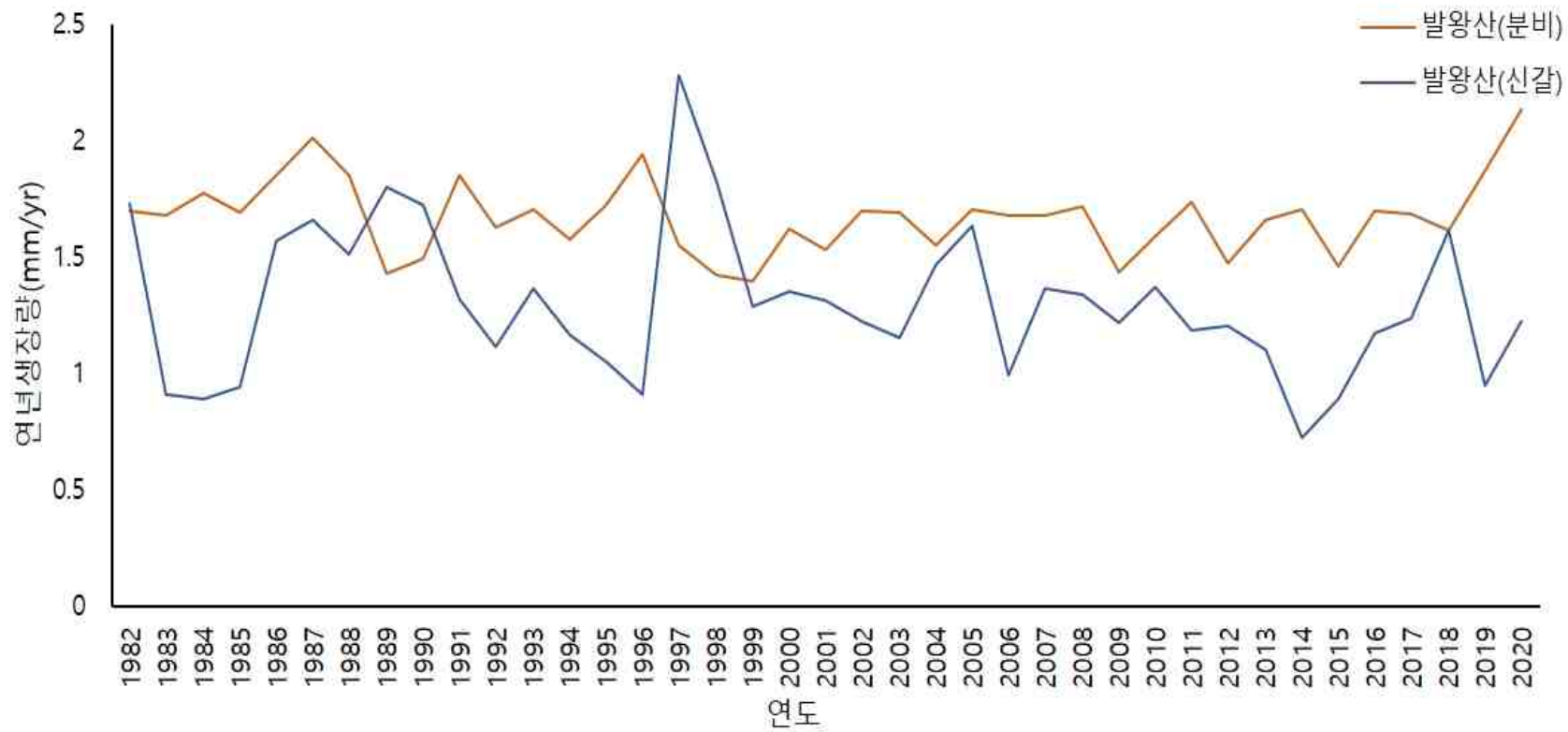


그림 75. 발왕산 분비나무와 신갈나무 성장량 비교

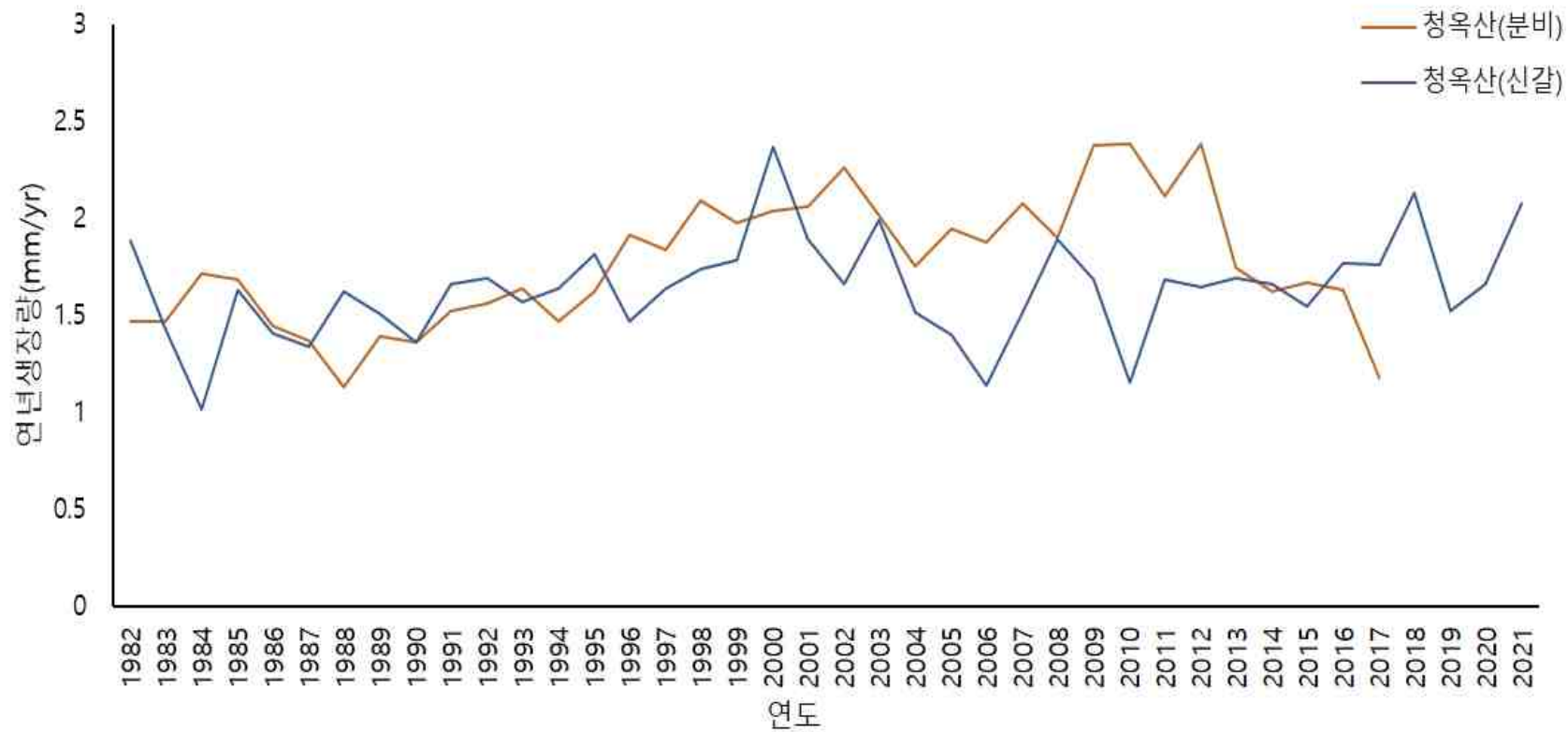


그림 76.. 청옥산 분비나무와 신갈나무 성장량 비교

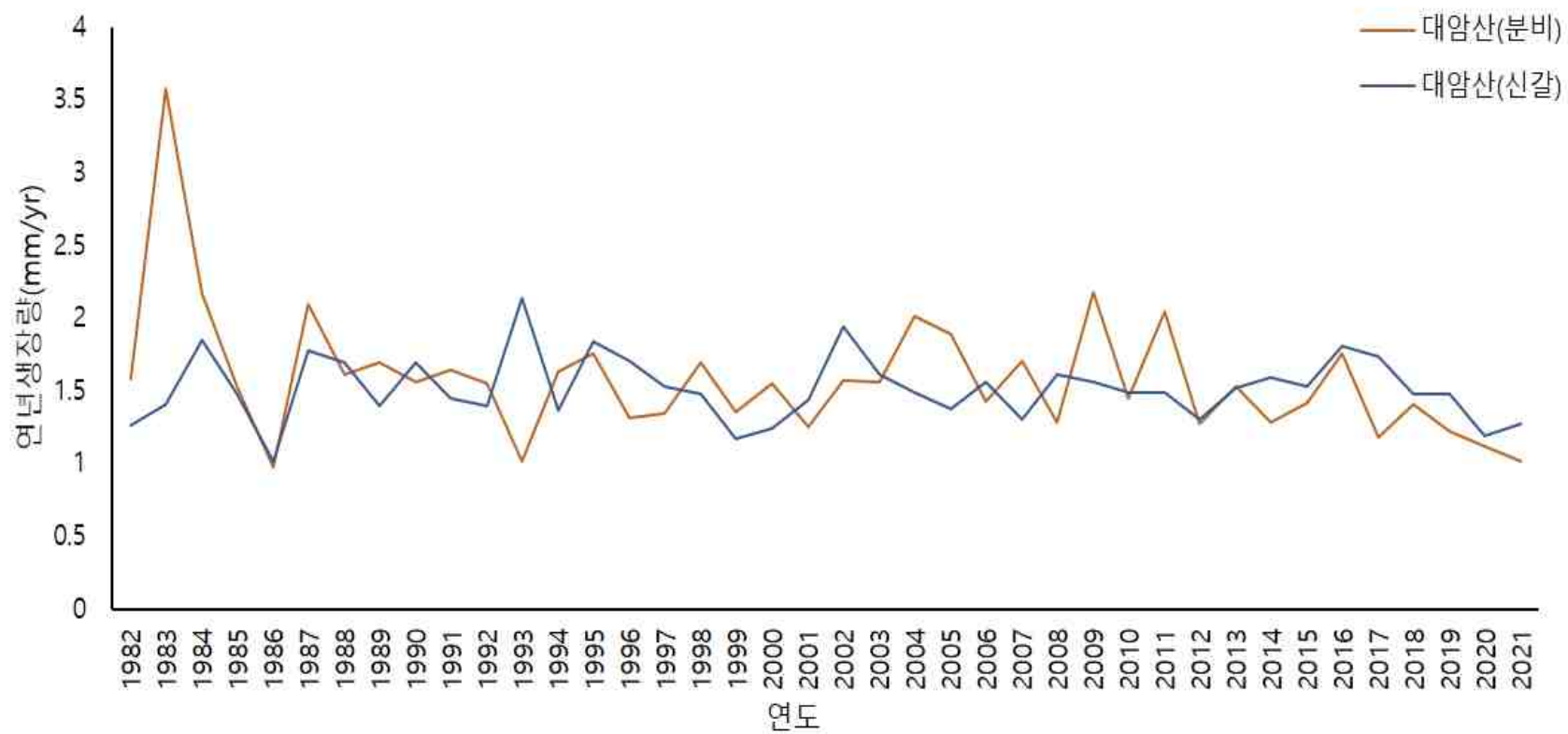


그림 77. 대암산 분비나무와 신갈나무 성장량 비교

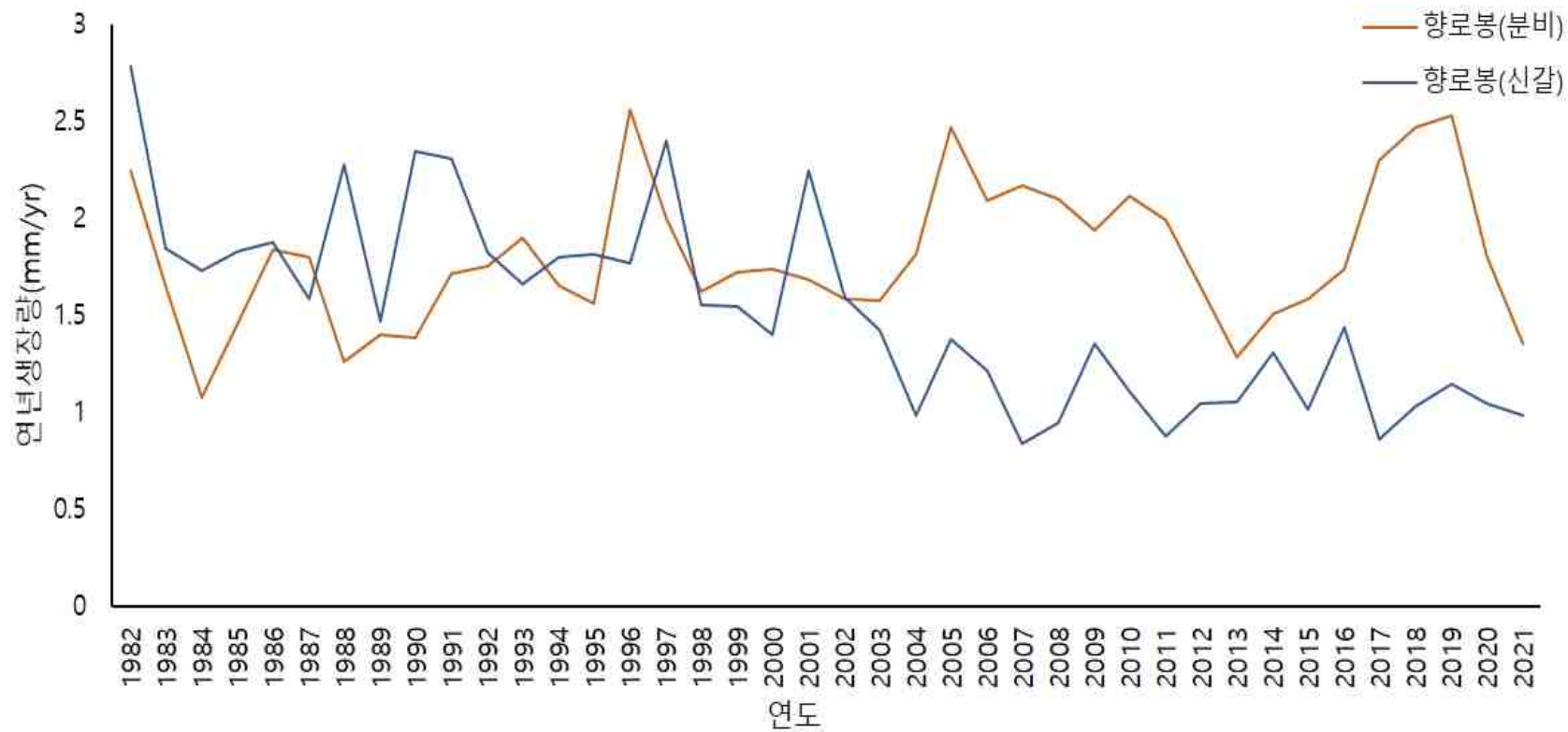


그림 78. 향로봉 분비나무와 신갈나무 성장량 비교

각 산지별 분비나무와 활엽수간 최근 30년간 연년생장량 비교를 통하여 경쟁관계를 확인하였다. 분비나무의 연년생장량은 일월산 0.730 mm/yr, 청옥산 1.786 mm/yr, 장산 1.239 mm/yr, 가리왕산 1.781 mm/yr, 발왕산 1.672 mm/yr, 대암산 1.495 mm/yr, 화악산 1.821 mm/yr, 향로봉 1.876 mm/yr으로 나타나 평균 1.550 mm/yr로 나타났다. 분비나무의 남방한계선인 일월산에서 연년생장량이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 향로봉, 화악산 등 위도 38도선으로 갈수록 높아지는 것으로 분석되었다.

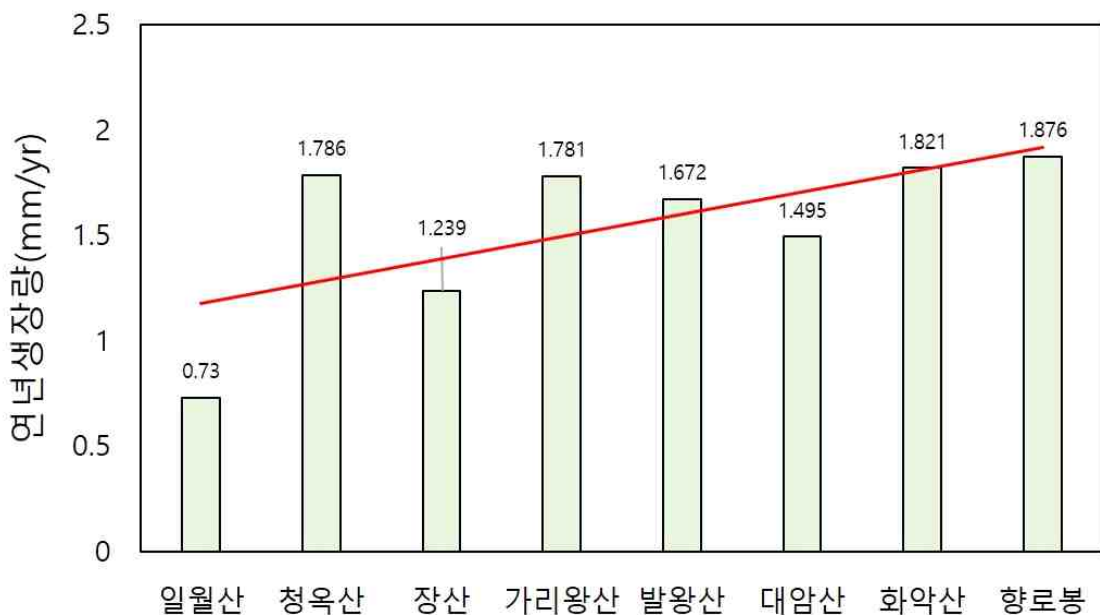


그림 79. 산지별 분비나무 연년생장량 차이

(4) 분비나무 연년생장량과 환경인자간의 상호관계

연년 전체의 경우 연강수량과(pearson coefficient=0.462, $p<0.01$)는 정의 상관관계, 평균 풍속과는 부의 상관관계(pearson coefficient=-0.421, $p<0.05$), 그리고 연강설량과는 정의 상관관계(pearson coefficient=0.577, $p<0.01$)로 나타났다. 계절에 따른 상관관계의 통계적 유의성은 최대 평균 풍속에서만 나타났으며, 봄철 최대

평균 풍속과 부의 상관관계(pearson coefficient=-0.400, $p<0.01$)로 나타났으며, 겨울철과는 반대로 정의 상관관계(pearson coefficient=0.415, $p<0.05$)로 나타났다.

분비나무는 연강수량 및 적설량과 정의 상관관계를 가지는 것으로 보아 아고산 생태계의 환경에 적응하기 위하여 수분은 매우 중요한 생육자원으로 판단된다. 높은 해발고도의 분포하는 식물종의 경우 바람의 영향을 더 받게 된다. 바람에 의한 피해는 도목 또는 초두부절단 등 여러 가지 물리적피해로 연결된다.

본 연구에서는 풍해에 의한 연년생장량의 감소는 봄철의 풍속과 상관성이 있는 것으로 미루어봤을 때 봄철의 건조한 대기로 인한 수목생리적인 피해를 발생시키고, 이는 곧 수분스트레스 등을 야기할 것으로 판단된다. 또한 강한 바람의 영향으로 분비나무의 흉고직경발달은 곧 뿌리의 성장으로 나타날 것으로 판단되며, 이러한 기작은 도목 등에 의한 피해를 경감시키기위한 분비나무의 생존전략으로 판단된다.

라. 고찰

일월산 지역을 시작으로 하여 향로봉 지역까지 위도가 높아질수록 연년생장량이 점점 증가하는 경향으로 나타났다. 일월산은 분비나무의 전세계적인 남방한계선으로 알려져 있다. 일월산 분비나무림 군락도 국내 아고산 침엽수종의 임분구조와 유사하게 침활혼효림의 임상을 나타내고 있으나, 구성 수종이 아고산성 활엽수종인 사스래나무, 시닥나무 등이 아니라 신갈나무, 조록싸리, 당단풍나무 등 온대림에서 주로 생육하는 종들이 번성해져 있었다. 다만 온대림의 종이 번성하고 있는 것과는 달리 일월산 분비나무 성목은 교목층위를 대부분 차지하고 있어 수종간 경쟁에서 큰 영향은 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 분비나무의 생장량은 종간경쟁보다 위도에 따른 환경적 요인의 변화에 영향을 받았을 것으로 판단된다.

생장보다는 개체목의 생육에 더 많은 에너지 대사로 활용되는 것으로 판단된다. 그리고 일월산 지역의 경우 미역줄나무와 같은 만경류가 주로 번성하고 있는 지역이었는데, 이러한 수간부의 피해가 향후 분비나무의 생육을 방해할 수 있는 요

인으로 될 수 있다. 또한 흉고직경-수령의 회귀식을 통하여 국내 분비나무림의
영급을 추정해 볼 수 있으며, 영급에 따른 적절한 분비나무림의 관리와 보전방침
이 세밀하게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

분비나무의 환경인자간 상관관계를 파악하였을 때, 전체적으로 수분관계와 풍속
에 영향을 미치고 있었다. 분비나무는 기온에 의한 연년생장량의 상관관계와는 통
계적 유의성이 없는 것으로 나타났으며 수분스트레스와 풍속의 증가는 분비나무
의 생육을 방해할 요인이 될 것으로 판단된다. 본 연구에서 분비나무의 생장량은
풍속과는 부의 상관관계로 나타났는데 풍속에 건조한 대기의 영향을 받기 때문에
연년생장량이 감소한 것으로 판단된다. 이는 월강수량과, 적설량과는 정의 상관관
계로 나타난 것으로 보아, 분비나무의 연년생장량은 수분과의 상관관계가 상대적
으로 많을 것으로 보이며 단순한 풍속이보다는 건조한바람이 강할수록 임내를 습
도를 낮추어 생리적 피해를 가하는데 더 큰 영향을 받을 것이라는 판단이다.

전석지 분비나무 군락의 경우 실새풀과 같은 하층식생이 번무하는 경우도 있었
는데, 이러한 하층식생의 번무가 멸칭효과를 나타내어 임내 상대습도 또는 토양
내 수분을 높게 유지에 도움이 되는지에 대한 관찰이 필요하다. 또한 이끼류 및
선태류와 같은 수분을 머금은 생물분류군들이 아고산 침엽수종의 수분공급에 얼
마나 영향을 주는지에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

7. 분비나무숲 산림디지털공간 구축

가. 서론

라이다(LiDAR)는 레이저를 이용하여 주변 지형 및 장애물의 거리를 측정하는 기술로, 산림의 높이, 구조, 밀도 등을 빠르게 파악하여 시간에 따른 산림 구조의 정확한 측정과 변화를 탐지할 수 있어 산림 자원 조사 및 관리에 매우 유용하다.

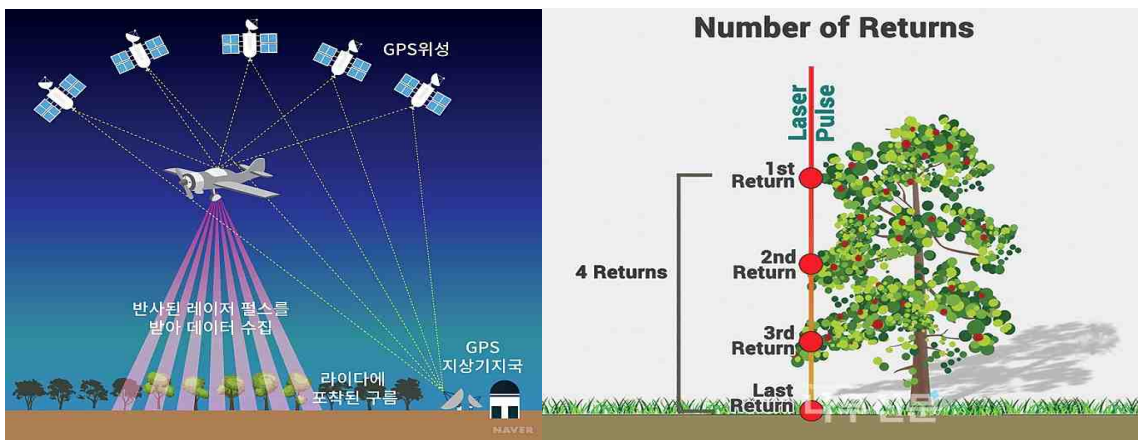


그림 80. 라이다 데이터 취득 원리

멸종위기 침엽수종 모니터링 대상지 중 발왕산, 가리왕산에 대하여 드론을 활용하여 항공 LiDAR 데이터를 취득하였다. 이때, 전년도에 실시된 비행 방법들 중 가장 효율적인 비행 방법인 지형에 대한 상대고도 기반 자동 비행을 실시하였다. 그 결과, 임내 점군 데이터가 제대로 취득되지 않아 지상 LiDAR 촬영을 추가로 실시하였다. 촬영된 데이터에 대하여 전년도에 취득된 데이터와 비교하여 임내 개체목의 변화를 탐지하기 위해 자동 Segmentation 분류를 실시하였다. 그러나 해당 방법은 지오레퍼런싱 등의 문제로 개체목이 잘못 분류되는 한계가 보여 각 개체목을 비교하기에는 어려워보인다. 따라서 직접 대표적인 개체목 5개를 선택하여 수동적으로 수고, DBH, 수관폭을 측정하여 비교하였다. 그 결과, 대상지에 대한

평균 수고, DBH, 수관폭은 전년도 대비 올해 성장한 것으로 나타났다. 그러나 취득된 기간이 짧고 수치들의 차이가 미비하여 명확하게 결과를 도출하기 힘들어 보여 향후 장기적인 데이터 구축이 필요해 보인다. 또한, 라이다 외에 다양한 센서들을 추가 활용하여 데이터 분석의 고도화가 필요한 실정이라 생각된다.

나. 연구방법

(1) 항공 LiDAR 데이터 촬영

멸종위기 침엽수종 모니터링 대상지는 발왕산, 가리왕산, 월봉산, 지리산, 계방산, 지리산으로 이 중 가리왕산, 월봉산에 대해서는 항공 LiDAR 촬영을 실시하여 현재 산림 구조에 대한 정보를 취득하고 항공 라이다 활용에 있어 한계점을 파악하고자 하였다.



그림 81. 조사대상지 촬영 준비 과정 모습

항공 라이다는 센서 특성 및 비행 방식에 따라 데이터의 오차가 발생되기 때문에 적합한 보정 방법을 적용해야 한다. 따라서 실시간으로 위치, 자세를 예측하는 칼만 필터를 적용하기 위해 비행 전후에 8자 비행을 실시하였고 드론의 정밀한 위치 측정을 위해 기지국에서 전송된 보정 데이터를 받아 실시간으로 위치 보정을 수행하는 RTK(Real Time Kinematic)를 실시하였다. 또한, 점군 데이터의 밀

도 균일화를 위해 드론 측량 및 비행 계획 소프트웨어인 UgCS를 사용하여 지형에 대한 상대고도 기반 자동 비행을 실시하였다.

본 연구에서는 고성능과 안전성으로 전세계에서 널리 사용되는 DJI사의 Matric 300 RTK 기체를 사용하였고 3회의 Return 횡수와 초당 240,000개의 점들을 취득할 수 있는 Livox사의 AVIA 센서를 사용하였다.

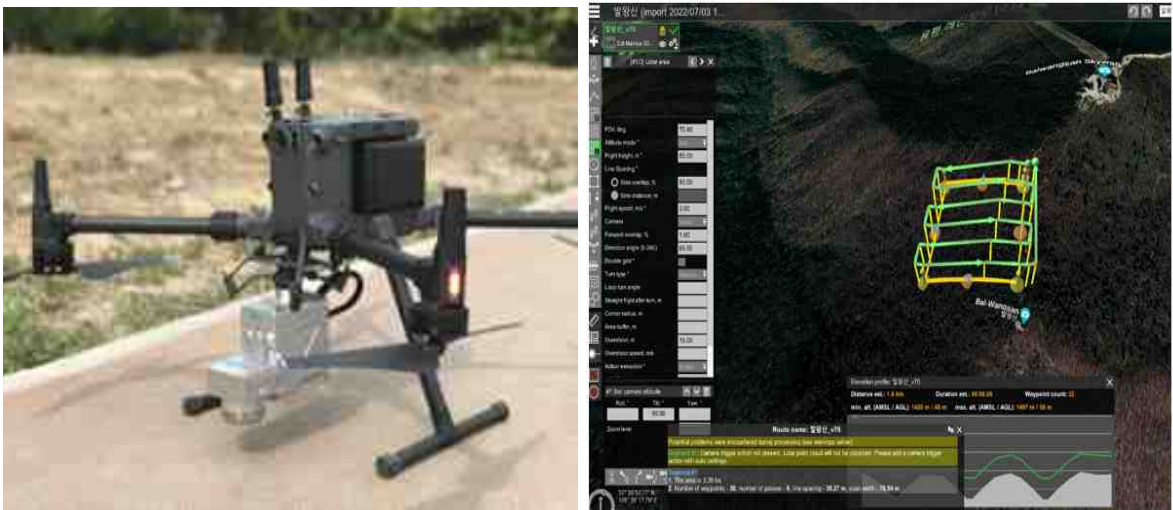


그림 82. Matric 300 RTK 기체 및 상대고도 기반 자동비행 경로 예시(UgCS)

취득된 원본 포인트 클라우드 데이터에 대하여 대상지 내 경로만 분리한 후 Boresight 보정과 궤적(Trajectory) 보정을 통해 라이다의 회전축과 시간축에 대한 보정을 각각 수행하였고 점밀도가 너무 높아 식생 탐지를 부정확하게 하는 현상을 줄이기 위해 점들의 개수 비율을 줄여주는 Subsampling을 실시하여 점밀도를 수정하였다. 또한, 노이즈나 대기 및 주변 환경에 의해 잘못 취득된 점들을 제거하기 위해 Remove Outliers 과정을 수행하였다.

UgCS 소프트웨어를 통해 라이다 장비 성능에 맞게 FOV는 70.4로 설정하였고 비행고도와 속도는 대상지의 환경 및 기상 조건에 따라 각각 50m, 3m/s로 설정하였다. 또한, 결과물의 점밀도를 균일하고 정확도가 낮은 점들을 제외하고 정확

도 높은 점들을 취득하기 위해 중첩률은 50%, 오버샷 구간은 15m로 설정하였다. 이때, 상대고도 비행시 지형 고도 기준이 되는 자료는 USGS에서 제공되는 30m 단위 SRTM4.1 DEM로 활용하였다.

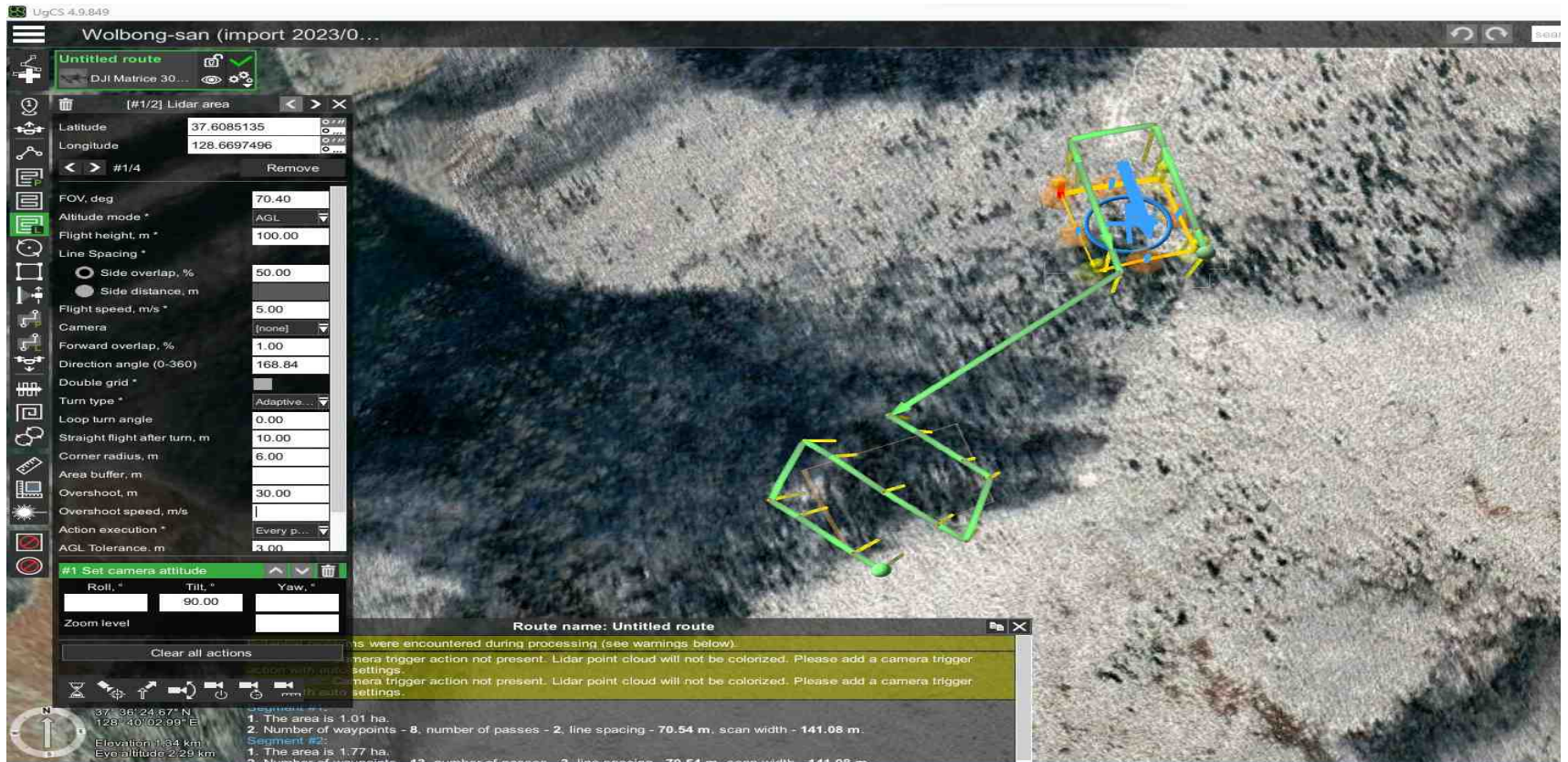


그림 83. 발왕산 조사대상지에 대한 상대고도 기반 자동비행경로 (UgCS)

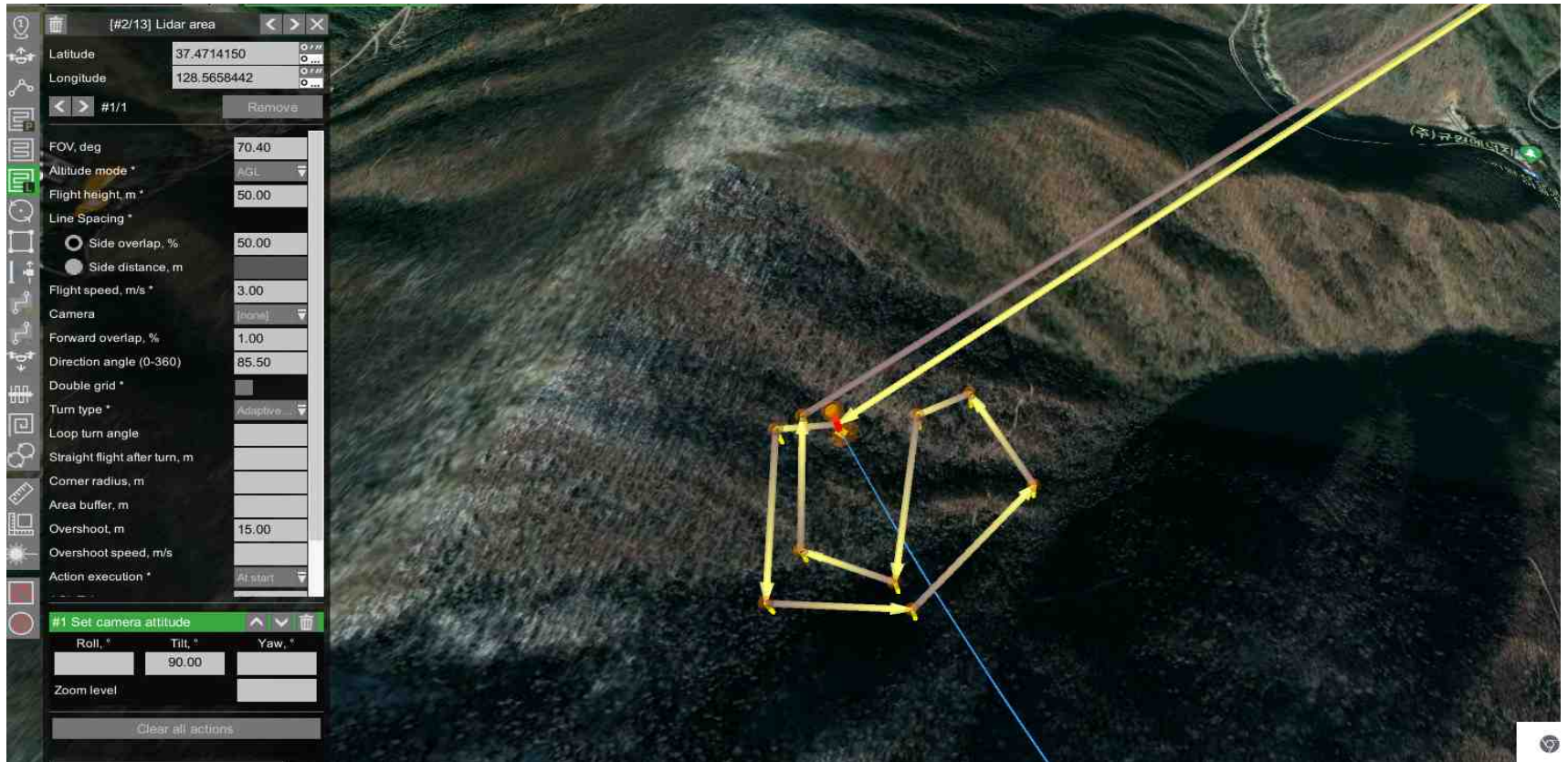


그림 84. 가리왕산 조사대상지에 대한 상대고도 기반 자동비행경로 (UgCS)

(2) 모바일 LiDAR를 활용한 임분내 3차원 DB 구축 및 멸종위기 모니터링 대상지 구조 변화 탐지
항공 라이더는 넓은 영역에 대해 빠르게 취득할 수 있다는 장점이 있으나 수관 및 주변 지형에 의해 임내 환경에 대한 데이터를 취득하기에는 한계가 있다. 하지만 지상 라이더의 경우 촬영 가능 영역은 줄어들지만 임내 수간 및 수관 등 개체목 형태에 대한 정보를 취득하기에는 더욱 용이하다는 장점이 있다.

본 연구는 emesent 사의 모바일 라이더 기기인 HoverMap을 사용하여 멸종위기 침엽수종 모니터링 전체 대상지 가리왕산, 발왕산 임분 내를 직접 스캔하여 작년과 올해 데이터를 기반으로 개체목들의 성장 정도를 검토하고자 한다.

이를 위해 촬영 경로를 기반으로 촬영 대상지 외부 데이터를 제거하고 Ground에 해당되는 점들을 분류한 후 Normalization을 실시하여 자동으로 개체목을 구별하는 Segmentation을 실시하였다.

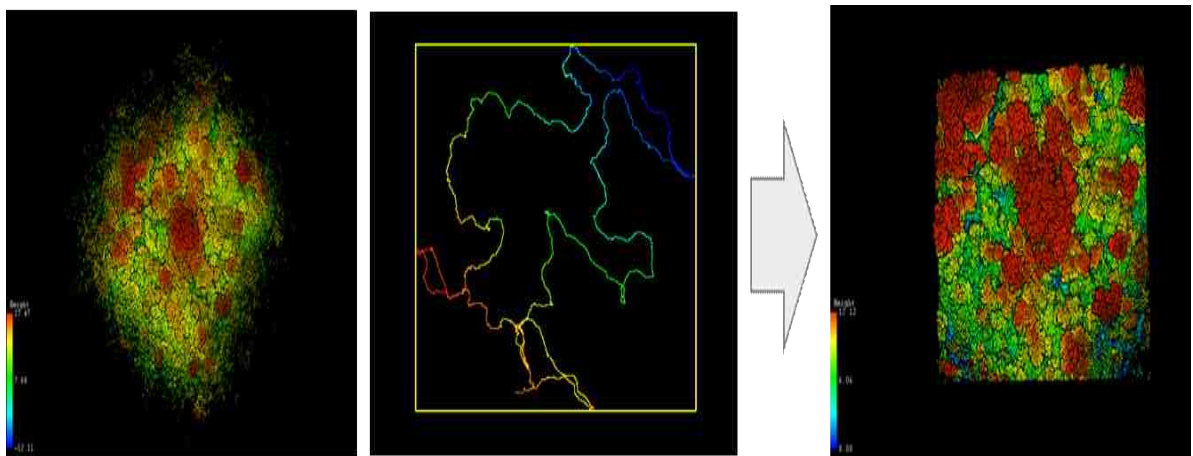


그림 85. 대상지 외부 데이터 제거

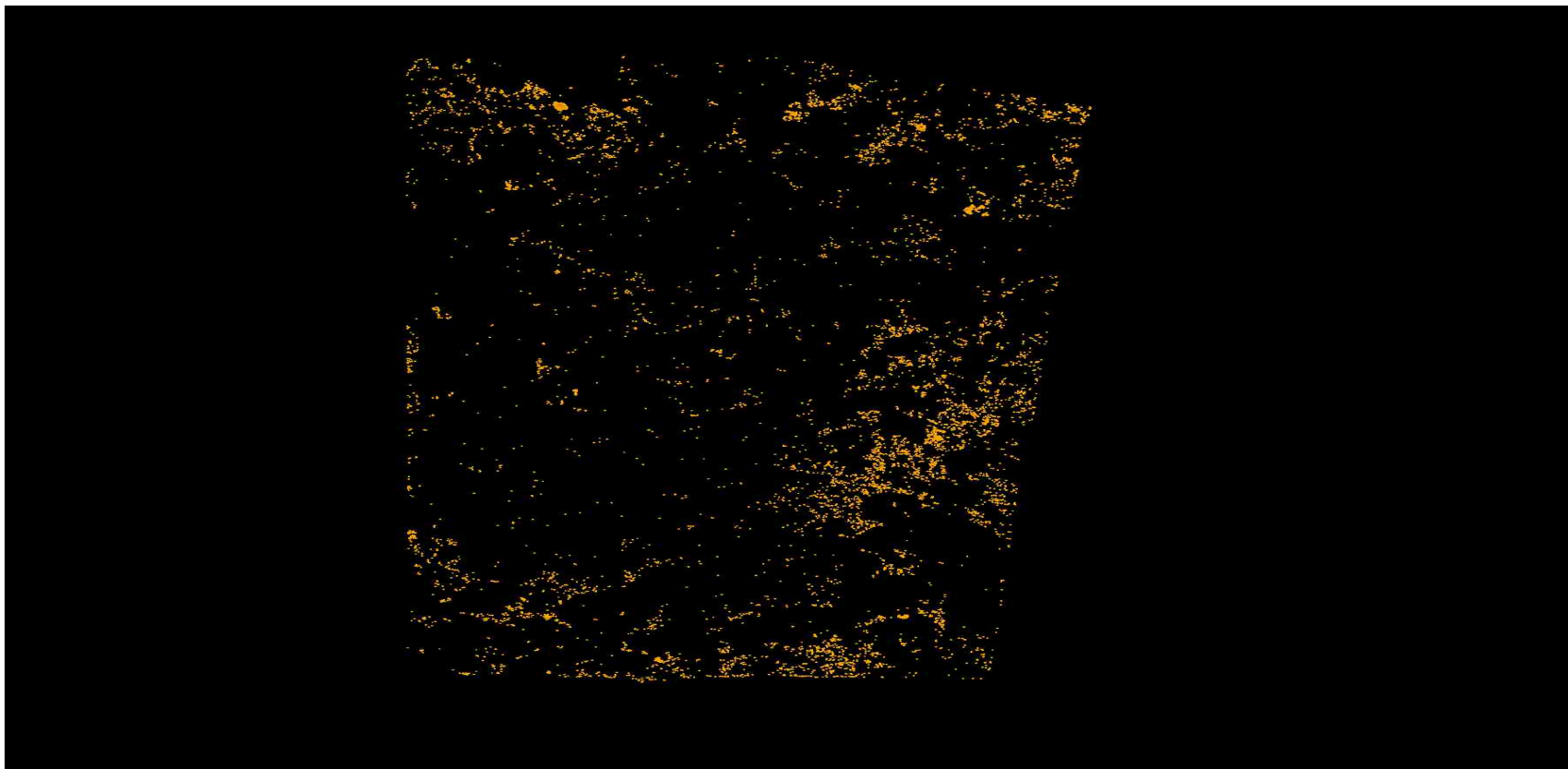


그림 86. Ground Pint 분류 결과 예시

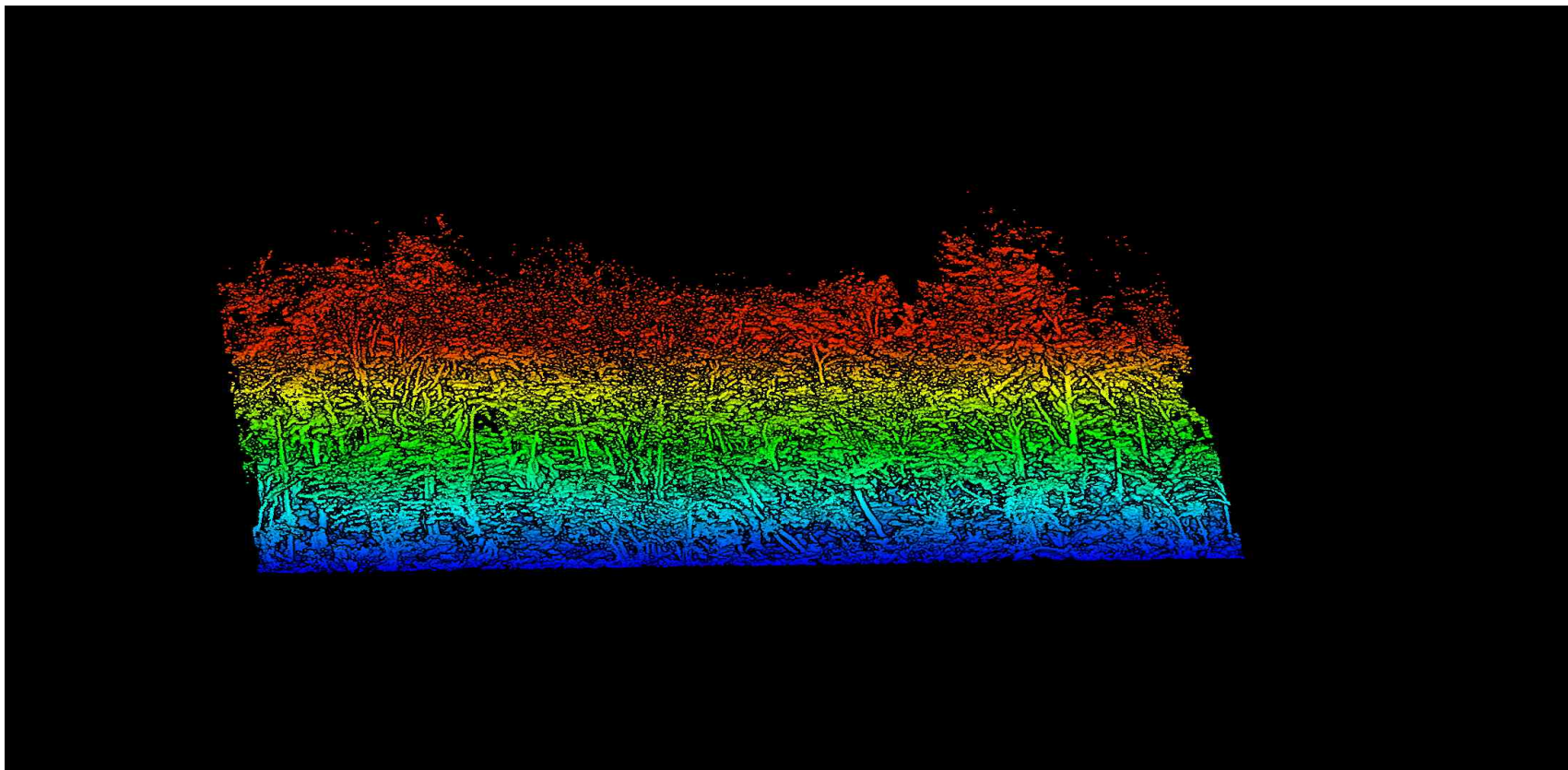


그림 87. Normalization 결과 예시

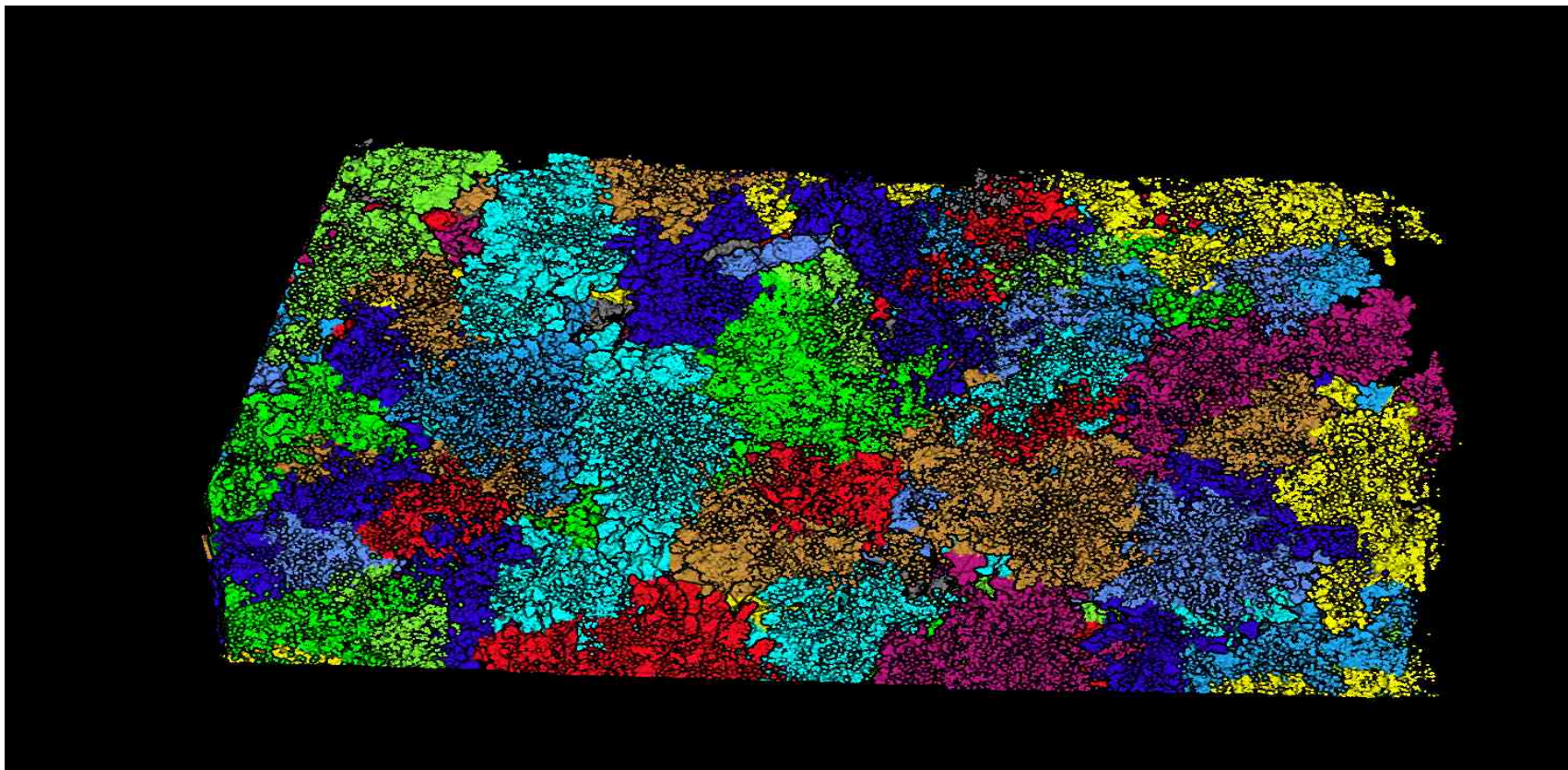


그림 88. Segmentation 결과 예시

추가적으로 개체목 간의 면밀한 비교를 위해 대상지내 대표적인 개체목 5개를 직접 선정한 후 작년과 올해 데이터에 대하여 수동적으로 수고, DBH, 수관폭을 측정하여 비교하였다.

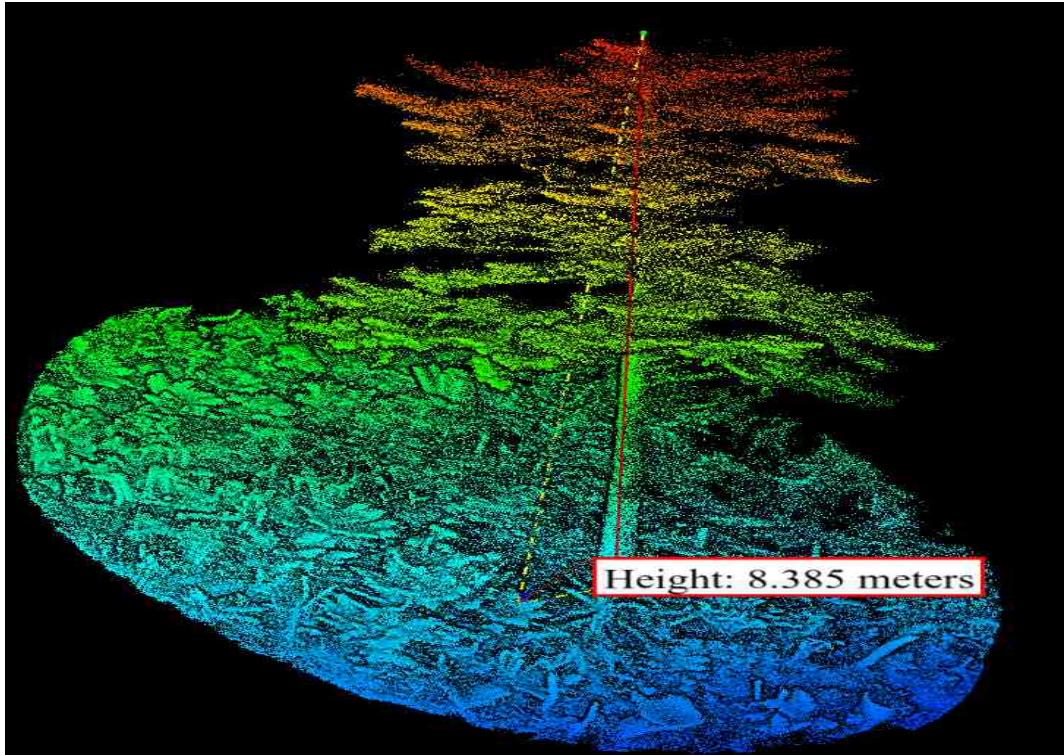


그림 89. 개체목 수고 측정 예시



그림 90. 개체목 DBH 측정 예시

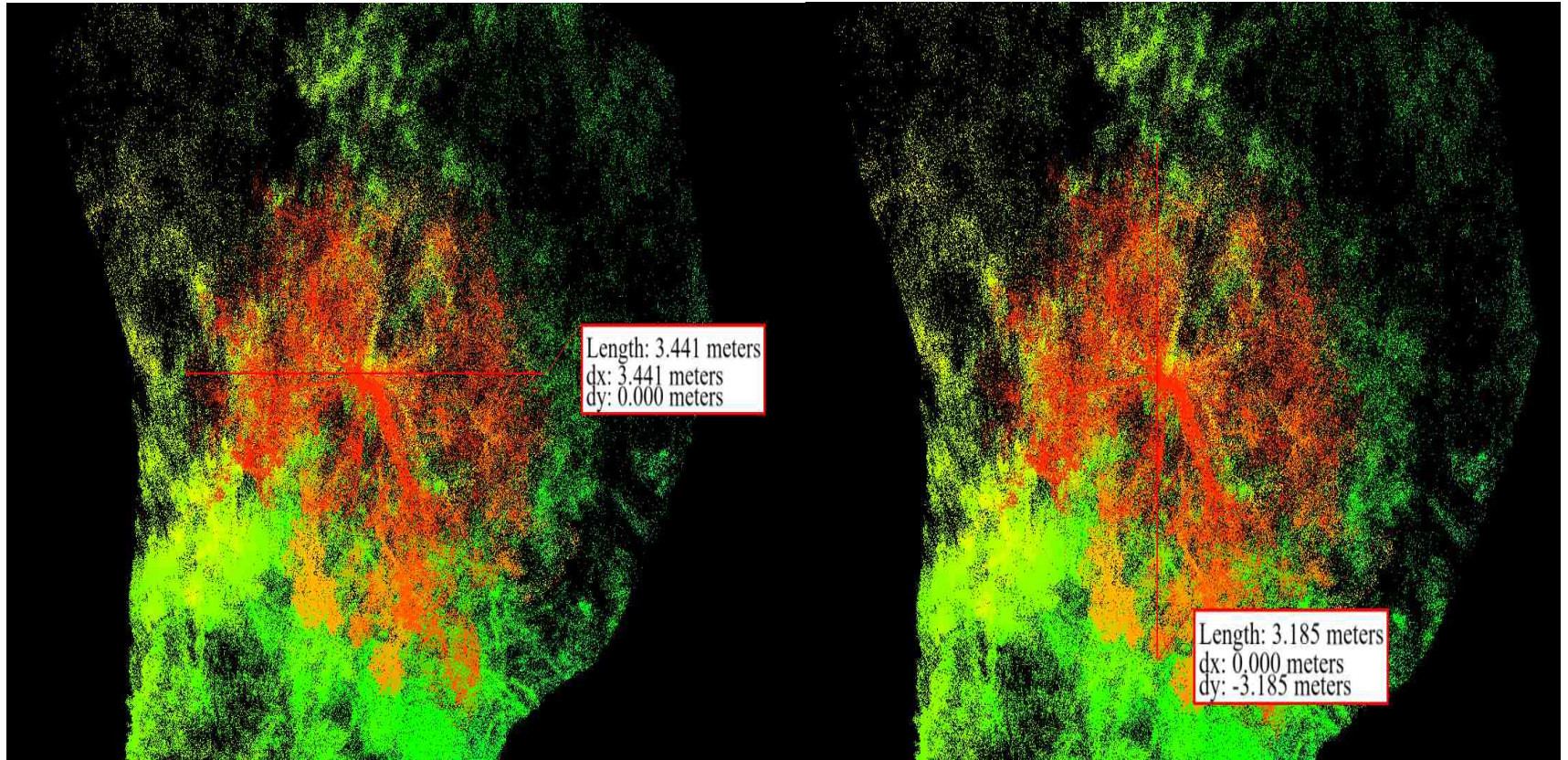


그림 91. 개체목의 수관폭 (가로, 세로) 측정 예시

다. 연구결과

(1) 항공 LiDAR 촬영

라이다 스캔 결과물은 상대고도에 따라 비행 속도 및 중첩률을 일정하게 유지하면서 데이터를 취득하였으므로 점밀도가 비교적 일정하게 나타났지만 수관에 가려진 임내 부분의 데이터들은 제대로 취득되지 않은 것으로 나타났다.



그림 92. 가리왕산 분비나무 항공라이다 스캔 결과



그림 93. 가리왕산 분비나무 임내 라이다 구축 현황

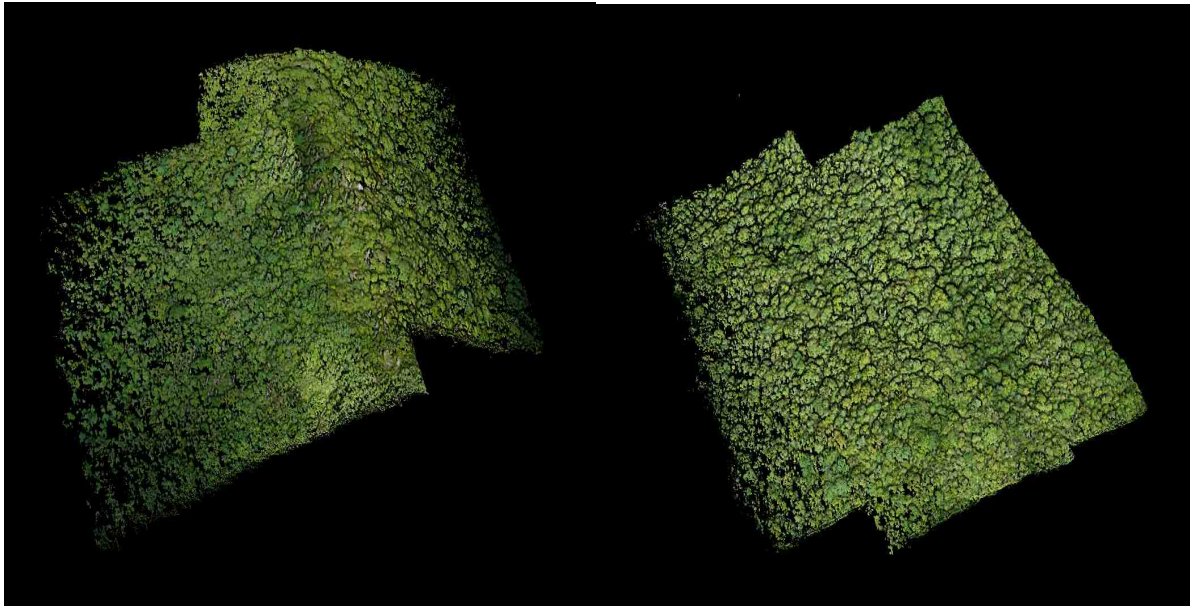


그림 94. 발왕산 분비나무 기존 및 추가 대상지 항공라이다 스캔 결과



그림 95. 발왕산 분비나무 임내 라이다 구축 현황

(2) 모바일 LiDAR를 활용한 임분내 3차원 DB 구축 및 멸종위기 모니터링 대상지 구조 변화 탐지

임분내에서 직접 모바일 라이다 장비를 가지고 이동하면서 주변을 스캔하여 항공 라이다 데이터보다 개체목과 지형에 대한 형태가 매우 뚜렷하게 취득되었다. 그러나 각 스캔 시점에서의 주변 나무 및 관목 등 장애물들에 의해 이동 경로 주변 외 영역에는 취득된 점 밀도가 낮게 나타났다.

자동적으로 Segmentation을 실시한 결과, 개체목 뿐만 아니라 관목, 일부 흩어진 점들이 하나의 개체목으로 탐지되거나 개체목 일부분이 제대로 분류되지 않는 경우도 있었으며 특히 지오레퍼런싱이 적용되지 않아 동일 개체목 추적 및 관찰에 한계가 있는 것으로 보인다. 따라서 대상지내 대표적인 개체목 5개를 직접 선정하여 작년와 올해 데이터에 대해 수동적으로 분류하여 수고, DBH, 수관폭을 면밀하게 비교하였다.

1) 가리왕산 분비나무

임분내에서 직접 모바일 라이다 장비를 가지고 이동하면서 주변을 스캔하여 항공 라이다 데이터보다 개체목과 지형에 대한 형태가 매우 뚜렷하게 취득되었다. 그러나 각 스캔 시점에서의 주변 나무 및 관목 등 장애물들에 의해 이동 경로 주변 외 영역에는 취득된 점 밀도가 낮게 나타났다.

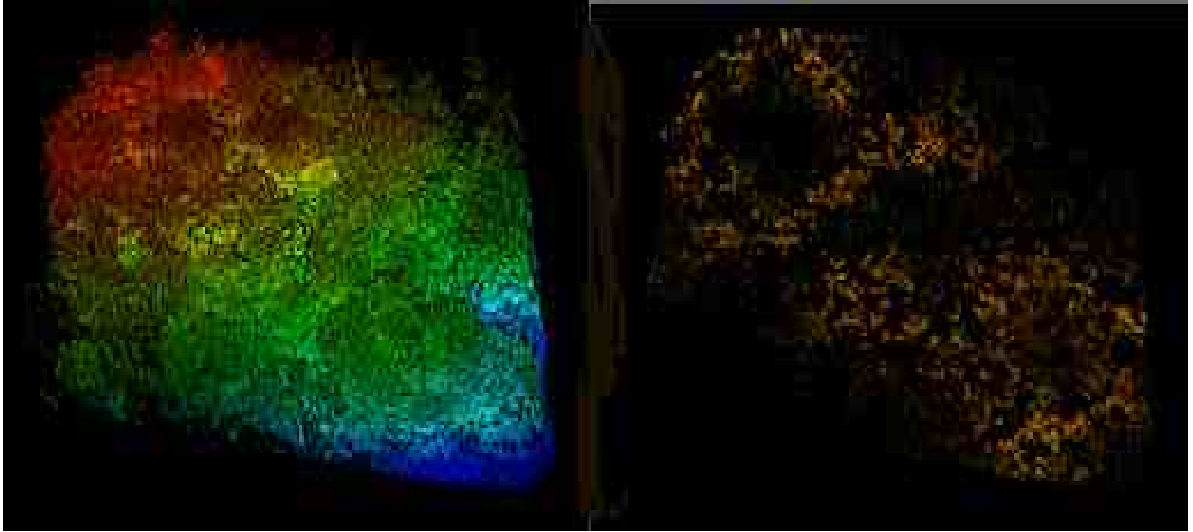


그림 96. 가리왕산 분비나무림 점군 데이터 원본 및 ground point 분류 결과

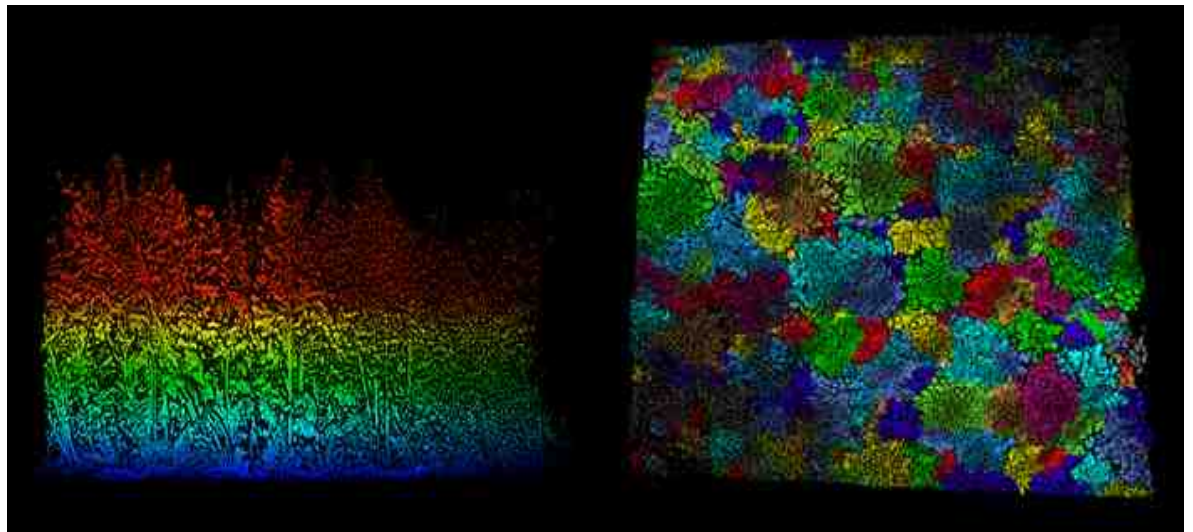


그림 97. 가리왕산 분비나무 Normalization 및 segmentation 결과

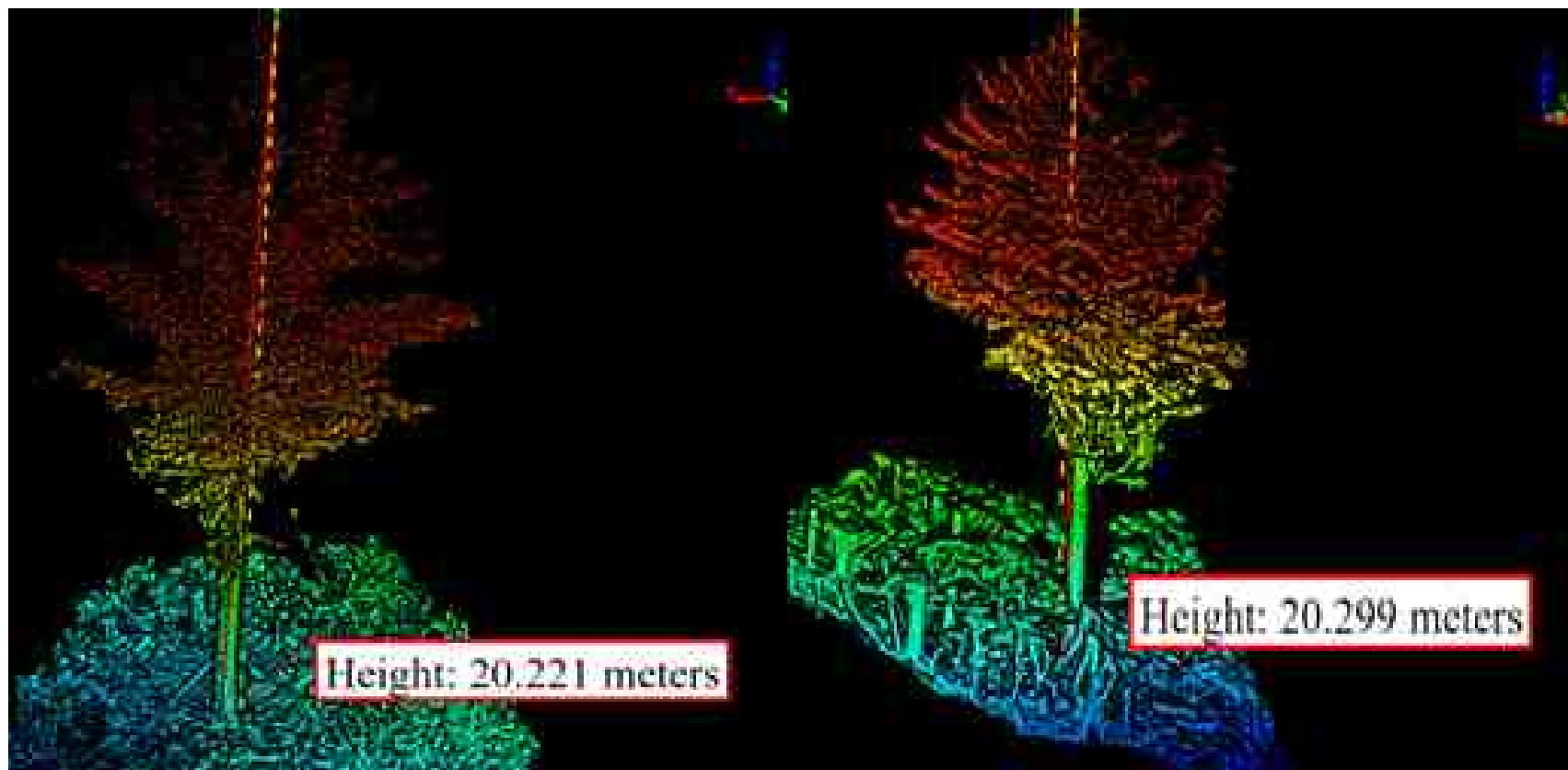


그림 98. 가리왕산 분비나무 개체목1 수고 비교 (2022년 vs 2023년)

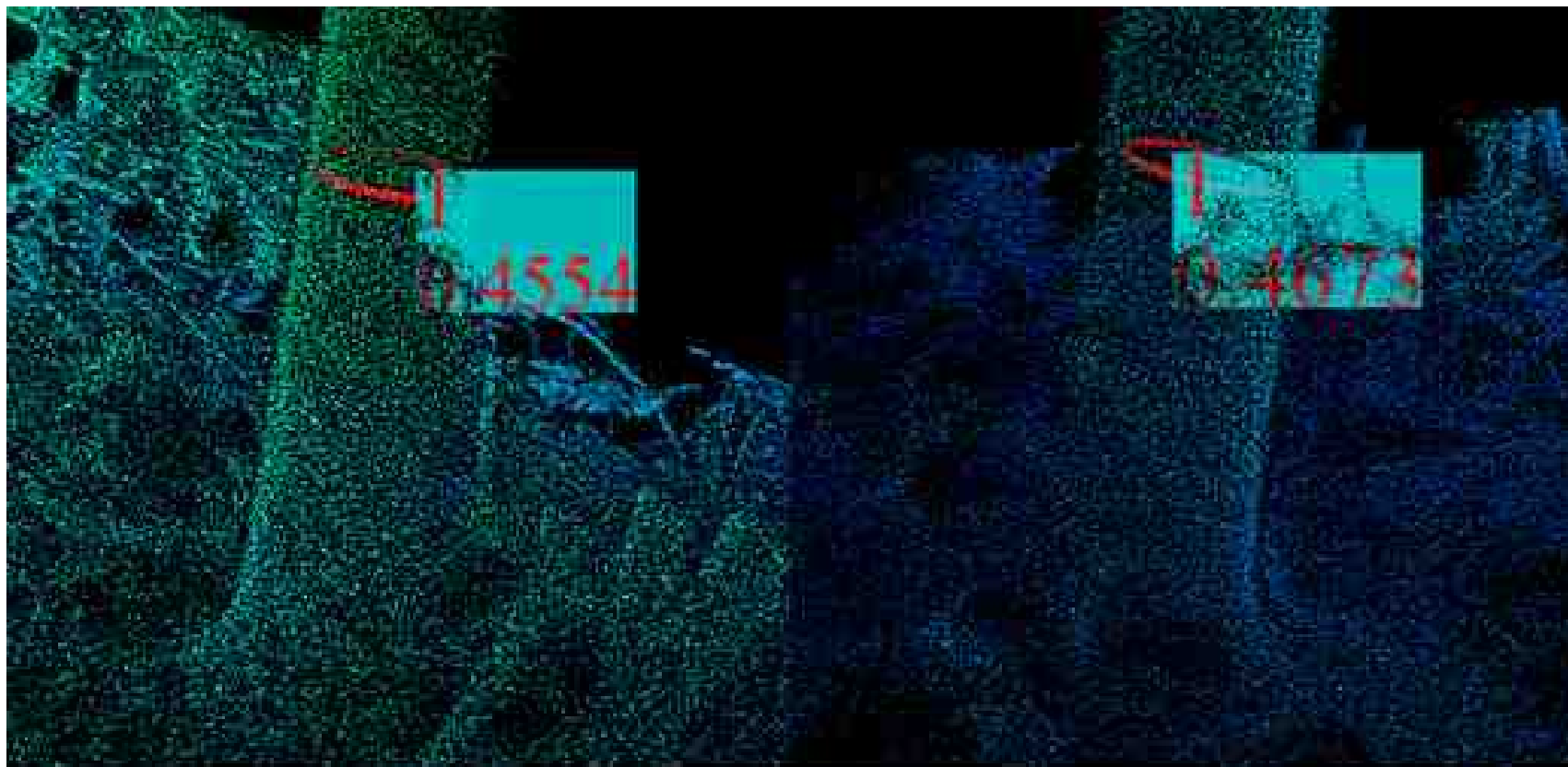


그림 99. 가리왕산 분비나무 개체목1 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

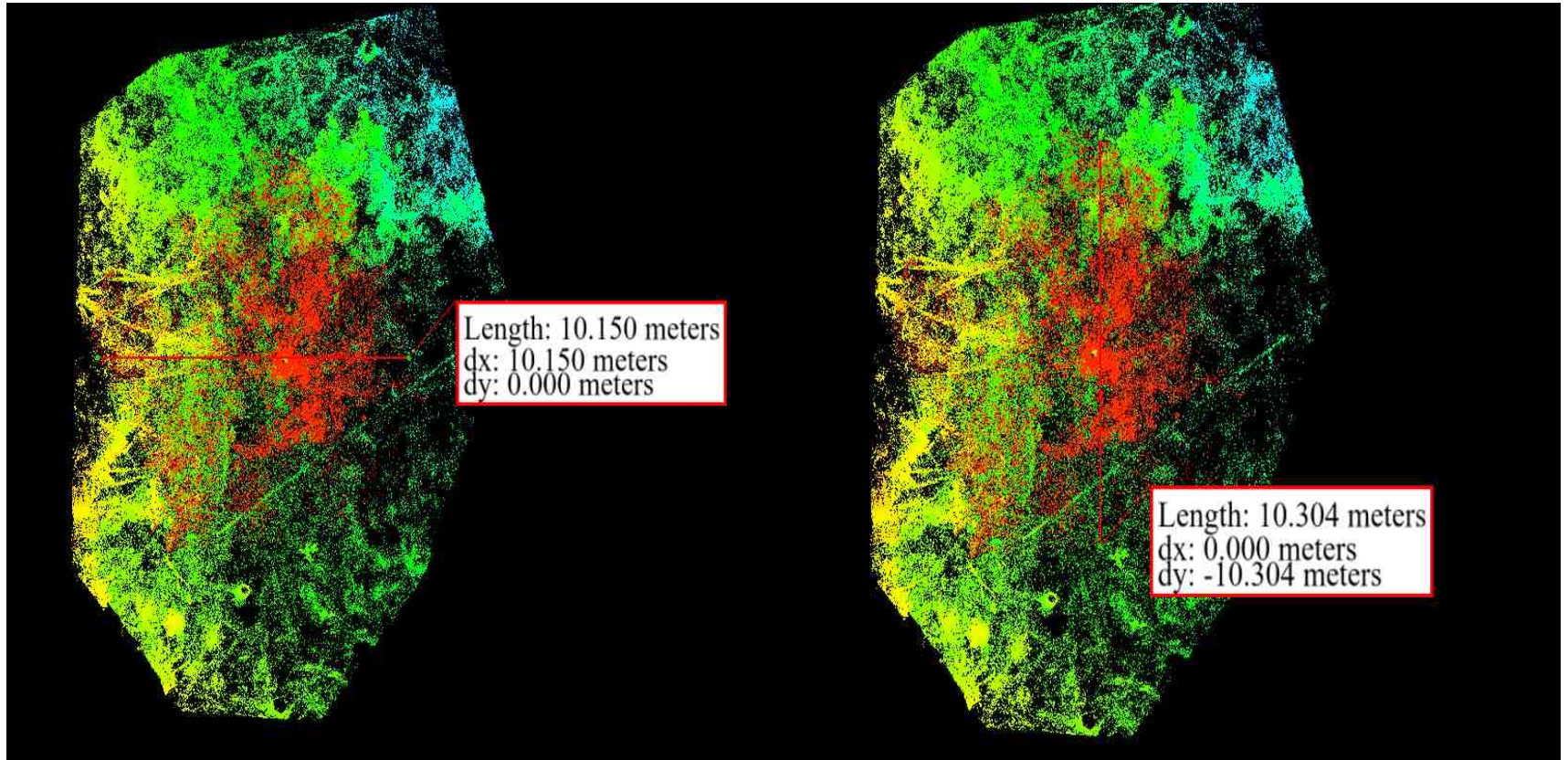


그림 100. 가리왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2022년)

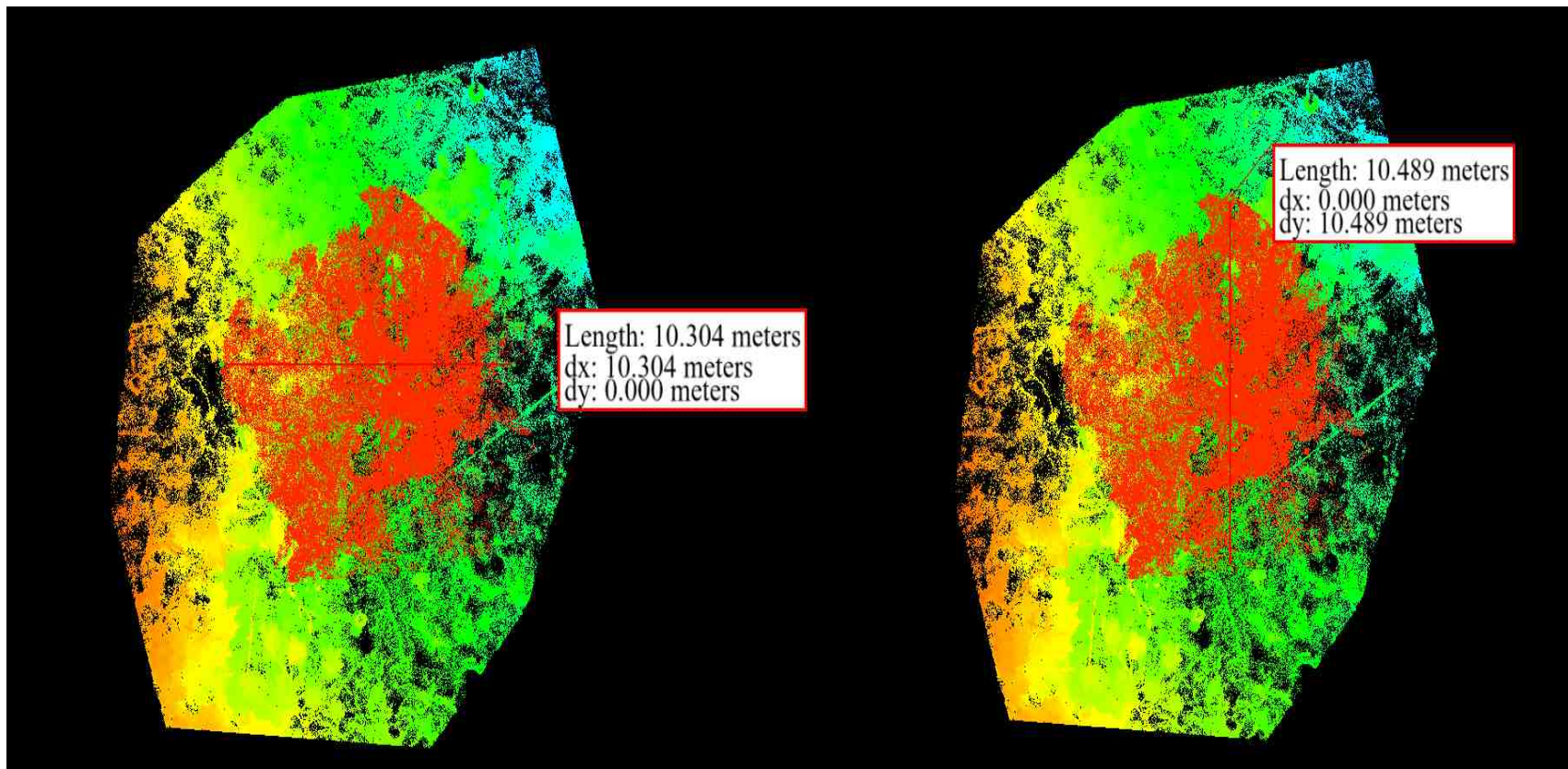


그림 101. 가리왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2023년)

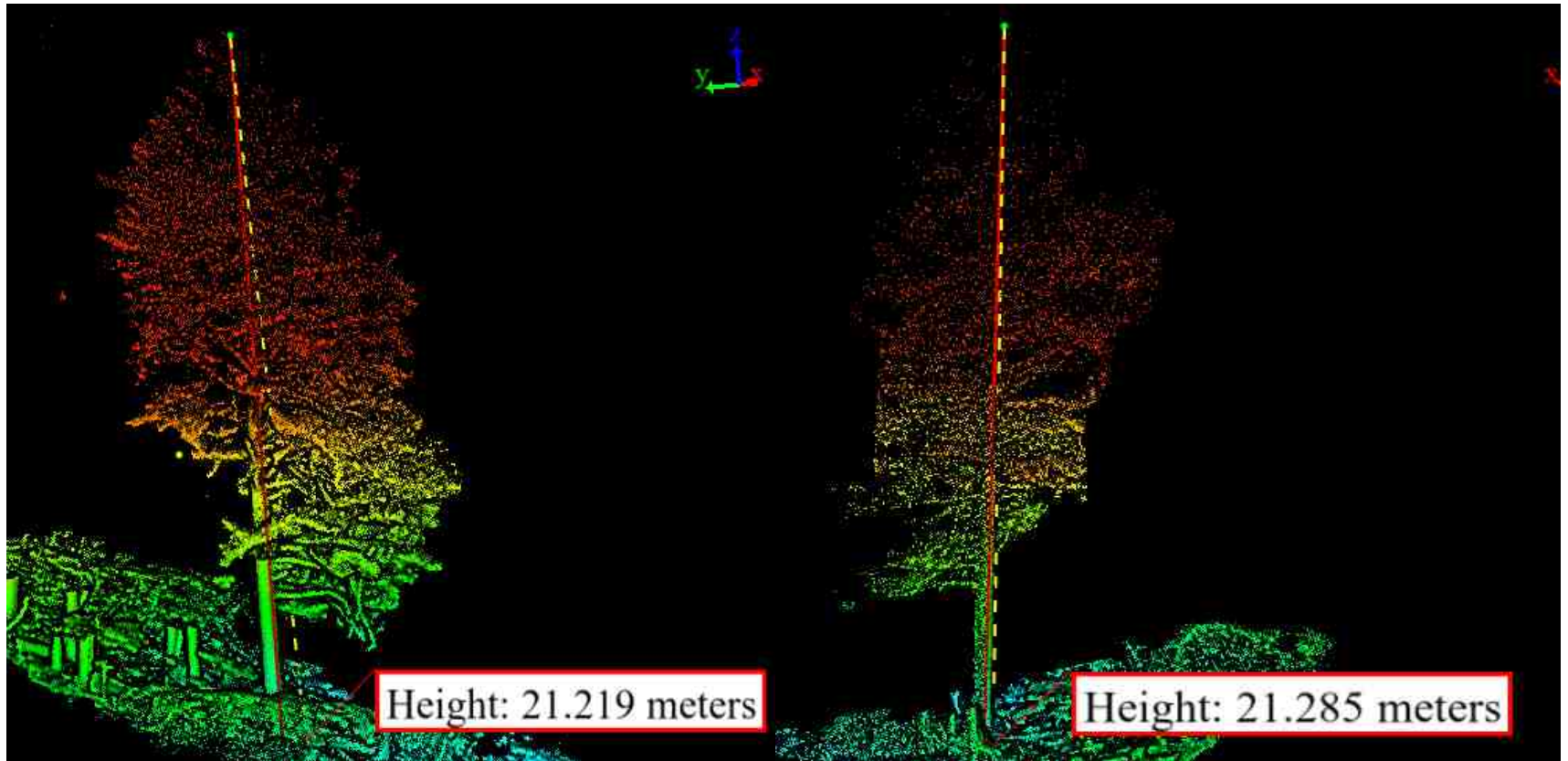


그림 102. 가리왕산 분비나무 개체목2 수고 비교 (2022년 vs 2023년)



그림 103. 가리왕산 분비나무 개체목2 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

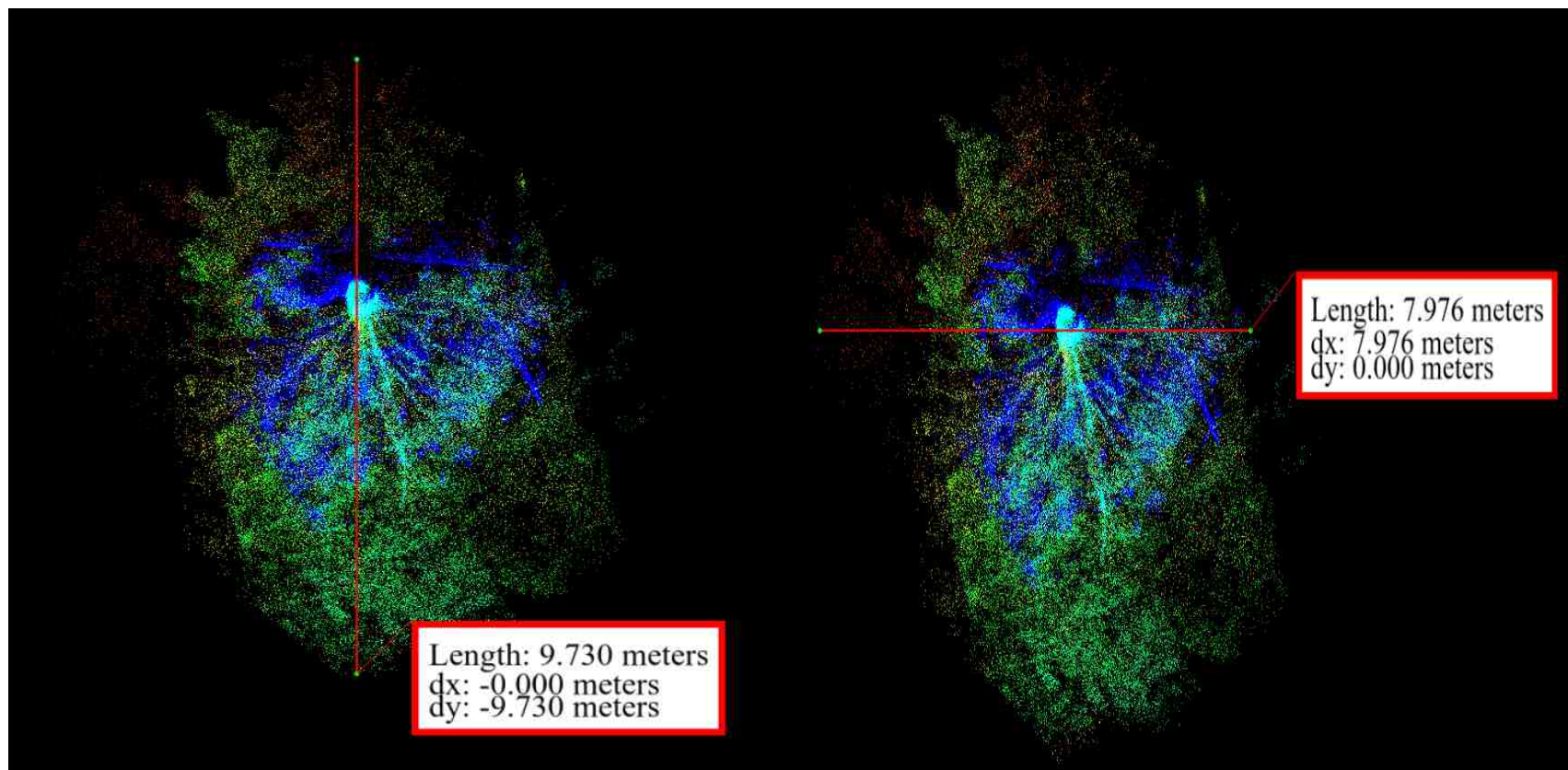


그림 104. 가리왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2022년)

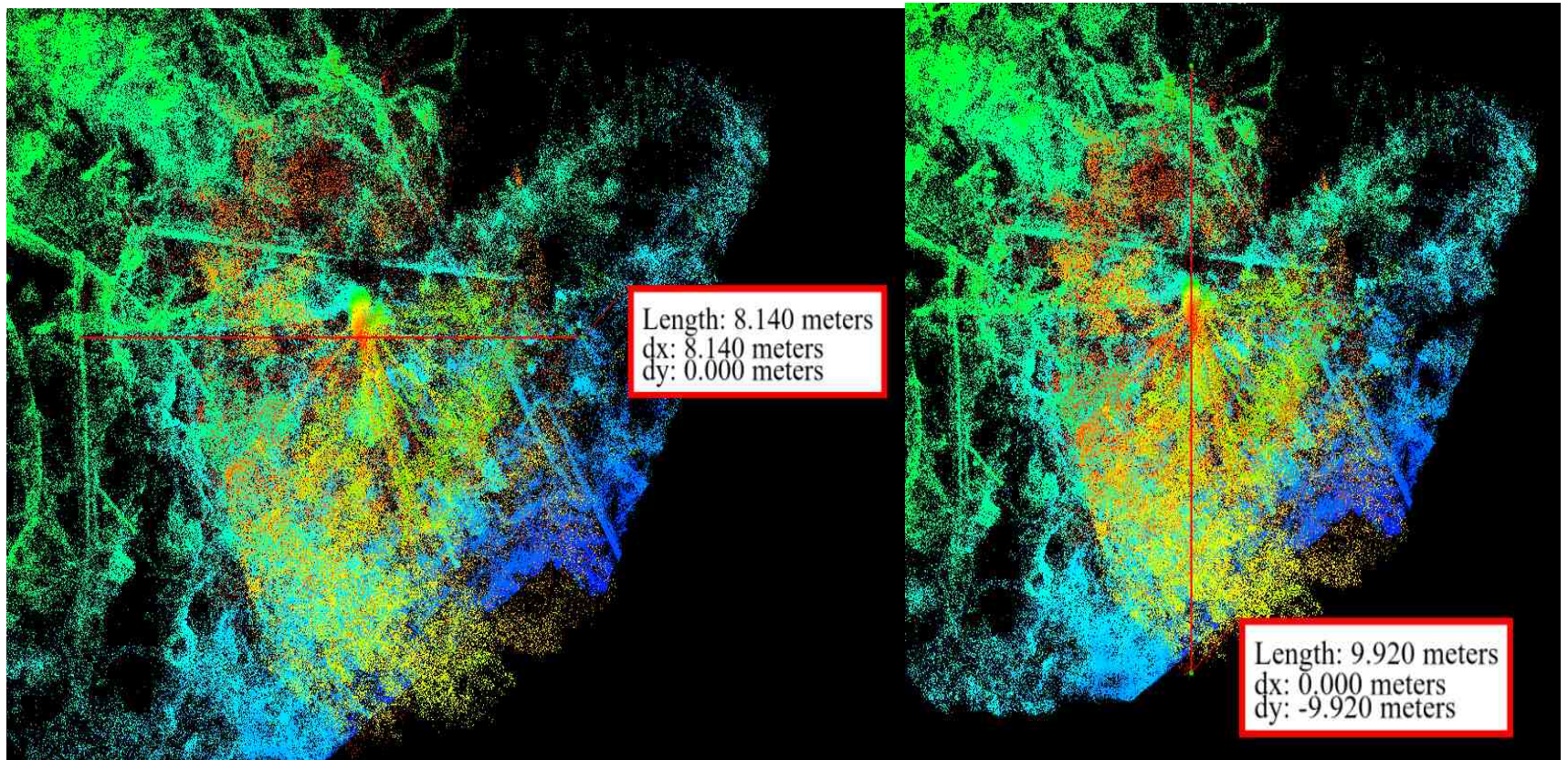


그림 105. 가리왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2023년)

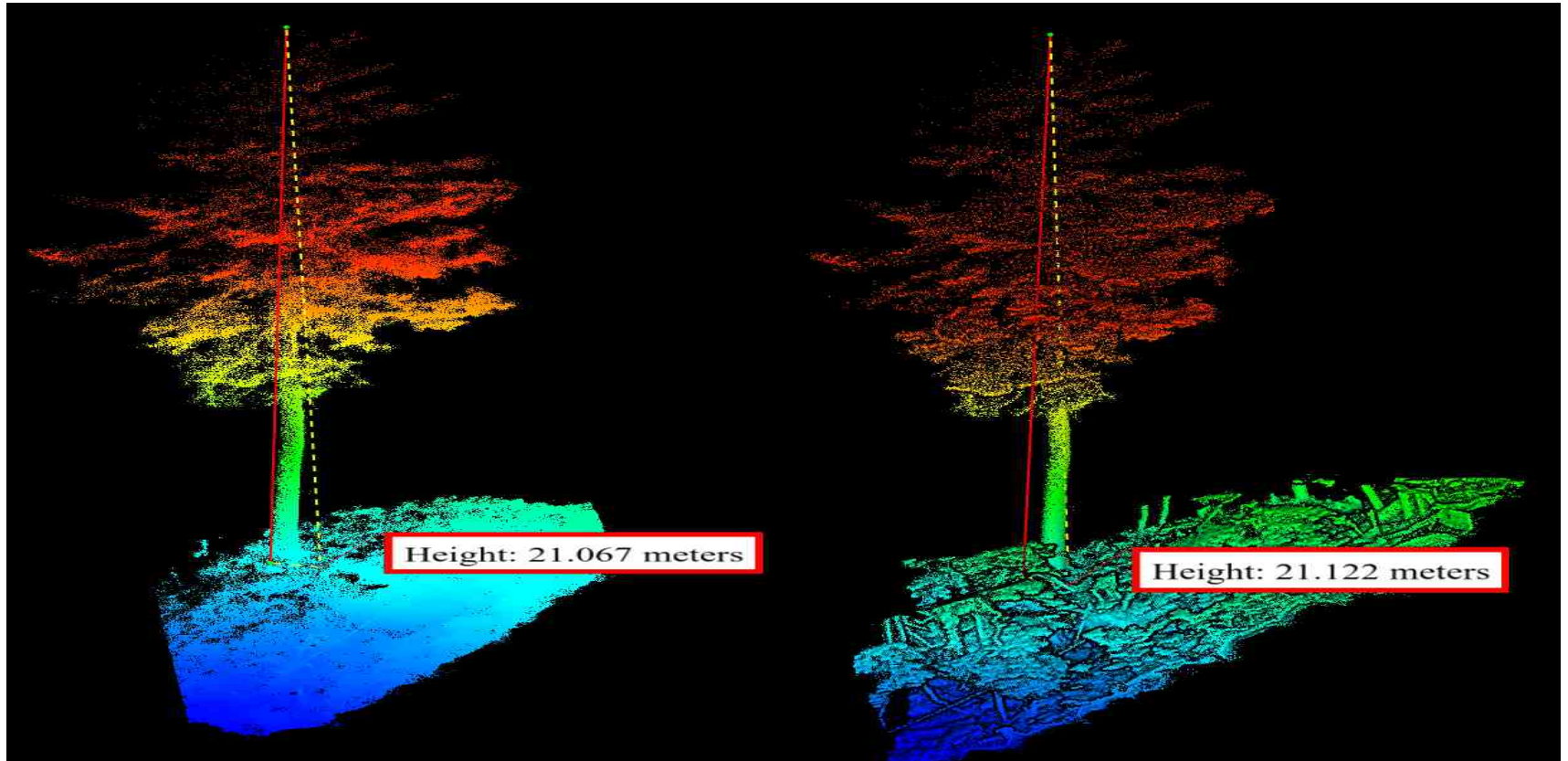


그림 106. 가리왕산 분비나무 개체목3 수고 비교 (2022년 vs 2023년)

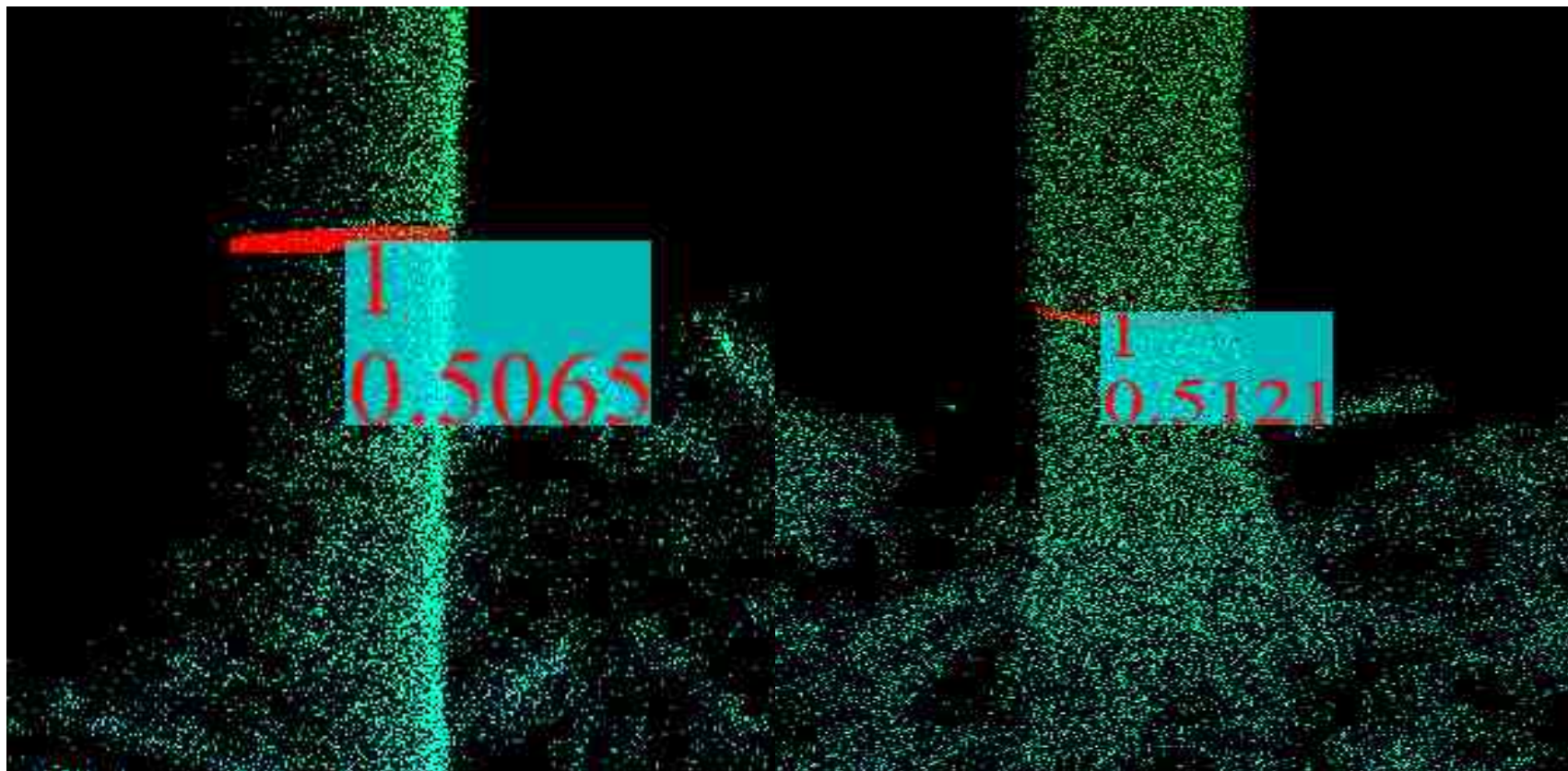


그림 107. 가리왕산 분비나무 개체목3 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

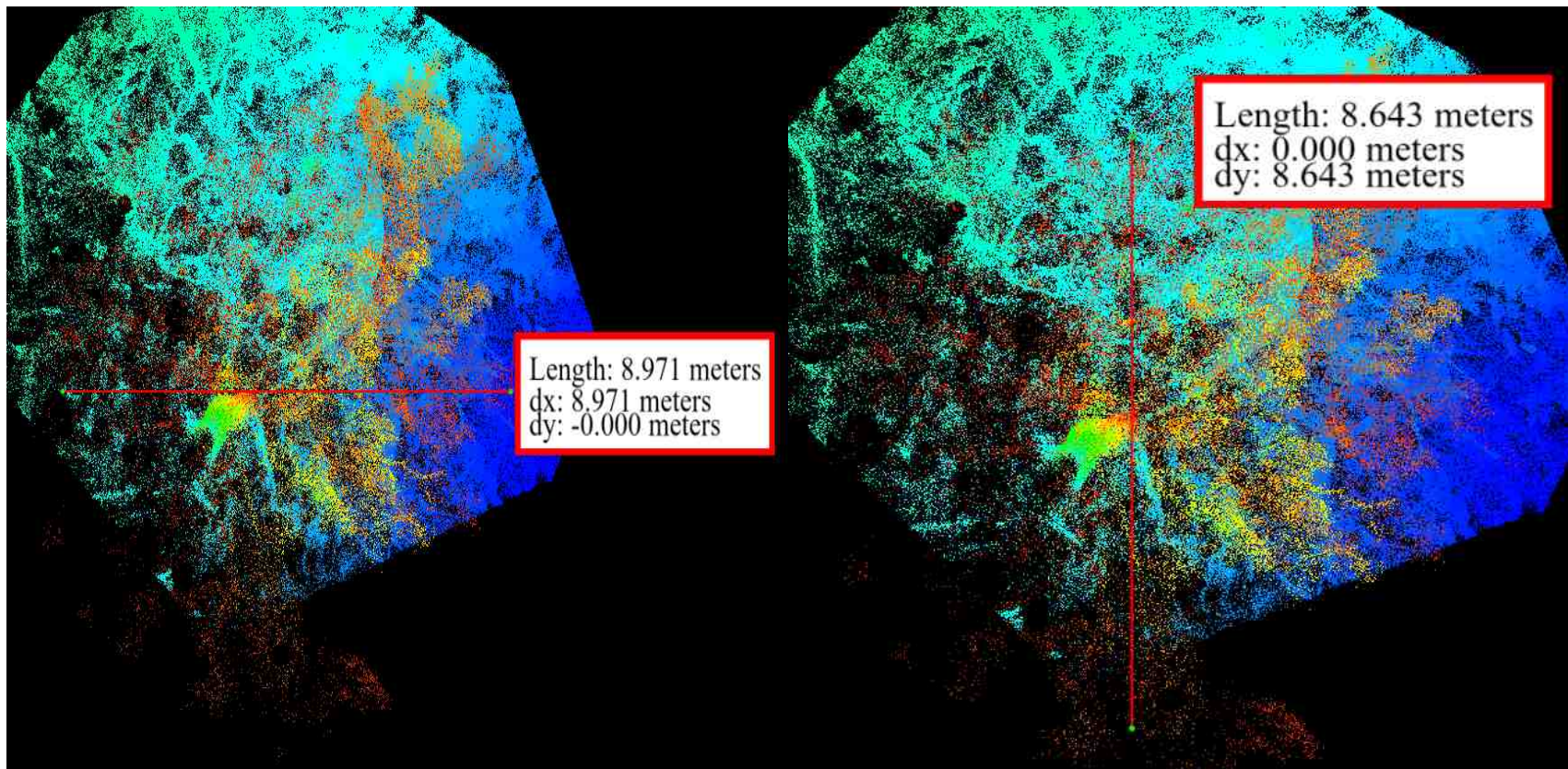


그림 108. 가리왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2022년)

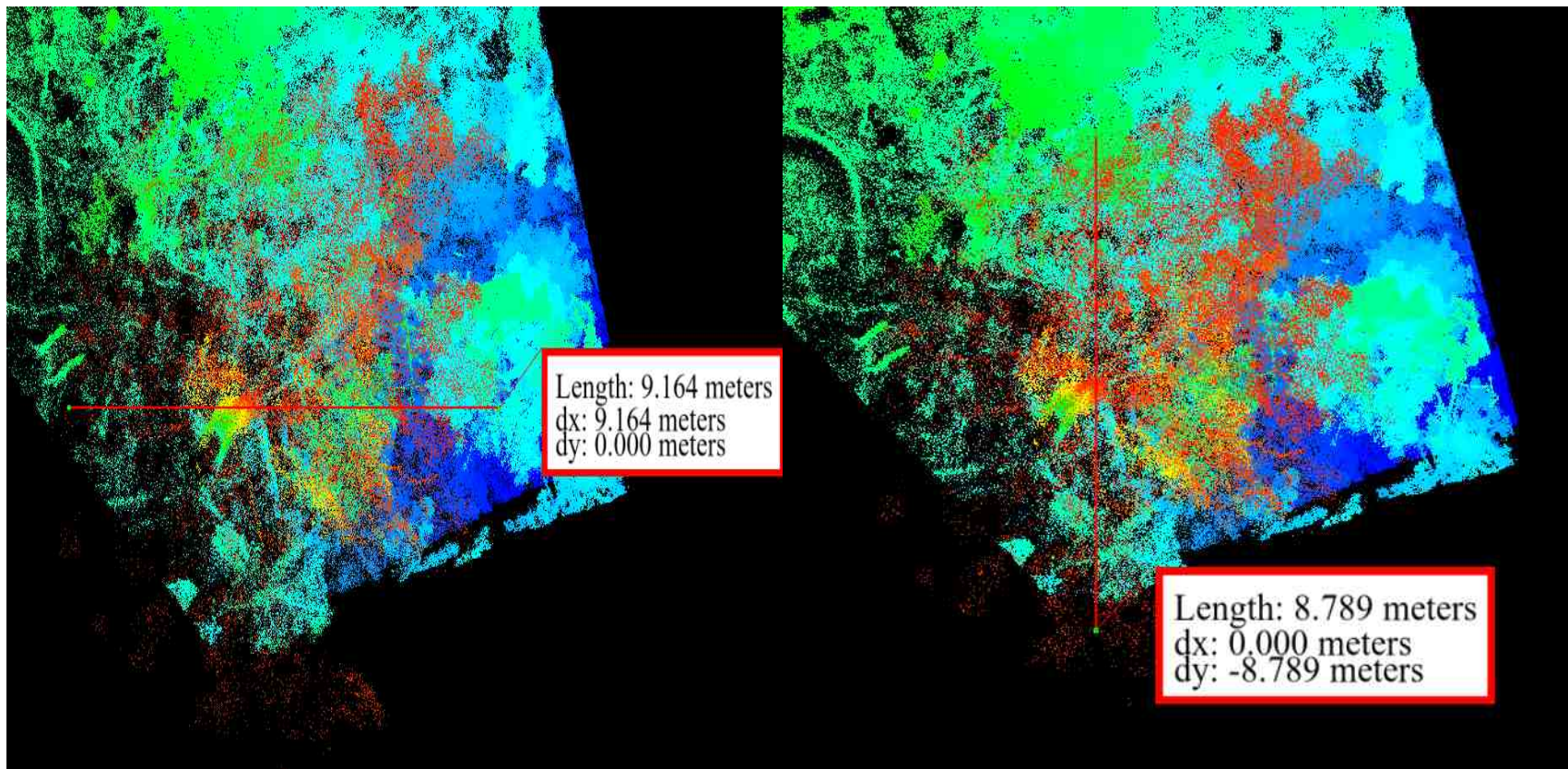


그림 109. 가리왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2023년)

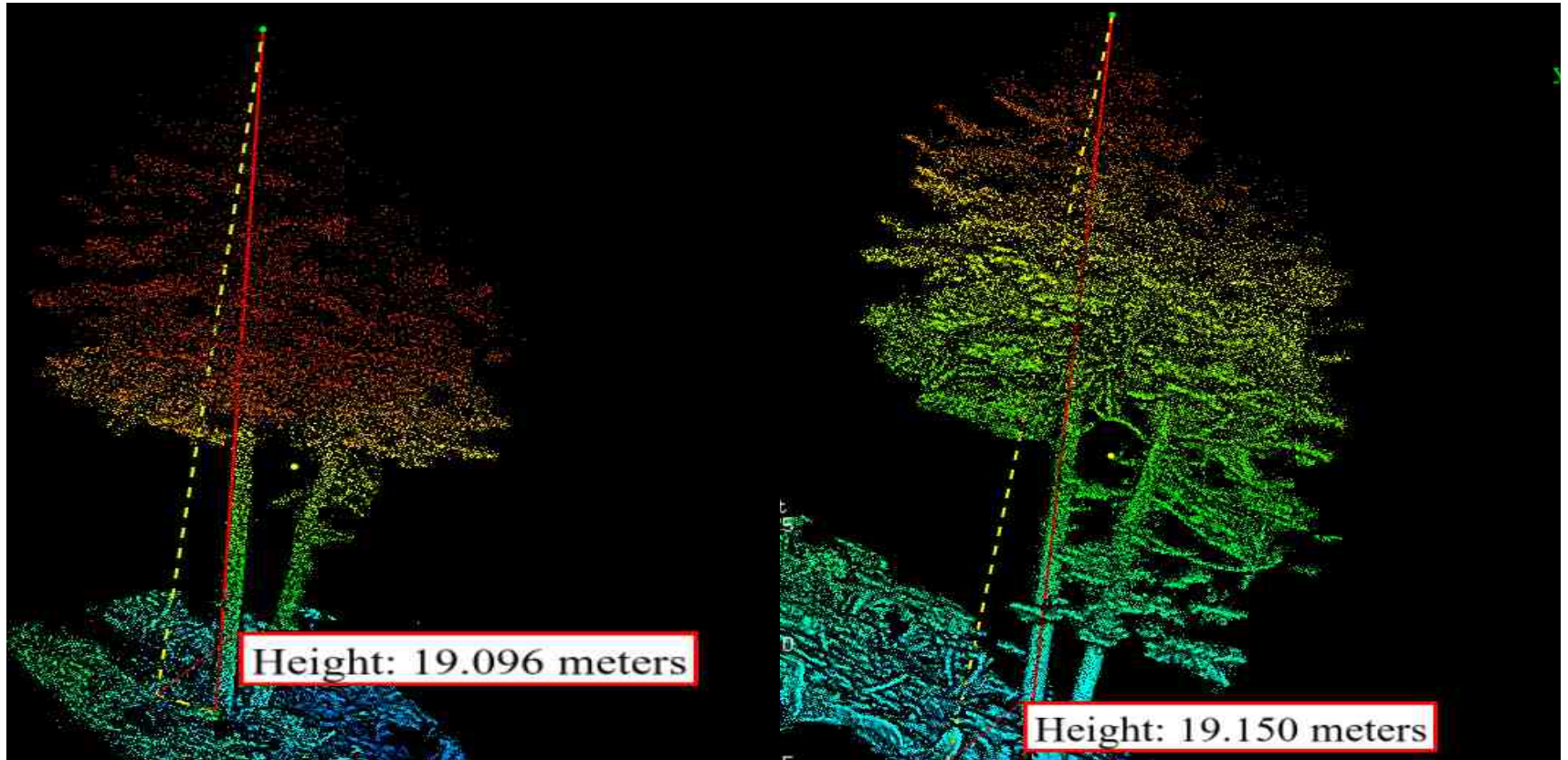


그림 110. 가리왕산 분비나무 개체목4 수고 비교 (2022년 vs 2023년)

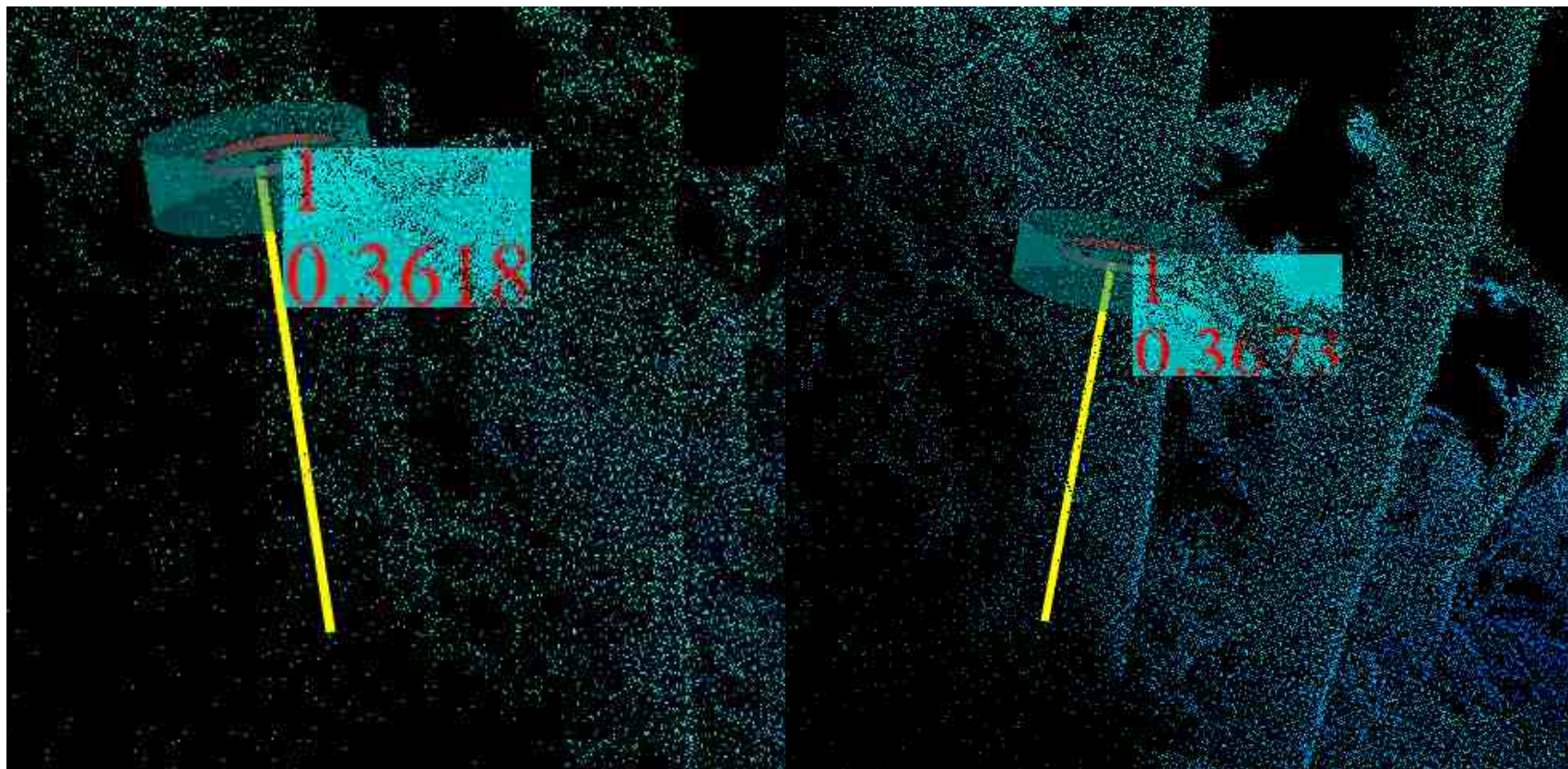


그림 111. 가리왕산 분비나무 개체목4 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

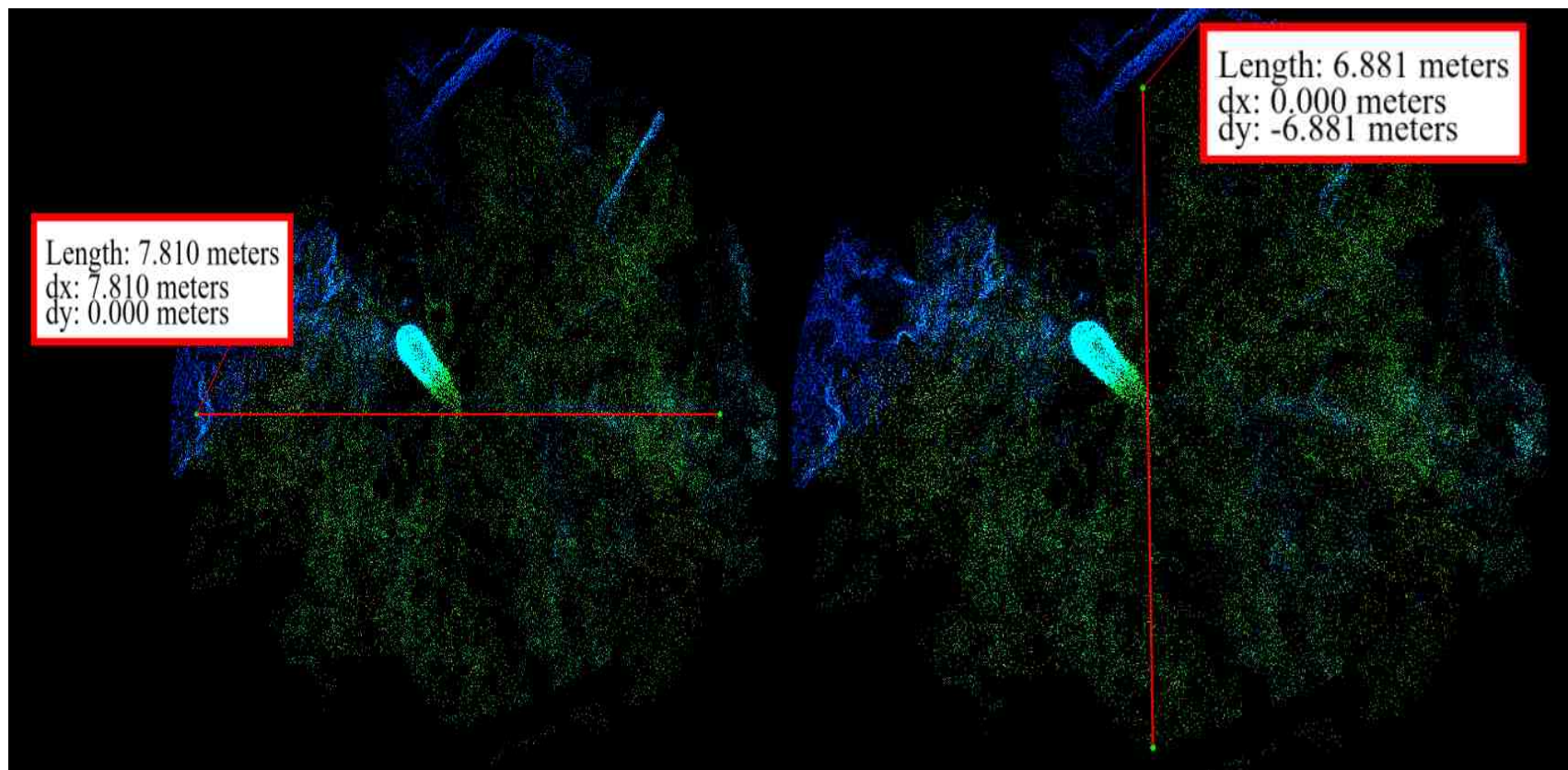


그림 112. 가리왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2022년)

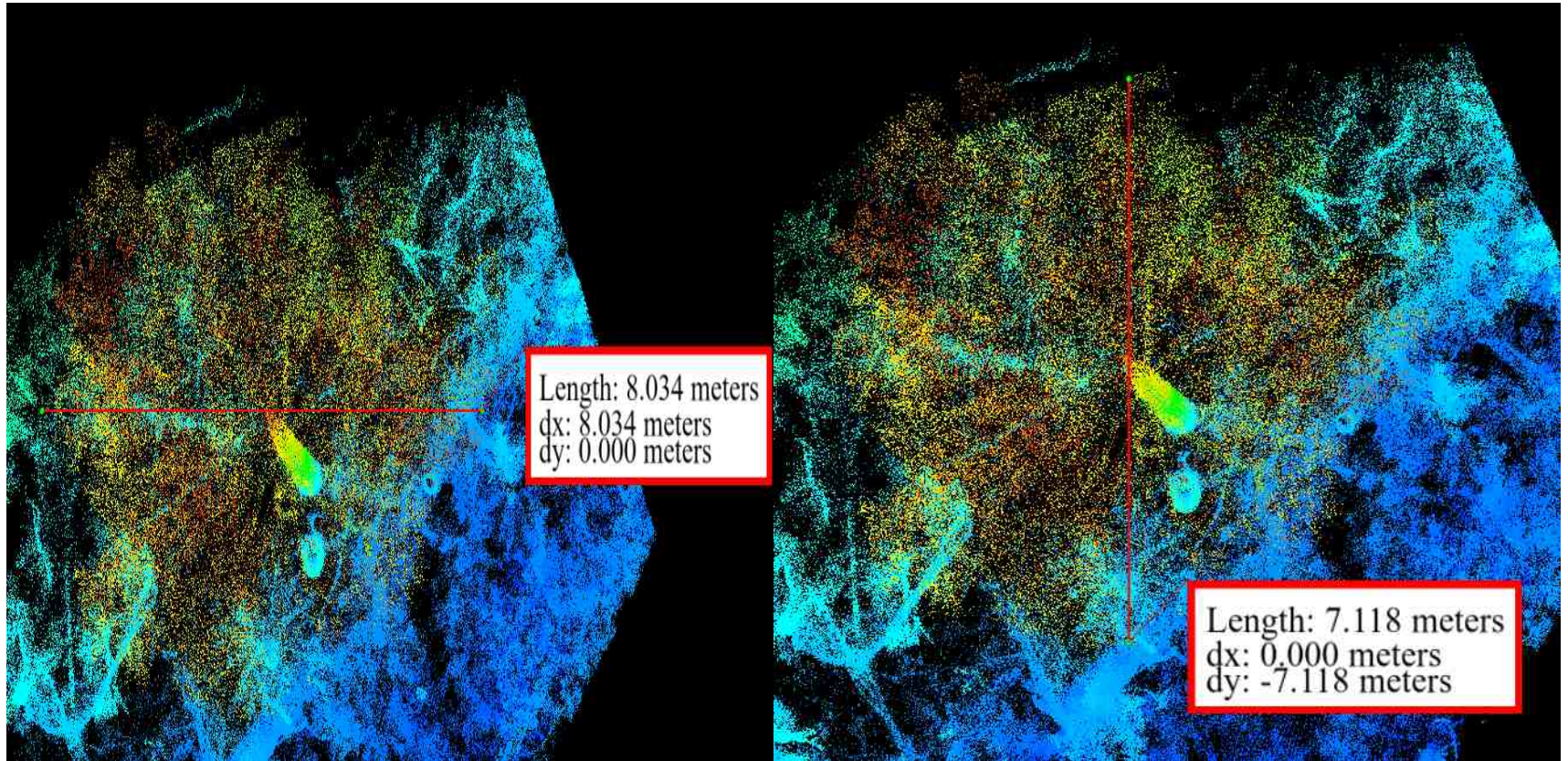


그림 113. 가리왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2023년)

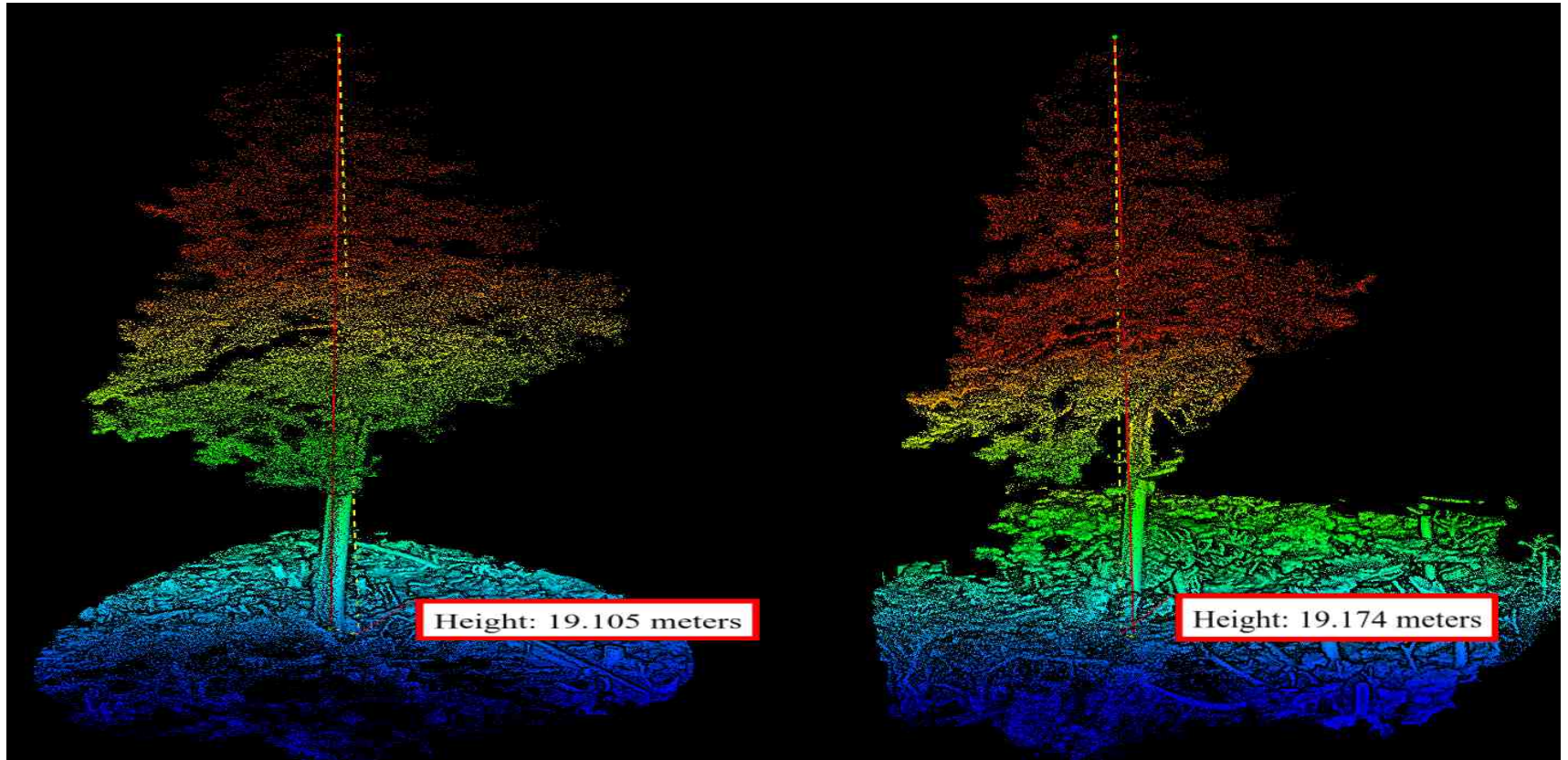


그림 114. 가리왕산 분비나무 개체목5 수고 비교 (2022년 vs 2023년)

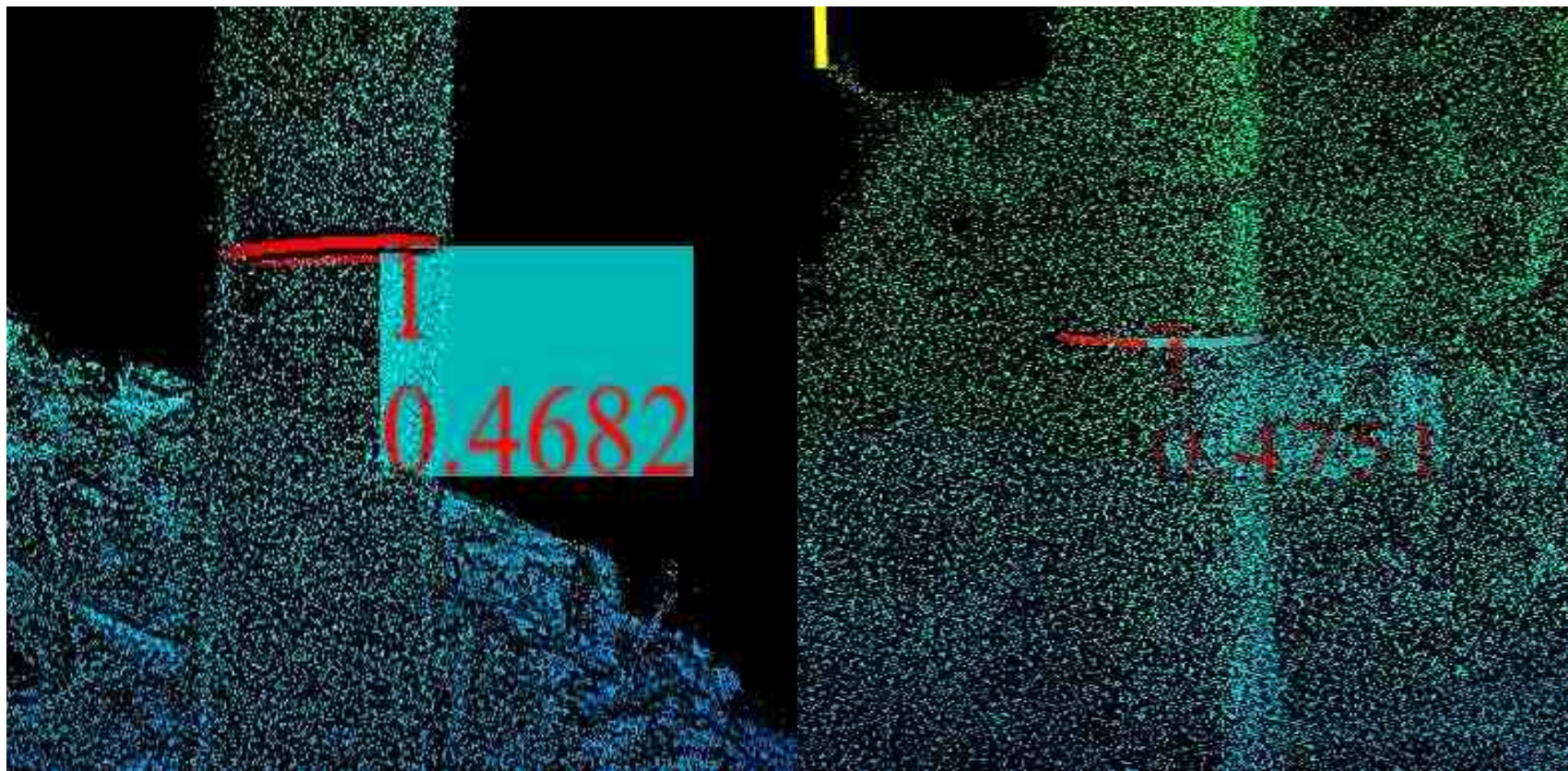


그림 115. 가리왕산 분비나무 개체목5 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

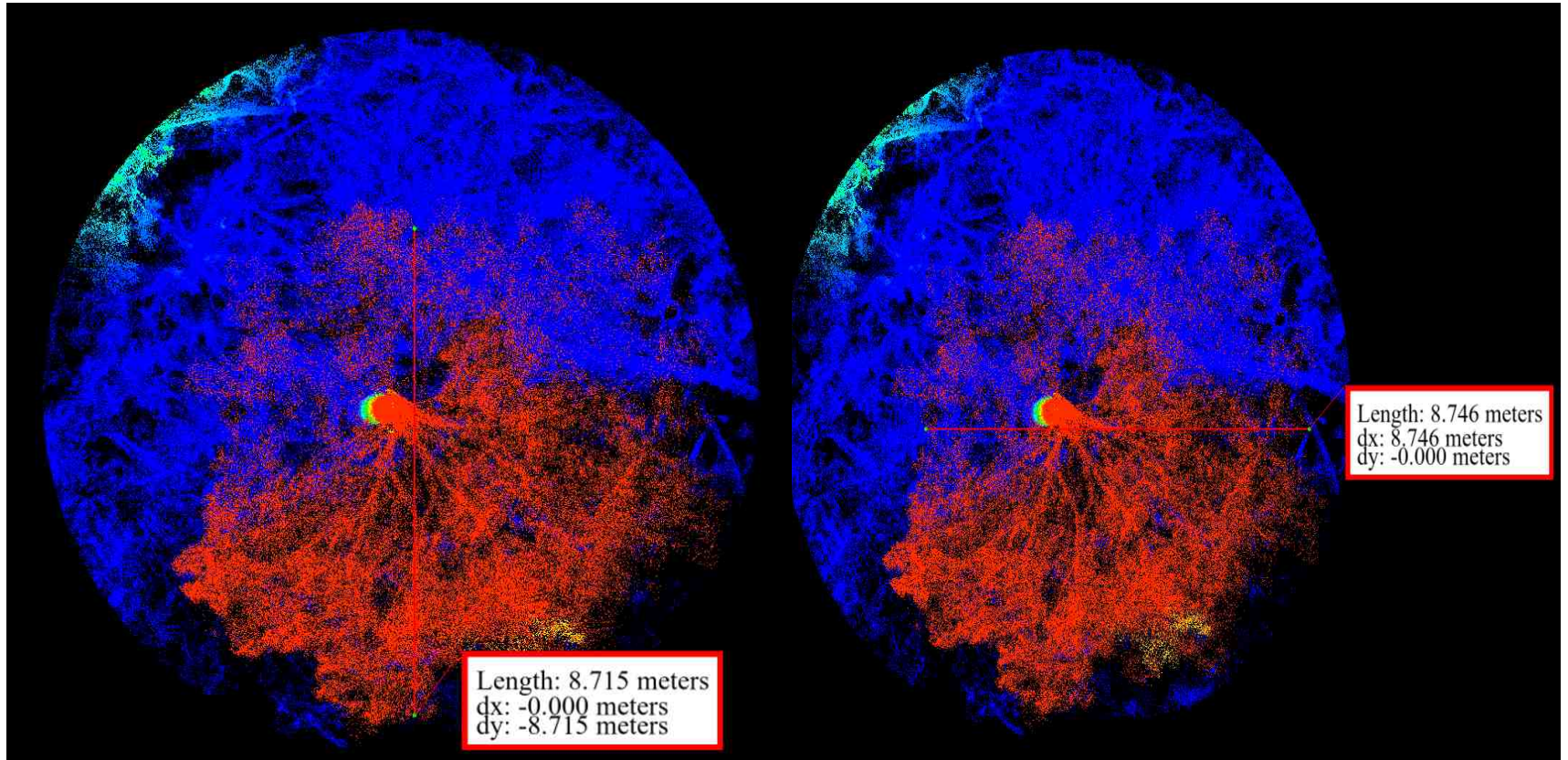


그림 116. 가리왕산 분비나무 개체목 5 수관폭(2022년)

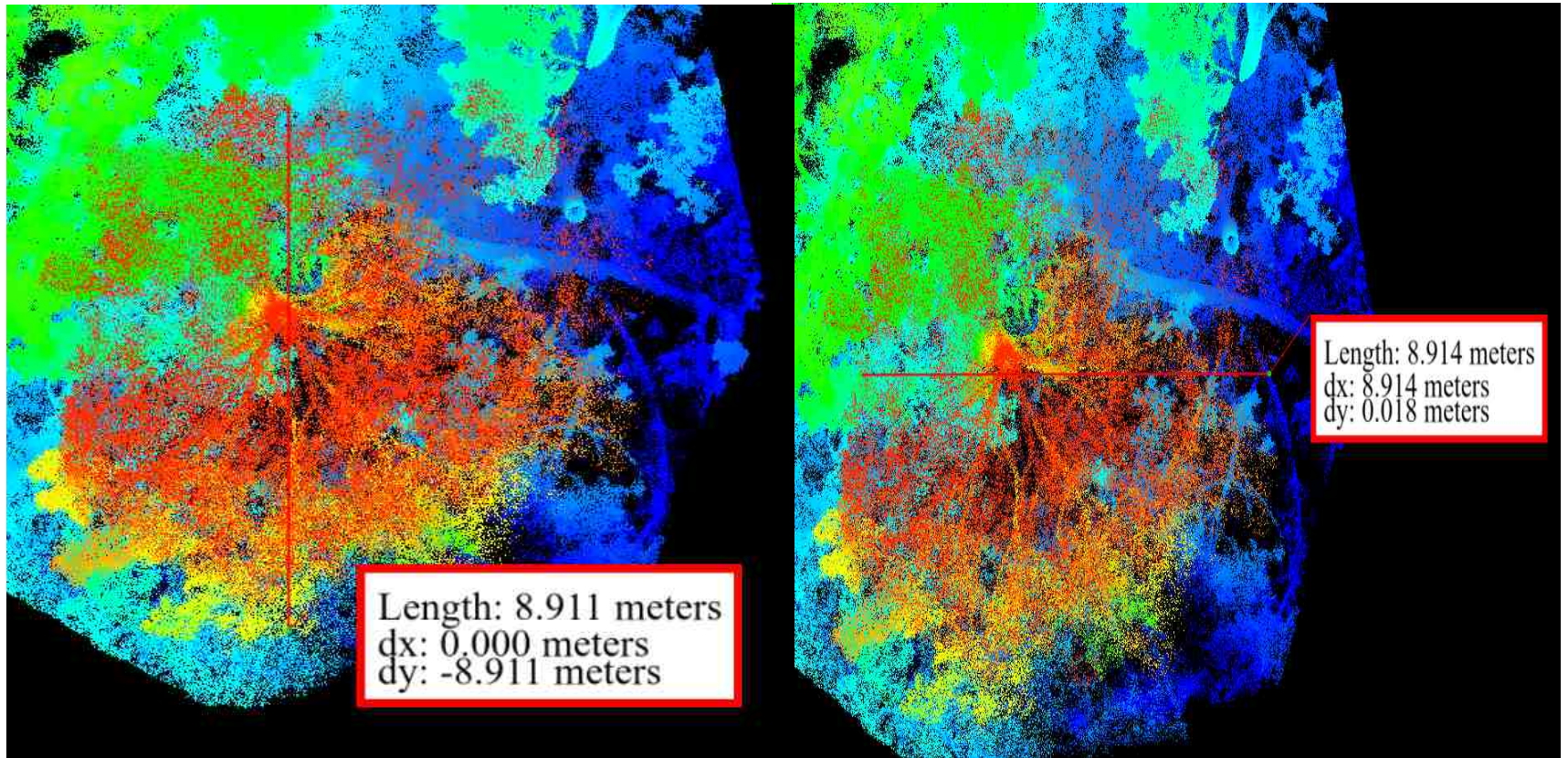


그림 117. 가리왕산 분비나무 개체목5 수관폭 (2023년)

표 34. 가리왕산 분비나무림 내 개체목 5개에 대한 비교 (2022년 vs 2023년)

		2022년		2023년		차이 (2023년-2022년)
수고 (m)	1	20.221	1	20.299		0.078
	2	21.219	2	21.285		0.066
	3	21.067	3	21.122		0.055
	4	19.096	4	19.150		0.054
	5	19.105	5	19.174		0.069
DBH (m)	1	0.4554	1	0.4673		0.0119
	2	0.4369	2	0.4411		0.0042
	3	0.5065	3	0.5121		0.0056
	4	0.3618	4	0.3671		0.0053
	5	0.4687	5	0.4751		0.0064
수관폭 (m)	가로	1	10.150	1	10.304	0.154
		2	7.976	2	8.140	0.164
		3	8.971	3	9.164	0.193
		4	7.810	4	8.034	0.224
		5	8.746	5	8.914	0.168
	세로	1	10.304	1	10.489	0.185
		2	9.730	2	9.920	0.190
		3	8.643	3	8.789	0.146
		4	6.881	4	7.118	0.237
		5	8.715	5	8.911	0.196

작년(2022년)과 올해(2023년) 라이다 데이터 기반 개체목 비교 결과는 표2와 같다. 5개 개체목에 대하여 수고는 평균 0.0644m로 6.44cm, DBH는 평균 0.0067m로 0.67cm, 수관폭은 가로와 세로를 포함하여 평균 약 0.1857m로 18.57cm 정도 성장한 것으로 나타났다. 시계열 DB 구축을 통한 개체목 정밀 모니터링 가능성이 확인되나 해당 수치들의 차이가 미비하여 결과를 명확하게 도출하기에는 어렵다고 생각된다. 따라서 향후에는 장기적으로 데이터를 구축해야할 것으로 사료된다. 또한, 다분광 센서 등 다양한 센서들과의 결합을 통해 개체목 및 임분단위의 점군 데이터 분석 고도화가 요구된다.

2) 발왕산 분비나무

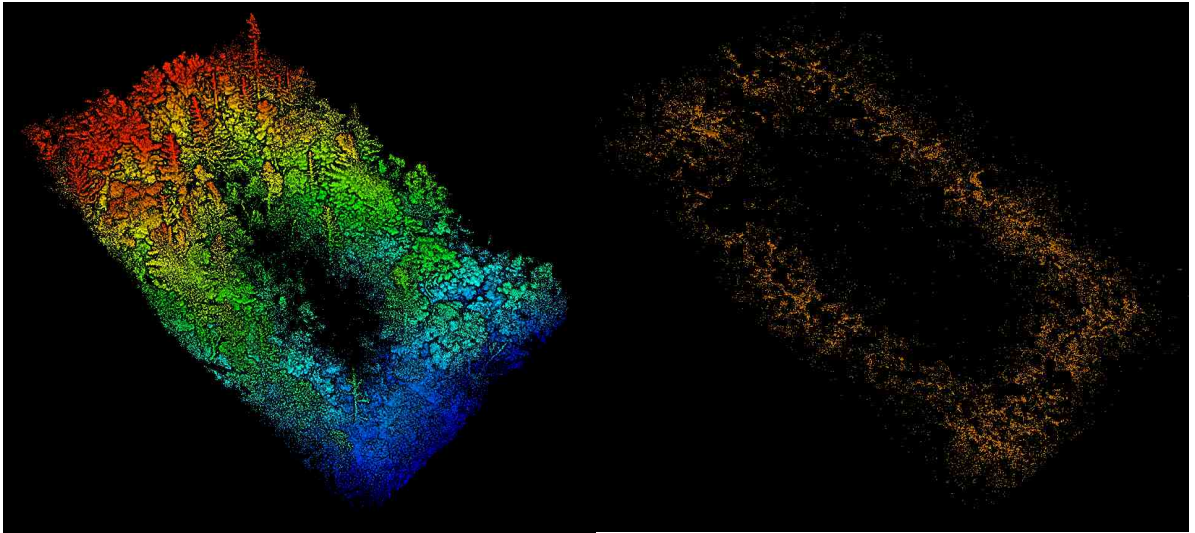


그림 118. 발왕산 분비나무 점군 데이터 원본 및 ground point 분류 결과

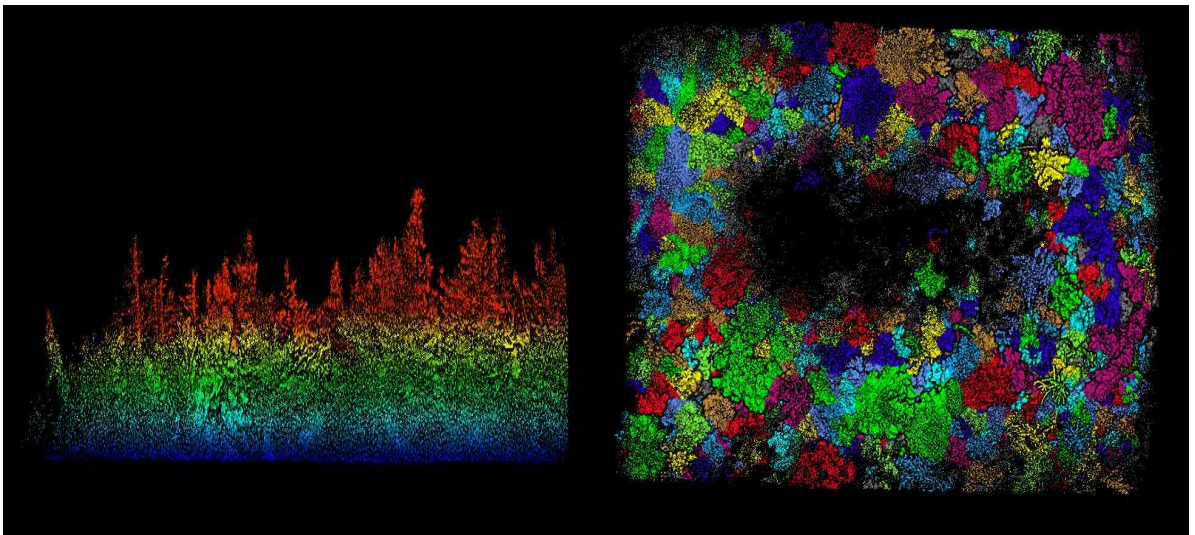


그림 119. 발왕산 분비나무 Normalization 및 segmentation 결과

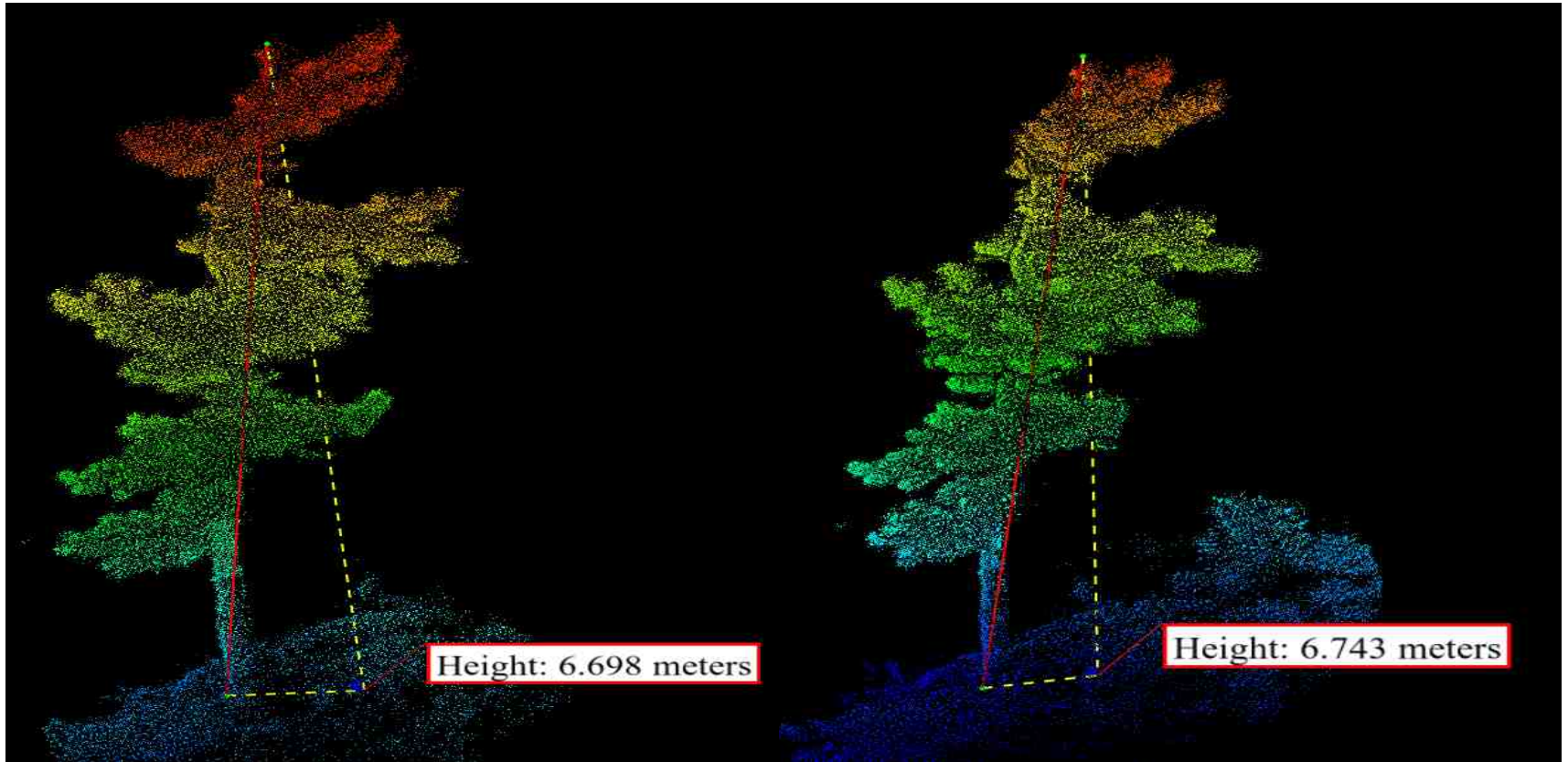


그림 120. 발왕산 분비나무 개체목1 수고 비교 (2022년 vs 2023년)

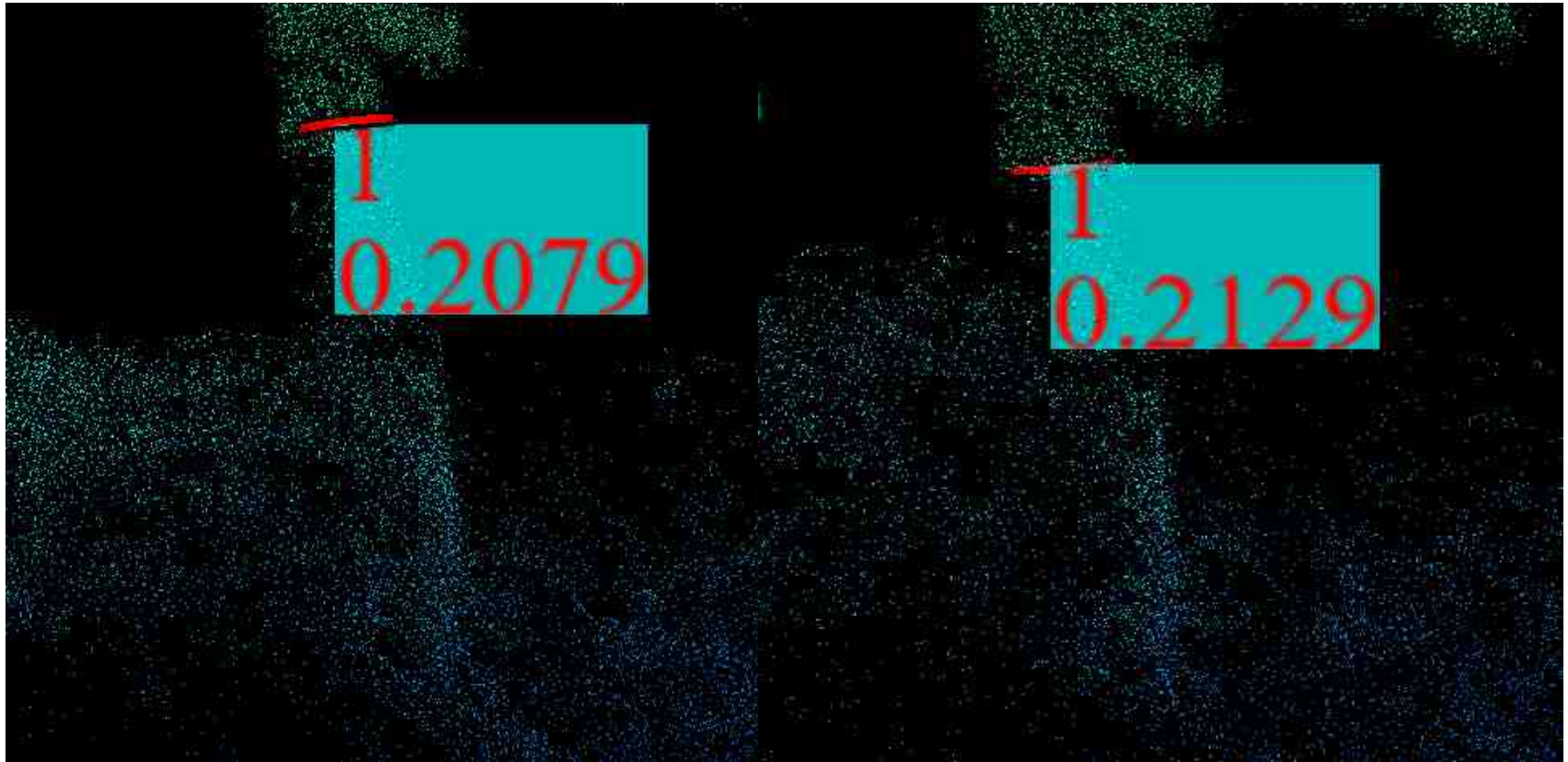


그림 121. 발왕산 분비나무 개체목1 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

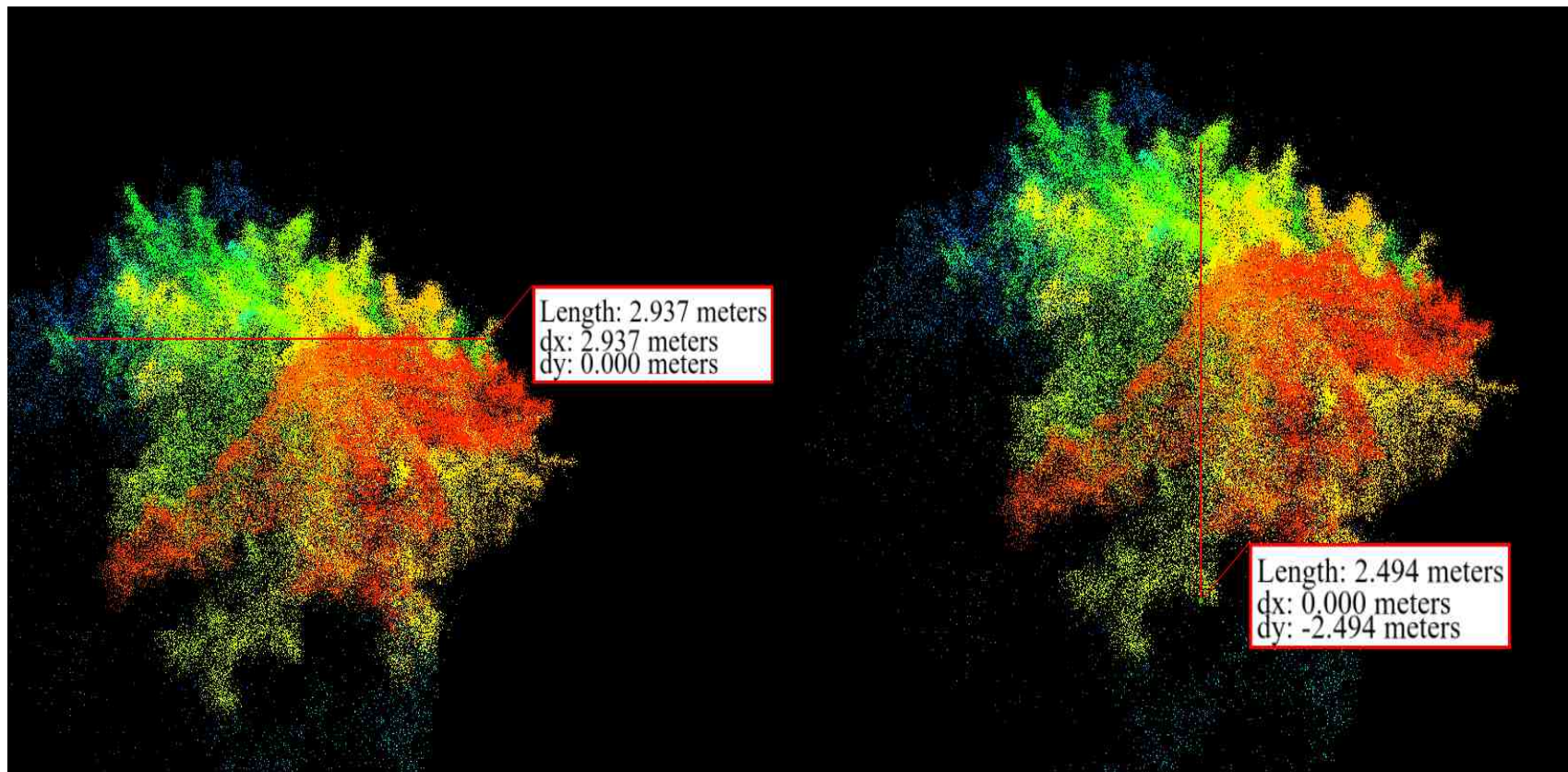


그림 122. 발왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2022년)

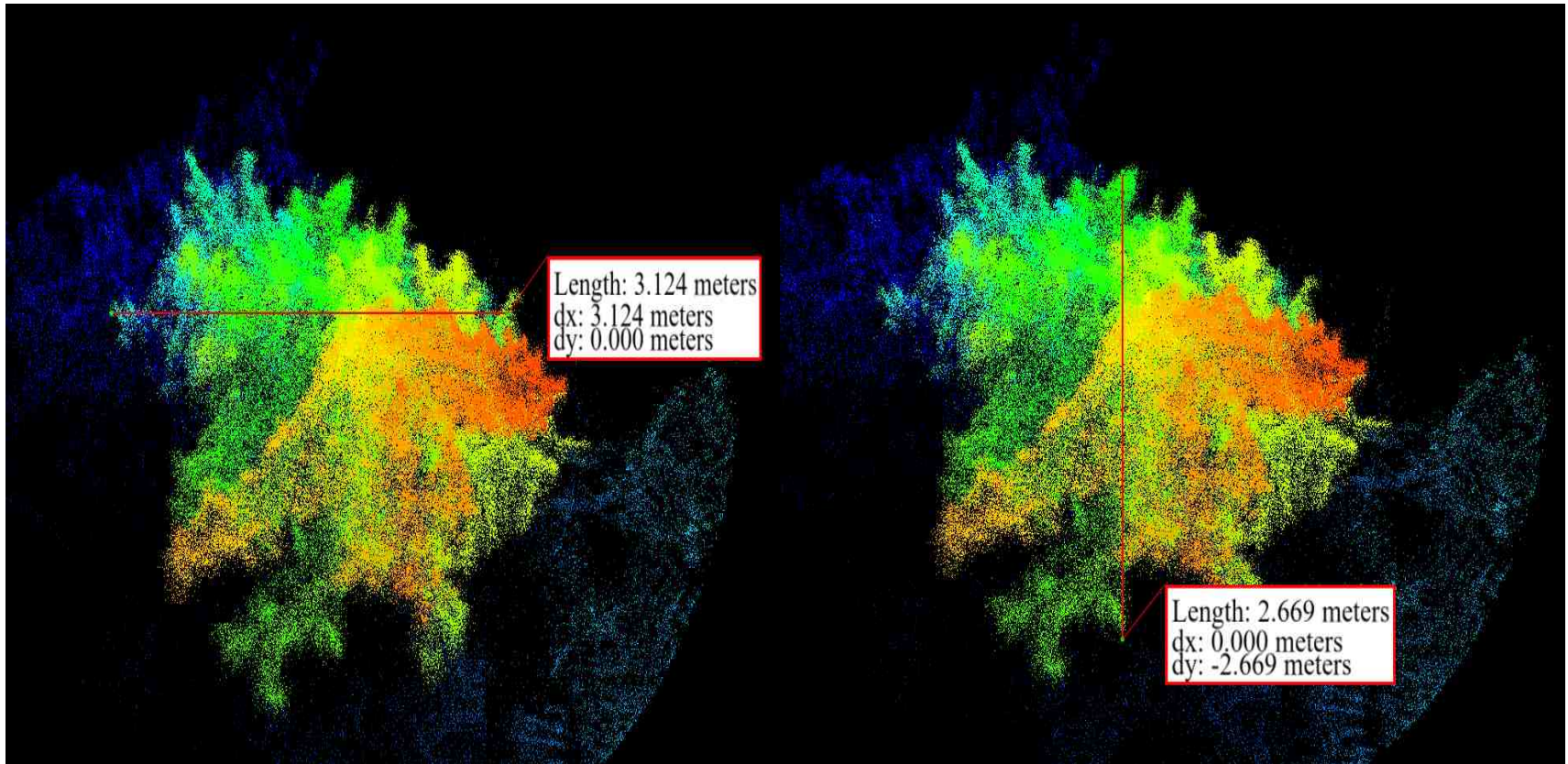


그림 123. 발왕산 분비나무 개체목1 수관폭 (2023년)

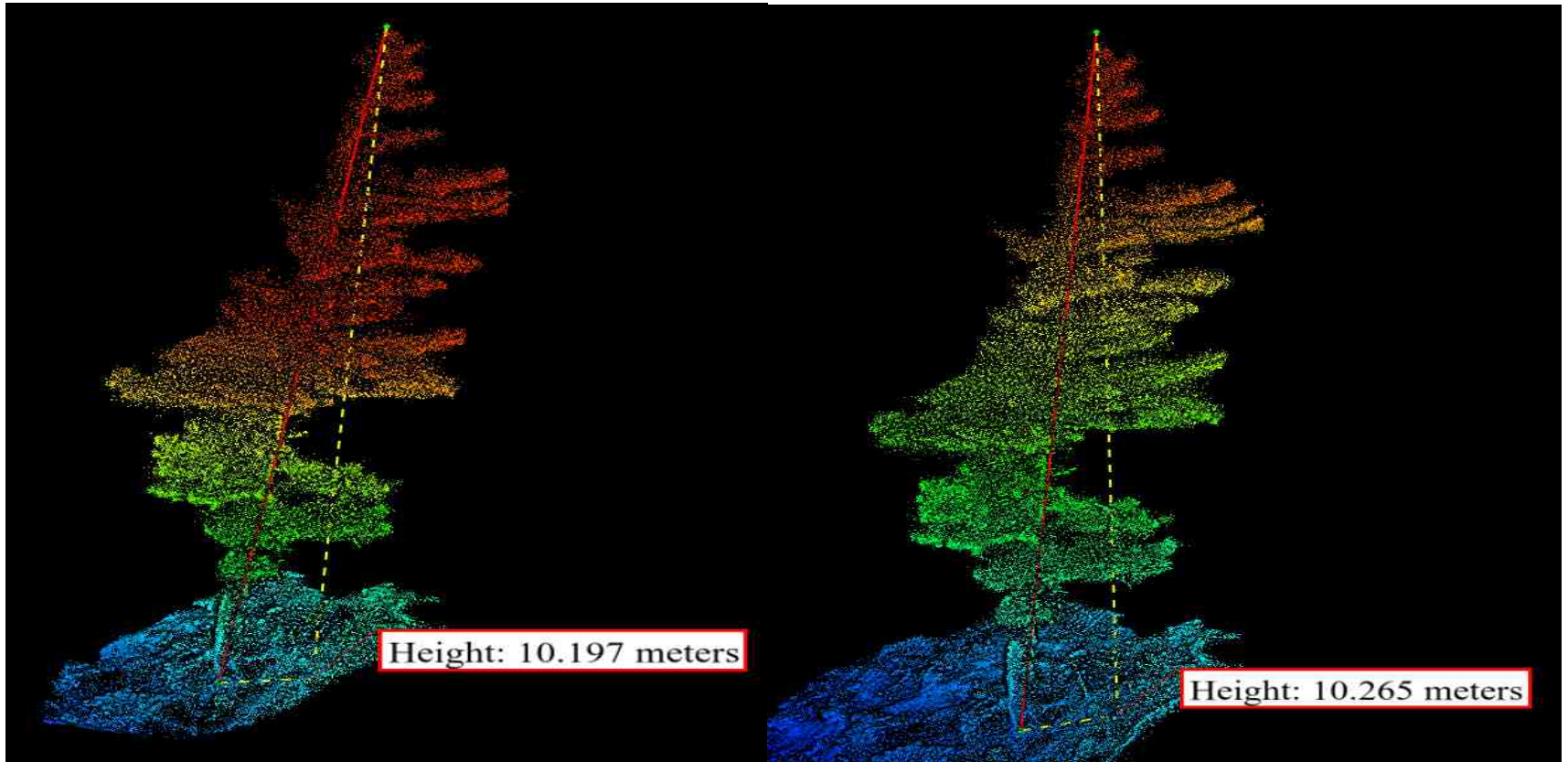


그림 124. 발왕산 분비나무 개체목2 수고 비교 (2022년 vs 2023년)



그림 125. 발왕산 분비나무 개체목2 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

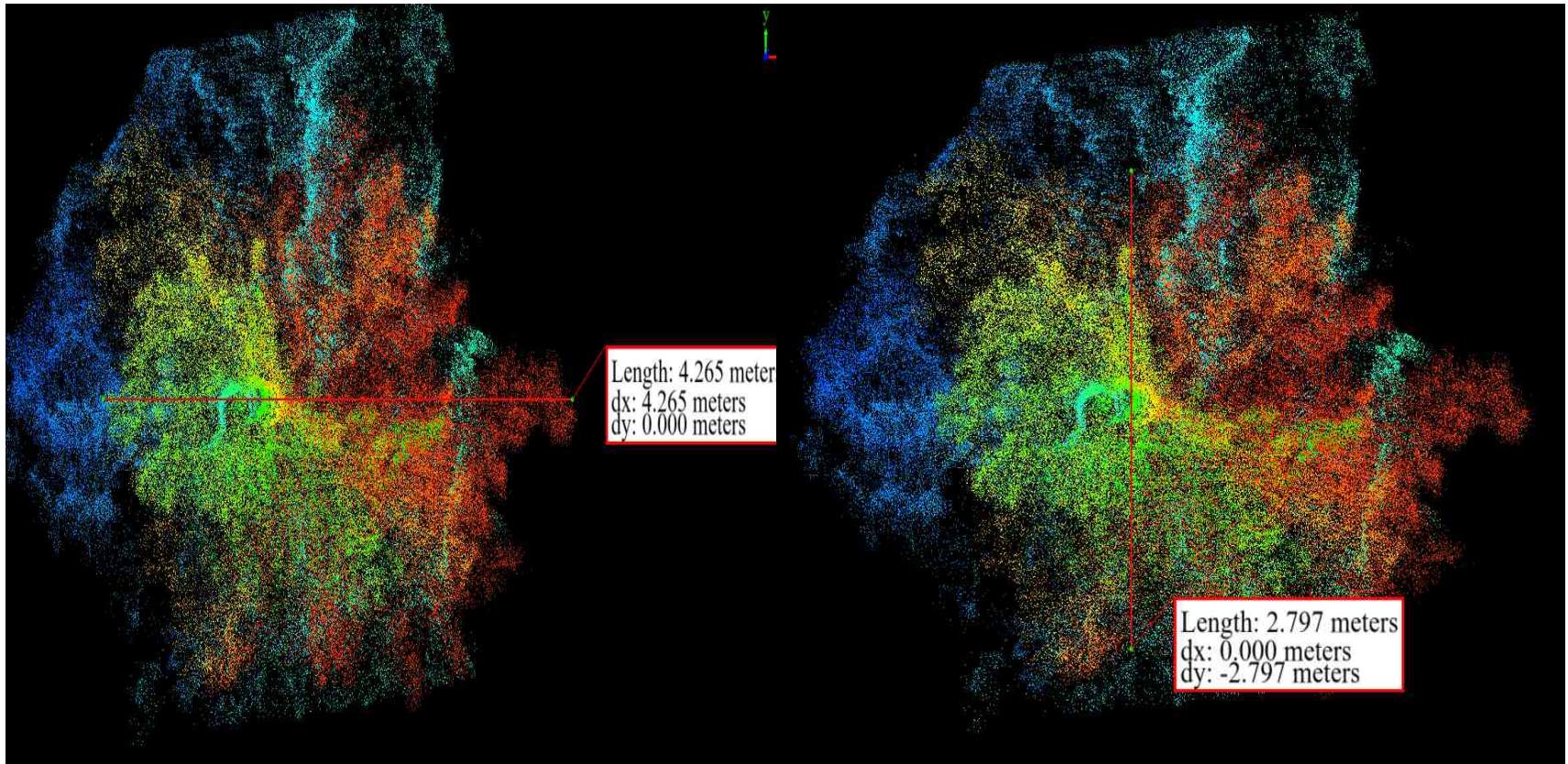


그림 126. 발왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2022년)

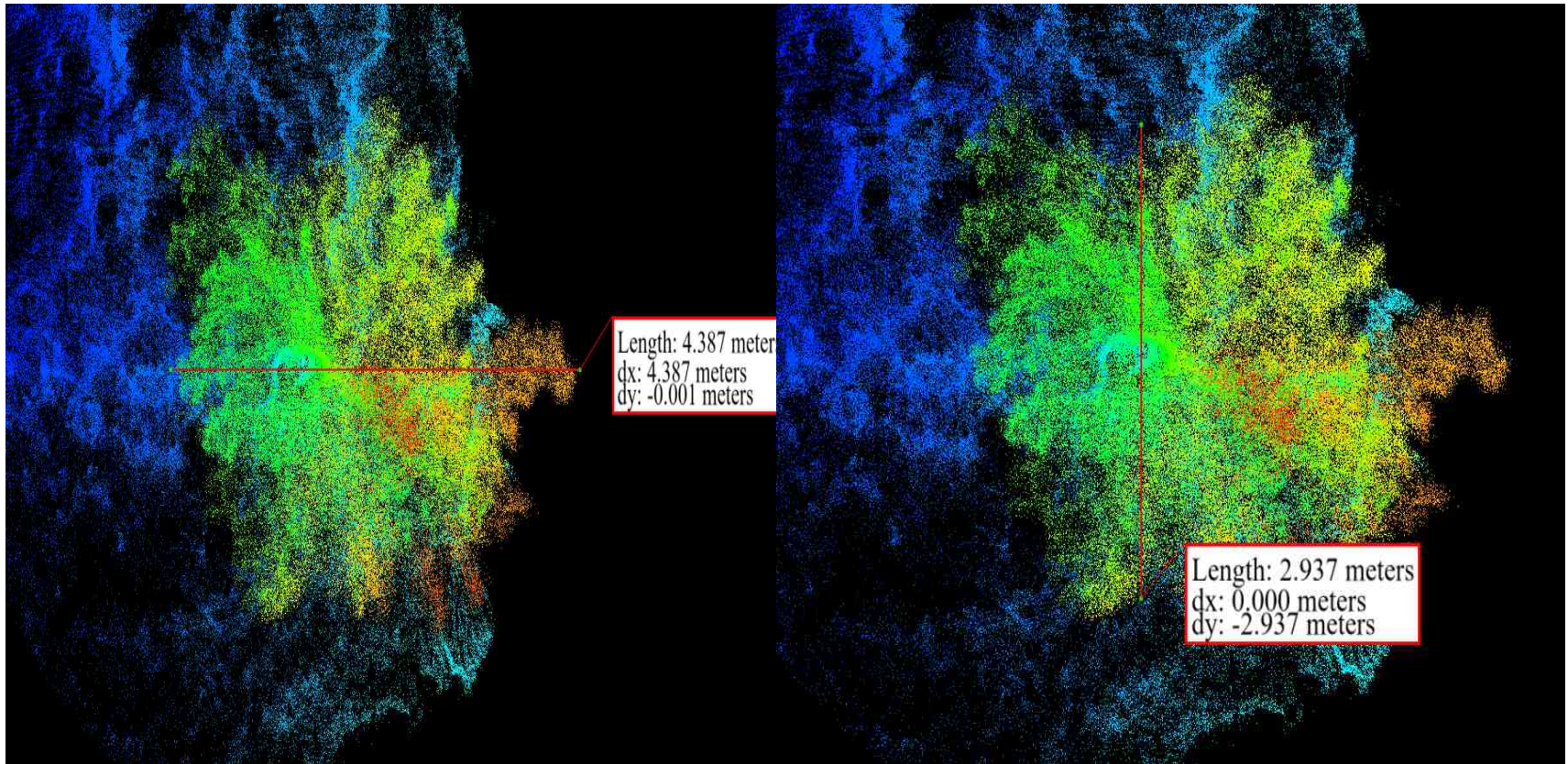


그림 127. 발왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2023년)

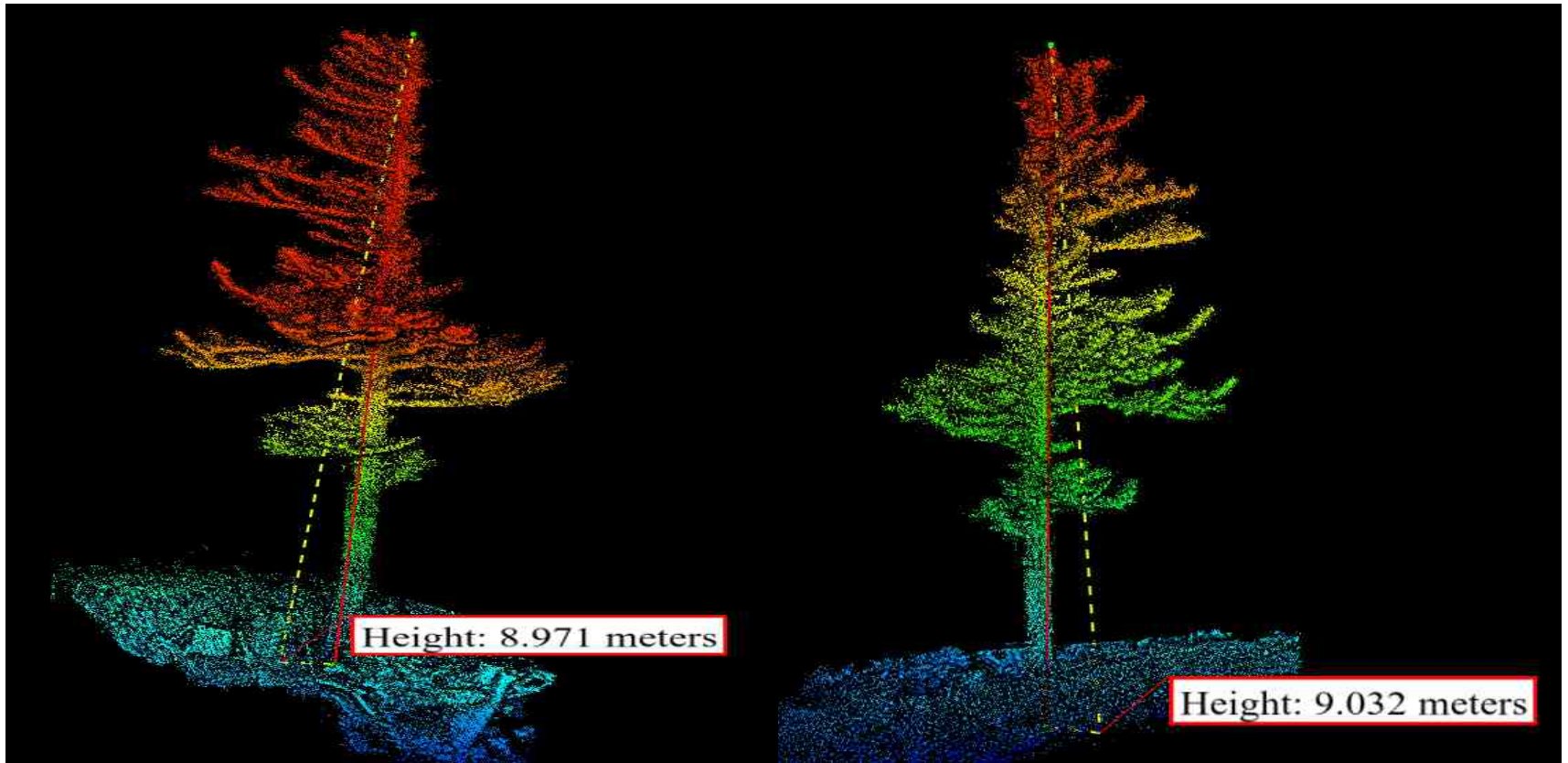


그림 128. 발왕산 분비나무 개체목2 수관폭 (2023년)

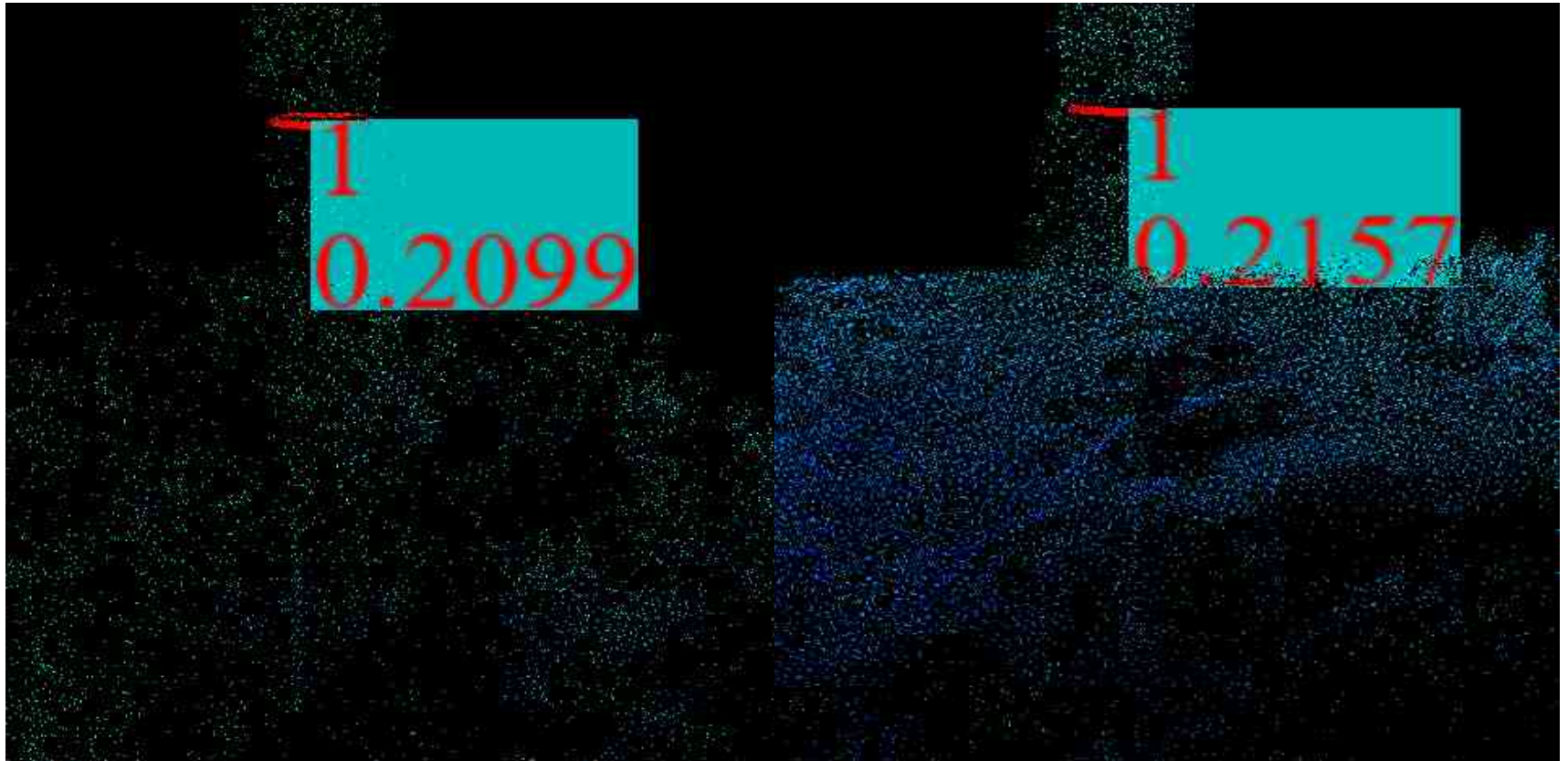


그림 129. 발왕산 분비나무 개체목3 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

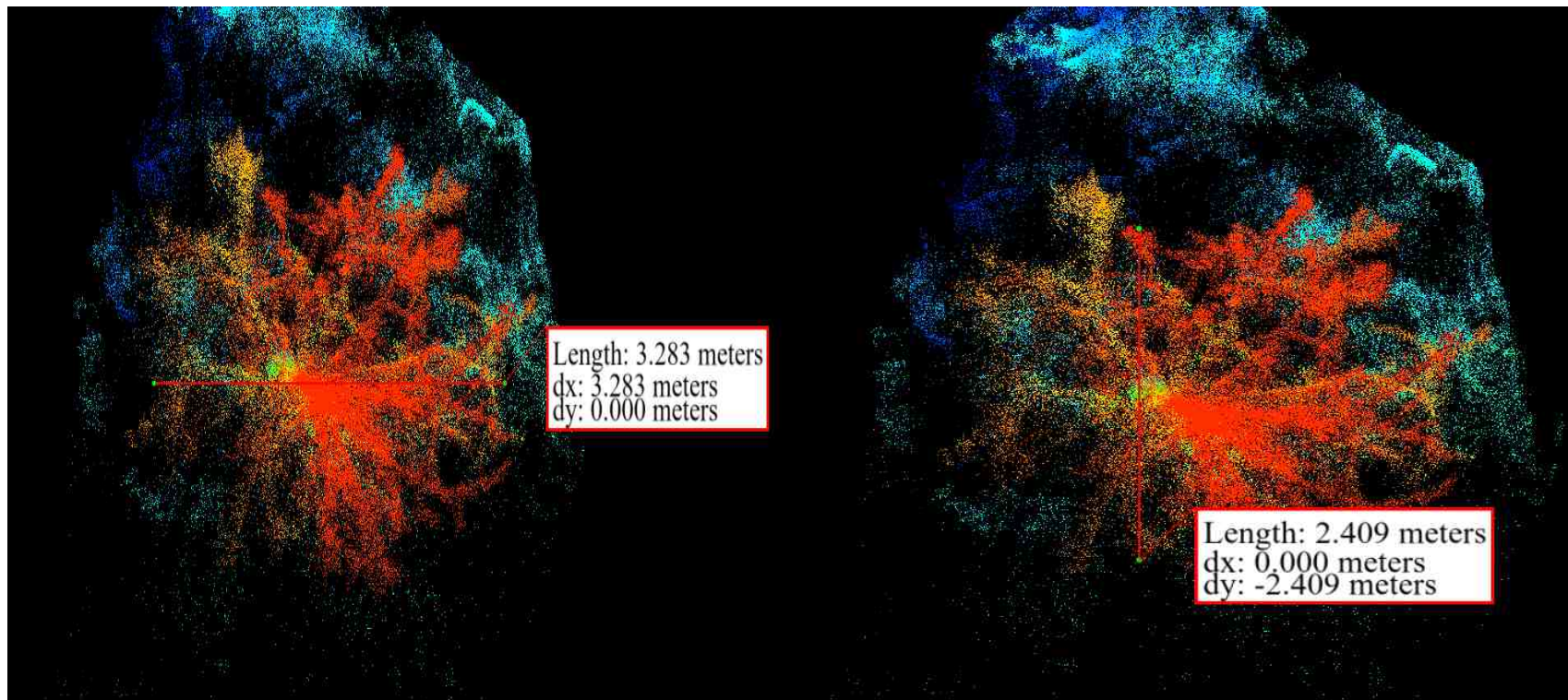


그림 130. 발왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2022년)

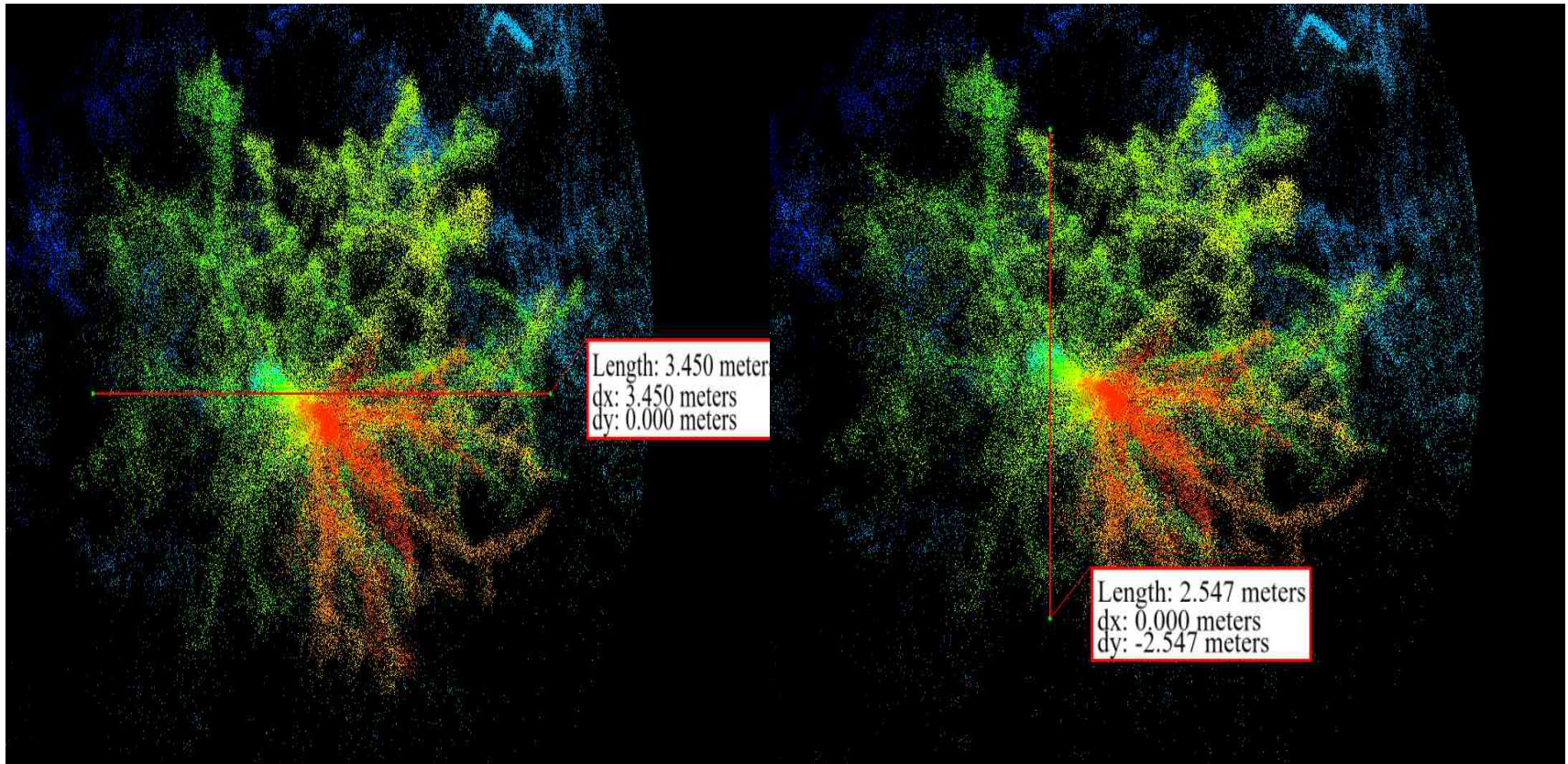


그림 131. 발왕산 분비나무 개체목3 수관폭 (2023년)

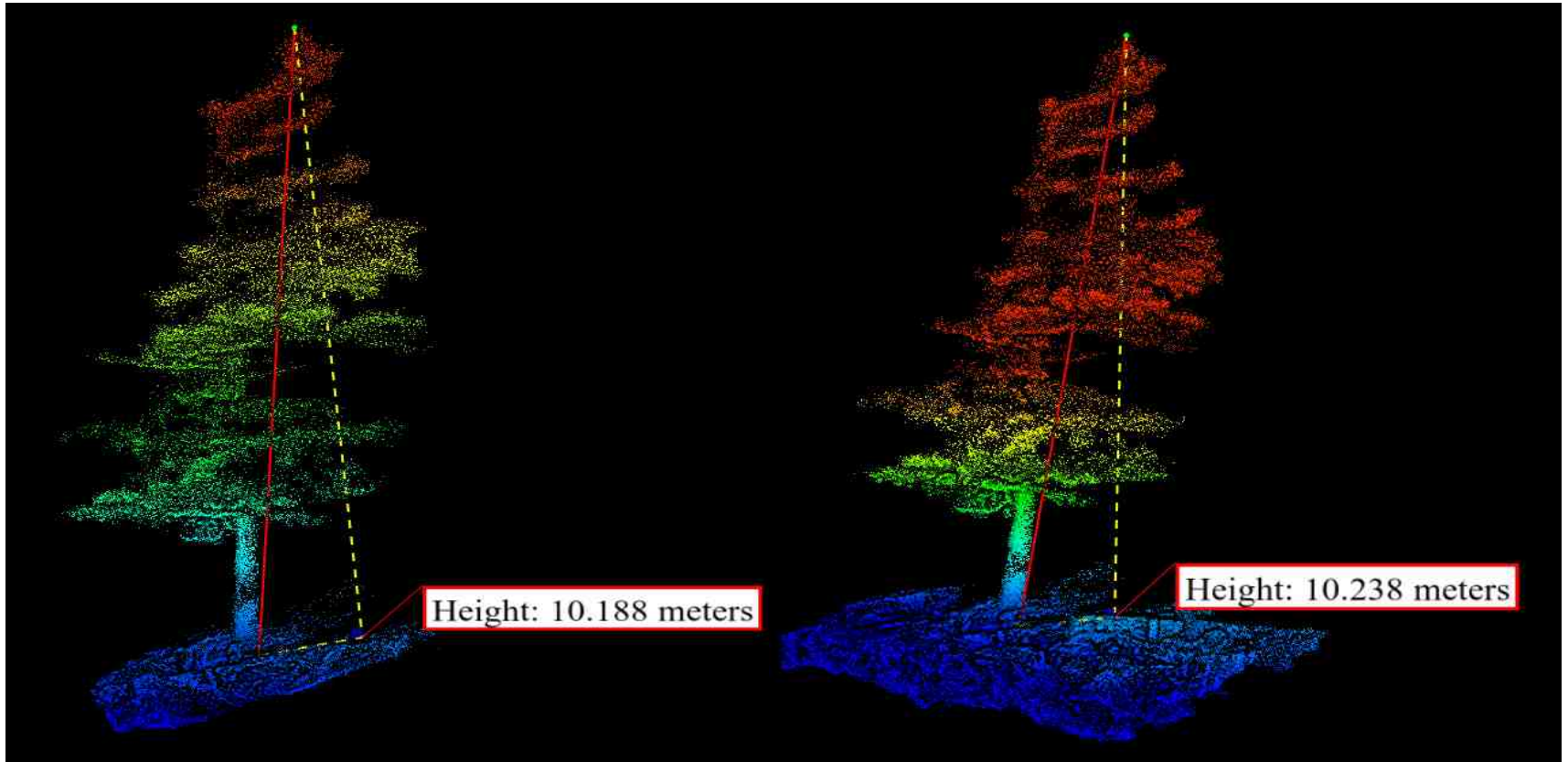


그림 132. 발왕산 분비나무 개체목4 수고 비교 (2022년 vs 2023년)

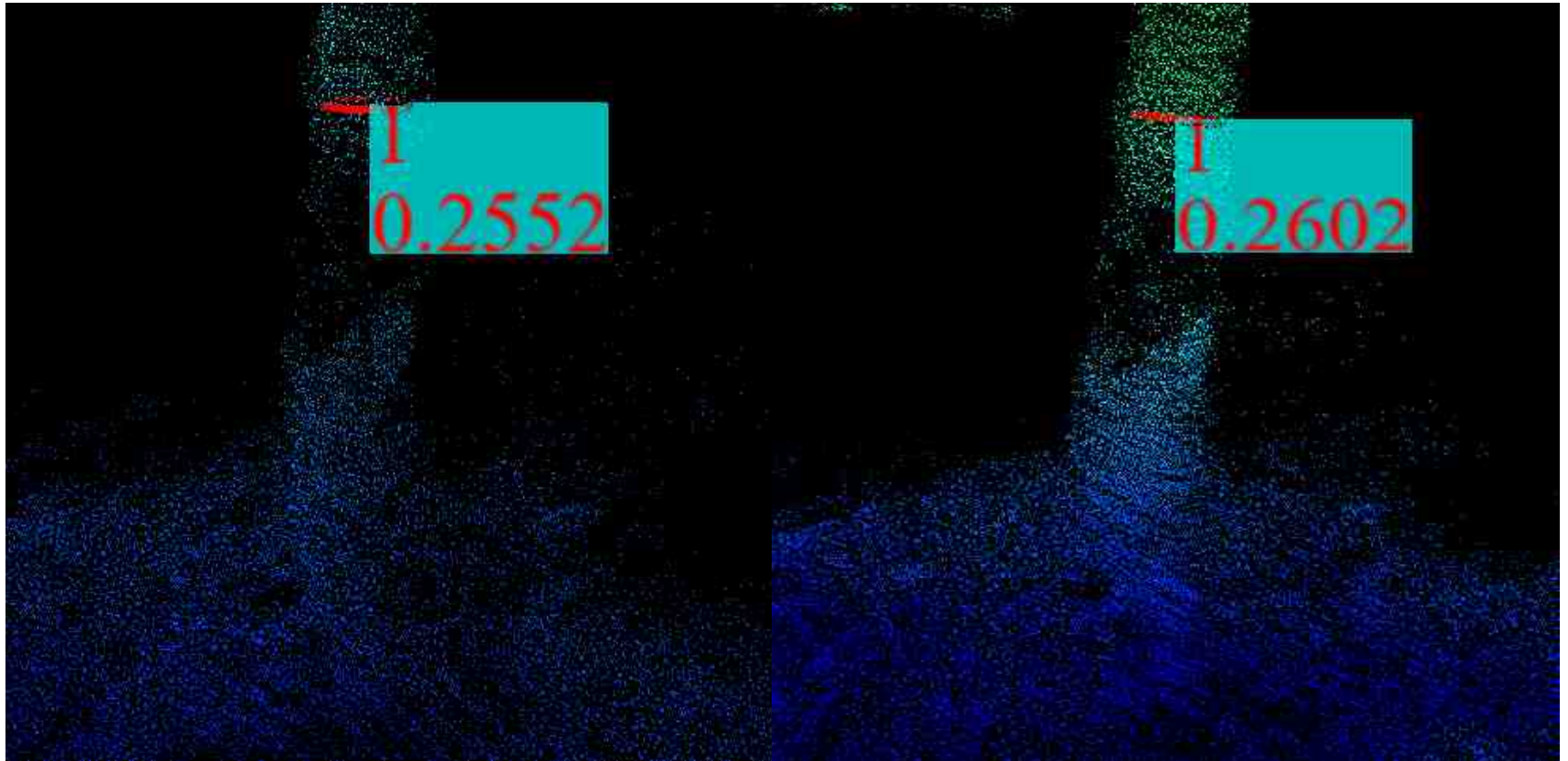


그림 133. 발왕산 분비나무 개체목4 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

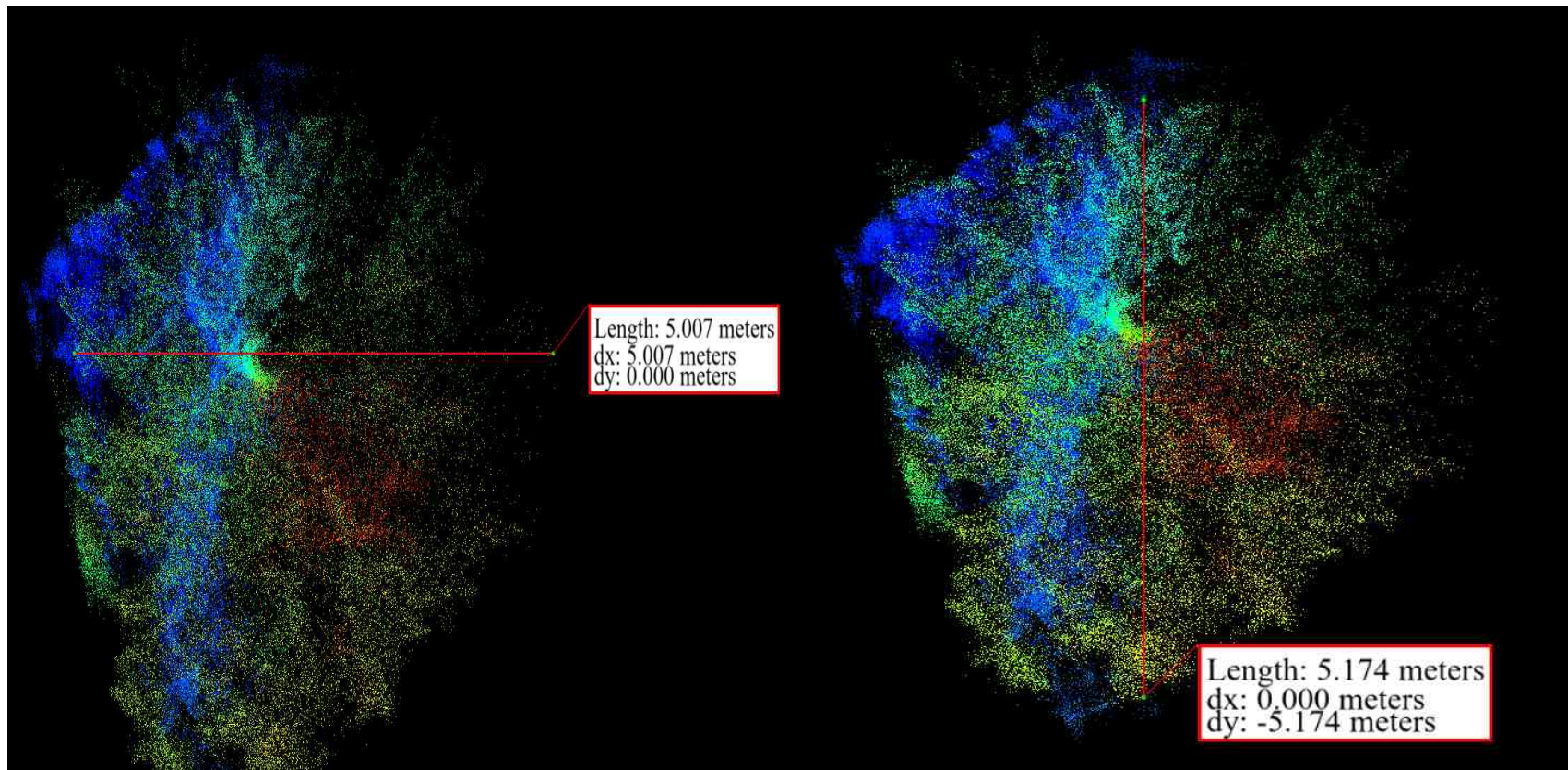


그림 134. 발왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2022년)

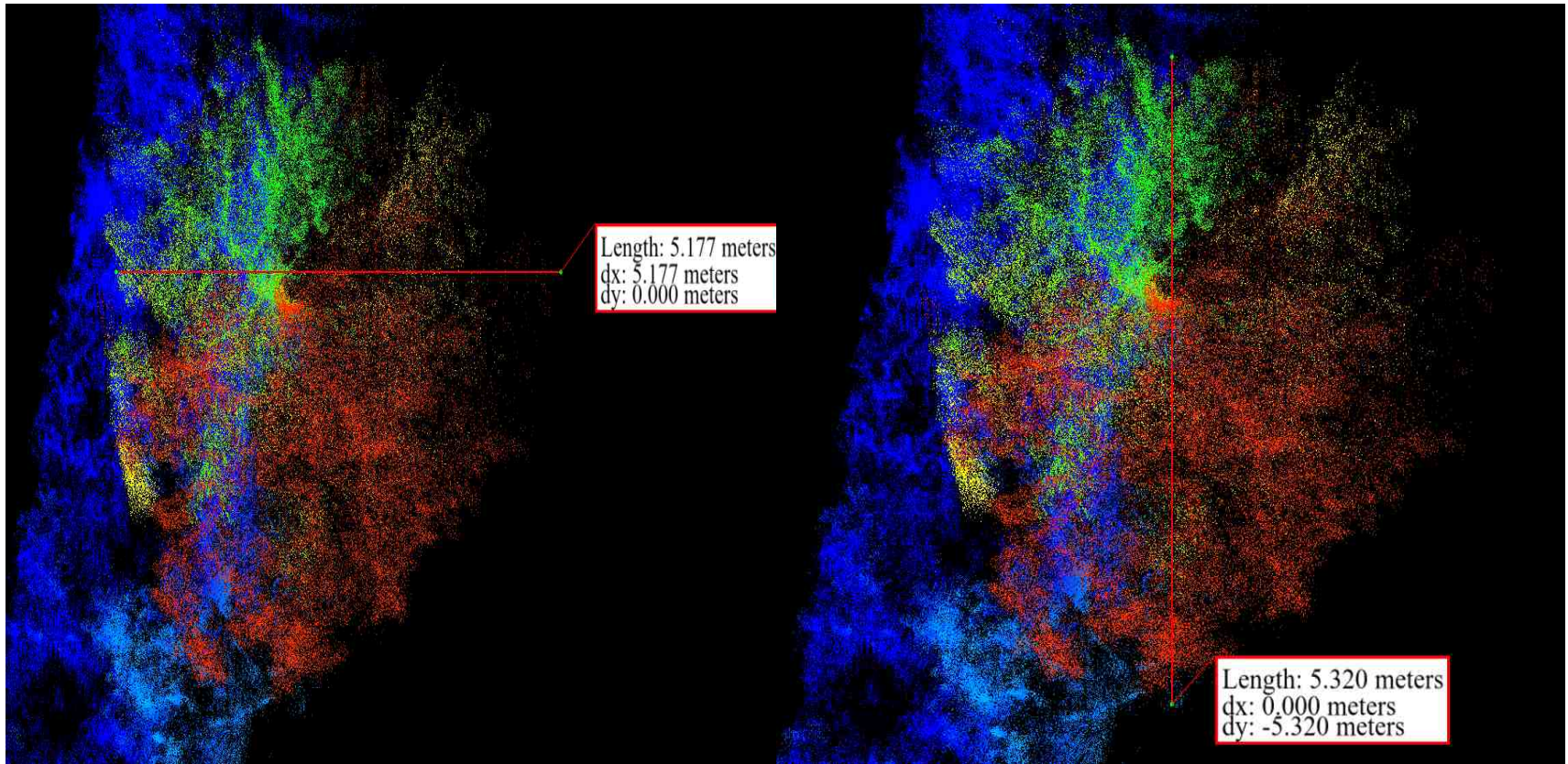


그림 135. 발왕산 분비나무 개체목4 수관폭 (2023년)

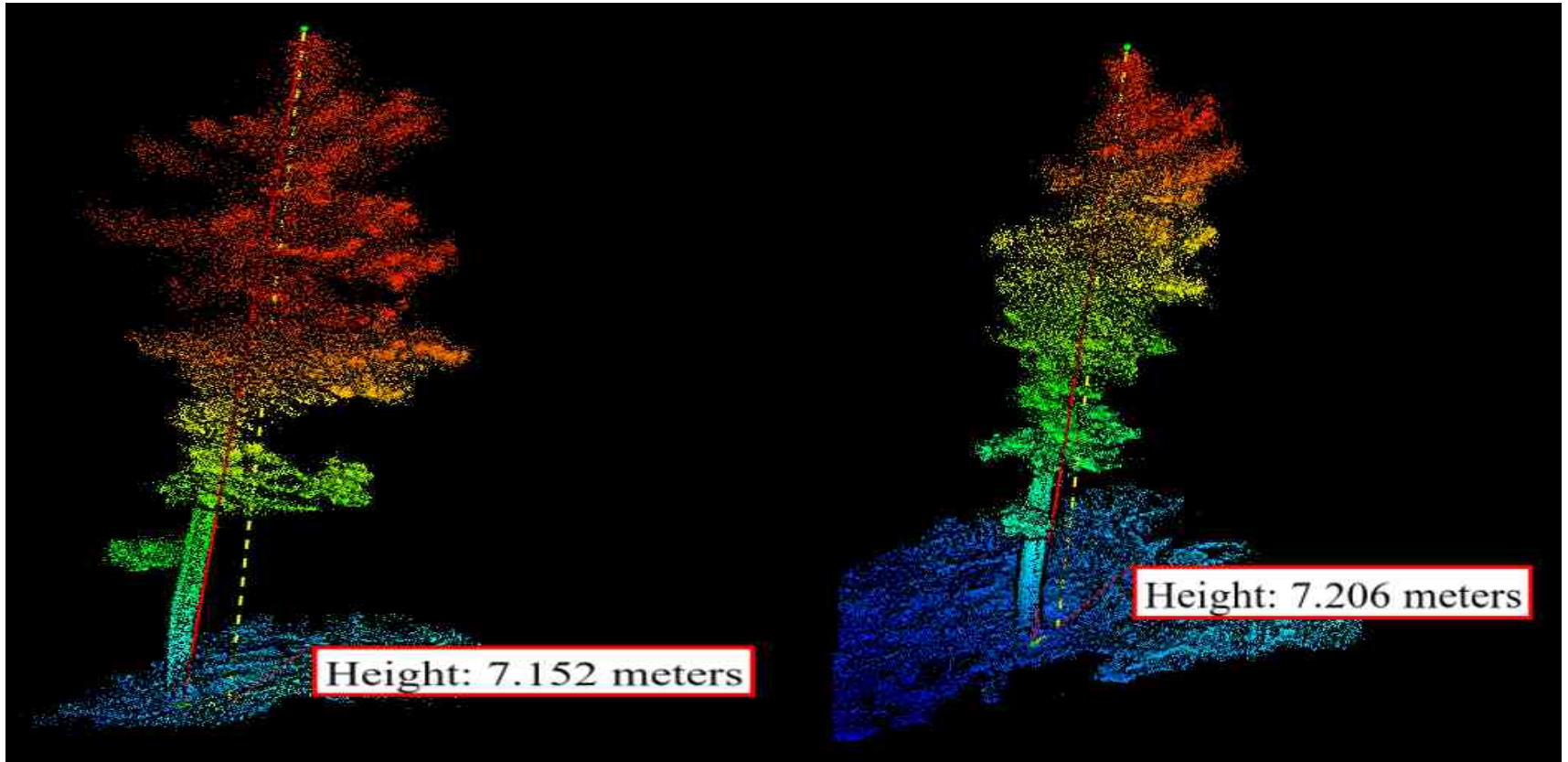


그림 136. 발왕산 분비나무 개체목5 수고 비교 (2022년 vs 2023년)

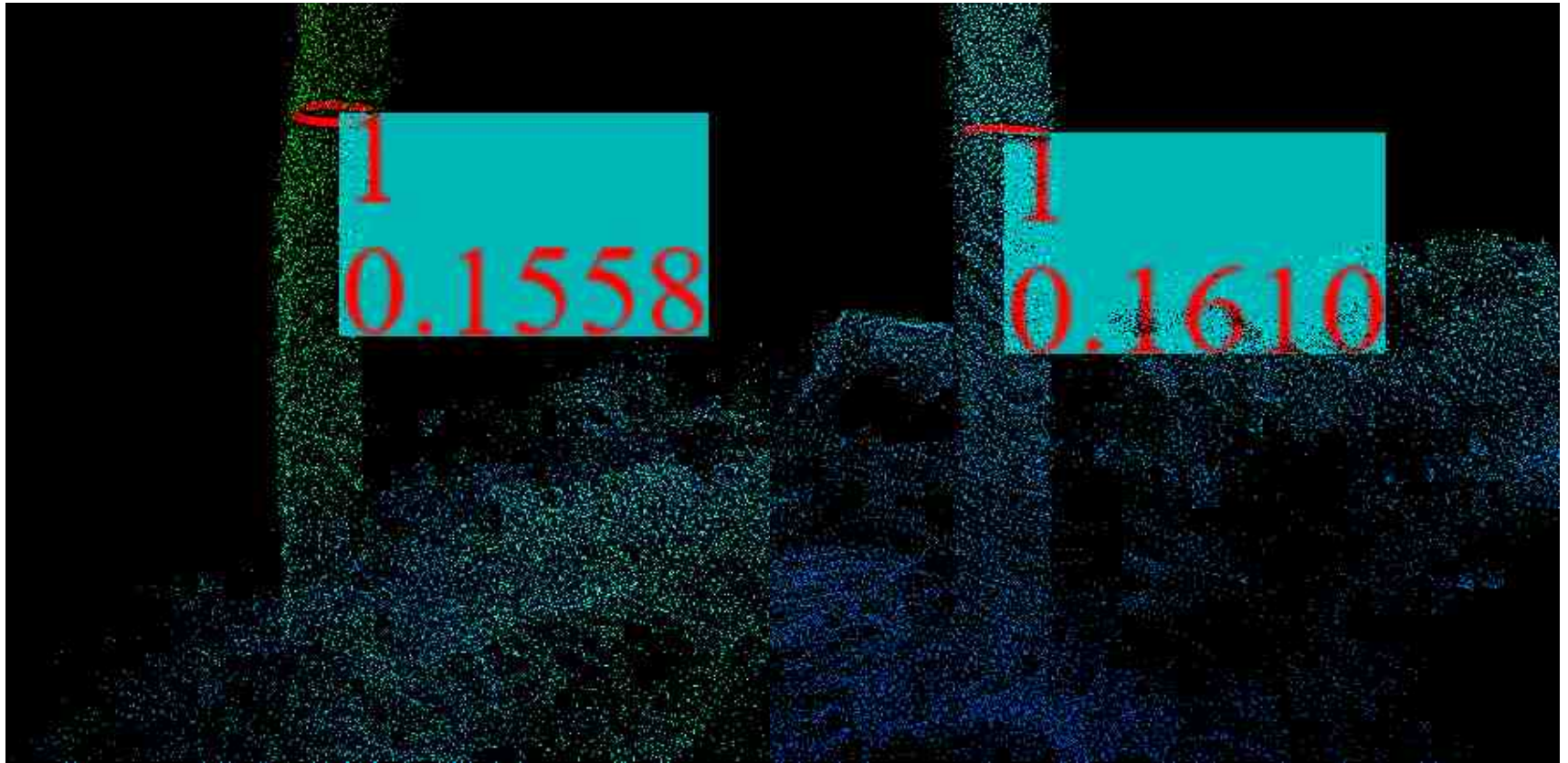


그림 137. 발왕산 분비나무 개체목5 DBH 비교 (2022년 vs 2023년)

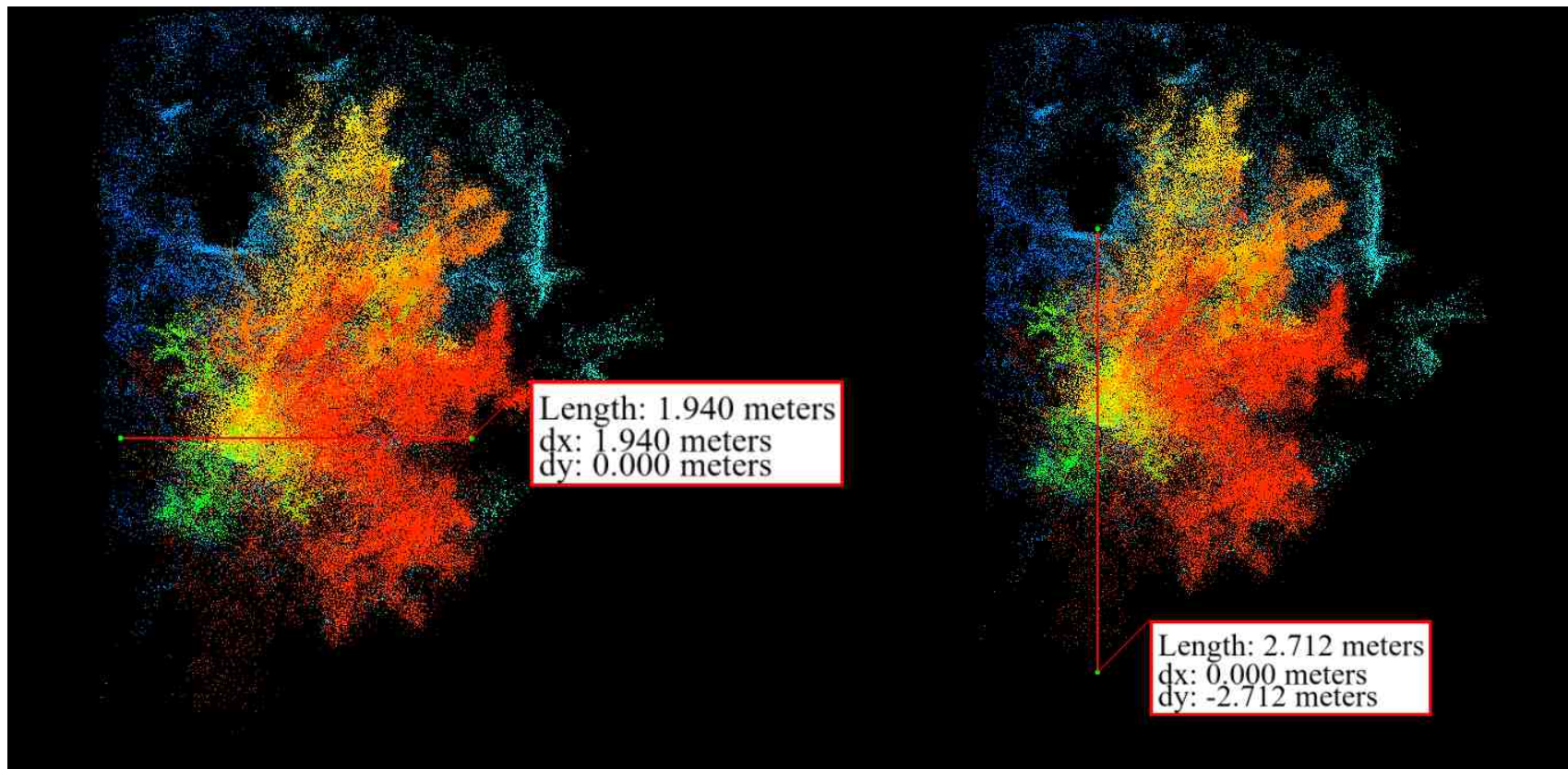


그림 138. 발왕산 분비나무 개체목5 수관폭 (2022년)

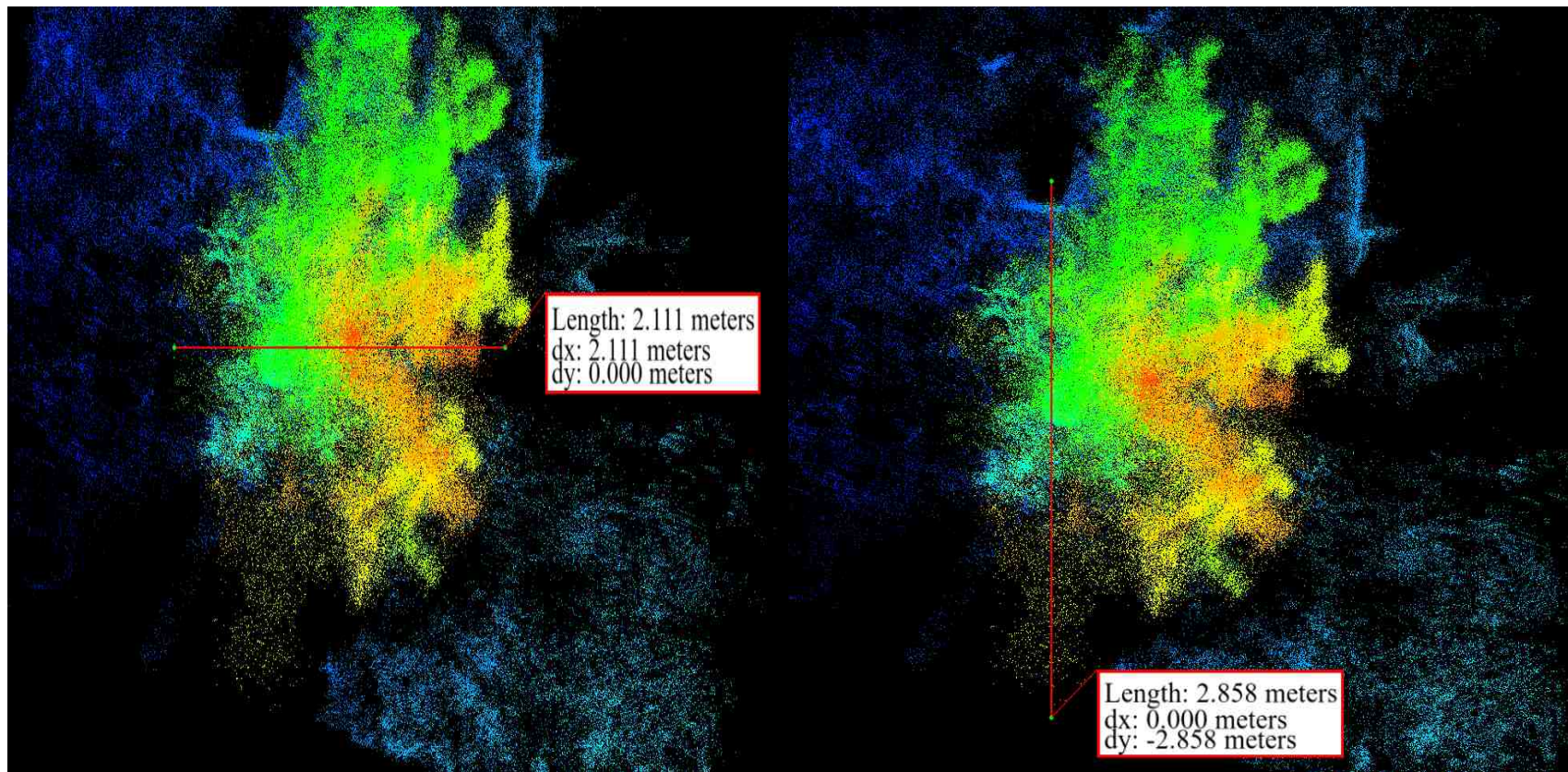


그림 139. 발왕산 분비나무 개체목5 수관폭 (2023년)

표 35. 발왕산 분비나무림 내 개체목 5개에 대한 비교 (2022년 vs 2023년)

		2022년		2023년	차이 (2023년-2022년)
수고 (m)	1	6.698	1	6.743	0.045
	2	10.197	2	10.265	0.068
	3	8.971	3	9.032	0.061
	4	10.188	4	10.238	0.05
	5	7.152	5	7.206	0.054
DBH (m)	1	0.2079	1	0.2129	0.005
	2	0.2827	2	0.2888	0.0061
	3	0.2099	3	0.2157	0.0058
	4	0.2552	4	0.2602	0.005
	5	0.1558	5	0.1610	0.0052
수관폭 (m)	가로	1	1	3.124	0.187
		2	2	4.387	0.122
		3	3	3.450	0.167
		4	4	5.177	0.17
		5	5	2.111	0.171
	세로	1	1	2.669	0.175
		2	2	2.937	0.14
		3	3	2.547	0.138
		4	4	5.320	0.146
		5	5	2.858	0.146

작년(2022년)과 올해(2023년) 라이다 데이터 기반 개체목 비교 결과는 표1과 같다. 5개 개체목에 대하여 수고는 평균 0.0556m로 5.56cm, DBH는 평균 0.0054m로 0.54cm, 수관폭은 가로와 세로를 포함하여 평균 약 0.1562m로 15.62cm 정도 성장한 것으로 나타났다.

라. 결론 및 고찰

본 연구에서는 분비나무가 유지되고 있는 가리왕산과, 쇠퇴하고 있는 발왕산 지역에 대한 디지털정보구축을 통해 각 조사지점 별로 5개의 개체목에 대한 흉고직경, 수고, 수관폭에 대한 변화 관찰에 대한 연구를 진행하였다. 그 결과 시계열 DB 구축을 통한 개체목 정밀 모니터링 가능성이 확인되나 해당 수치들의 차이가 미비하여 결과를 명확하게 도출하기에는 어렵다고 생각된다. 따라서 향후에는 장기적으로 데이터를 구축해야할 것으로 사료되며 또한, 다분광 센서 등 다양한 센서들과의 결합을 통해 개체목 및 임분단위의 점군 데이터 분석 고도화가 요구된다.

8. 분비나무 보전가치 평가

가. 서론

최근 온실가스 배출을 통한 인간 활동은 전 지구 지표 온도를 1850~1900년 대비 현재(2011~2020년) 1.1℃로 상승시켰으며 지속되는 온실가스 배출로 인해 온난화가 심화되어 가까운 미래(2021~2024년)에는 1.5℃에 도달할 것으로 보여 생물다양성의 손실 등 급격하거나 비가역적인 변화가 일어날 가능성이 높아지고 있다(IPCC, 2022).

생태계의 대부분을 차지하는 식물종은 변화하는 환경에 적응하는 종도 있지만 그렇지 못한 식물들은 결국 절멸하게 될 것이다(Tellez et al., 2007). 최근까지 식생분포의 변화는 난온대성 식물 분포는 확산되고 있으나, 아한대성 식물의 분포는 축소되고 있는 실정이며, 저지대 식물이 고산지대로 이동한다는 연구가 보고되고 있다(Kullman, 2002; Meshinev et al., 2000). 이렇듯 지구환경변화에 따른 생물종 분포 연구는 늘 중요시되고 있으며 멸종위기 식물을 대상으로 종보전의 필요성이 대두되고 있다(Golicher et al., 2008).

한반도 중부 이북(소백산, 오대산, 설악산 등) 고산지역에서 자생중인 분비나무는 (Song, 1991; Park et al., 2015)는 산림청이 지정한 멸종위기 고산 침엽수 중 하나로서, 최근 기후변화 등으로 인하여 지역적인 편차는 존재하지만 대체로 개체수 및 분포면적이 감소하는 등 쇠퇴현상이 관찰되고 있다(Chun et al., 2009; Kim et al., 2021). 이에 맞서 산림청에서는 멸종위기 침엽수 보전복원 대책을 발표하고 멸종위기 침엽수 7종(구상나무, 분비나무, 가문비나무, 눈썹백, 눈향나무, 눈잣나무, 주목)을 지정하여 체계적인 보전, 복원에 대한 연구를 진행하고 있다(KFS, 2023). 이와 함께 산림생태계의 보전과 관련한 새로운 국가정책의 수립을 위해서는 정책의 대상인 국민들의 수요 기반을 실질적인 효과를 확인할 필요가 있으며, 이에 대하여 멸종위기 침엽수종에 대한 국민들의 인식과 수요를 주기적으로 파악하는 것

이 중요하다(Kwak and Lee, 2015).

본 연구는 멸종위기 고산지역 침엽수 분비나무의 보전에 대한 중요성과 가치를 알리기 위한 자료를 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 환경자원의 경제적 가치평가방법 중 가장 널리 사용되는 조건부가치평가법(CVM, contingent valuation method)을 적용하여 멸종위기 침엽수 분비나무에 대한 경제적 가치 평가하는데 목적이 있다.

나. 연구방법

(1) 경제적 보전가치

멸종위기 침엽수 분비나무는 자연자원의 비가역적(irreversible) 특성으로 보전가치(preservation value) 혹은 비이용가치(nonuse)를 지니고 있다. 분비나무의 보전가치는 소비적인 이익관심과는 완전히 독립적인 가치로 보전가치에는 자연자원이 존재하고 있다는 사실 자체에 만족하여 지불하려는 존재가치(existence value), 자연자원을 보호하려는 유산가치(bequest value), 그리고 존재하는 자연자원을 현재에는 여건상 이용할 수 없지만 앞으로 여건개선에 따라 이용할 수 있는 일종의 향후 이용권을 미리 확보하고자 지불하는 선택가치(option value)로 구성되어 있다(Krutilla, 1967).

조건부가치법(CVM)은 소비자들에게 비시장재화에 대한 가상적 시장을 설정하기 위해 설문기법을 활용하여 설문을 실시하고, 조건부가치평가 설문에서는 멸종위기 침엽수종인 분비나무가 사람들에게 편익을 제공해주고 있으나, 시장에서 거래되지 않기 때문에 가격이 책정되지 않으며 이를 비시장재(Non-market good)라고 한다. 특히 CVM의 경우 환경재의 사용가치 뿐만 아니라, 존재가치에 대한 추정이 가능하며, 분석에 적용되는 종속변수와 이용자료의차이가 없다면 모형의 설명계수가 CVM이 TCM(여행비용방법) 보다 다소 높아 CVM이 자원의 비시장적 가치를 추정하는 방법으로 많이 활용되고 있는 실정이다(Han and Kim, 1997).

조건부가치법은 소비자들에게 비시장재화에 대한 가상적 시장을 설정하기 위해 설문지를 구성하고, 설문에서는 자연환경이 사람들에게 주는 편익을 공공재나 공공서비스와 같은 재화의 형태로 제시하고 있으며, 이에 대한 사람들의 선호를 유도하기 위해서 몇 가지 질문들을 사용하고 있다.

최근의 실증연구에서는 보전가치에 대한 평가방법으로 조건가치법(Contingent valuation method)의 이선선택형모형(Dichotomous choice model)을 적용하여 평가하고 있다. 조건부가치법은 가상적인 시장을 설정하는 방법에서 발생하는 가상적 편익을 제거 할 수 있는 장점과 일반시장(Market)에서의 구매과정과 매우 유사하다는 점, 설문의 간소화 등의 장점이 있다(Freeman, 1993).

(2) 이선선택형 조건가치법

본 연구에서는 이선선택형 조건부가치법을 적용하여 멸종위기 침엽수 분비나무의 보전사업에 대한 ‘일반 국민의 기금 납부’에 따른 수요함수를 측정하기 위해 Hanemann(1984)이 제시한 Logit 모형을 이론적 기준으로 설정하고 다음과 같은 응답 설문을 진행하였다. 현재 정부예산으로 수행되고 있는 멸종위기 침엽수 분비나무의 보전을 위해 국민의 기금을 받아 운영하게 된다면 이때, 임의의 기금(가격)수준에서 이를 지불하고자라도 보전사업을 지지하는 것인지, 혹은 제시된 가격수준에서 지불하지 않을것인지에 대해 파악하였다. 선택과정을 단순화하기 위하여 응답자의 효용함수는 지불의향(i)만의 함수로 가정하며, 관측 불가능한 부분에 대하여 오차항(ϵ_i)을 도입하면 효용함수는 다음 식(1)과 같다.

$$U(i) = V(i) + \epsilon_i = 0 \text{ 또는 } 1 \quad (1)$$

$i=0$ 은 임의의 비용수준에서 이를 지불하고자라도 지지하지 않는 경우, $i=1$ 은 임의의 비용수준에서 이를 지불하고자라도 지지하는 경우를 말하며. ϵ_i 는 독립적

이고 동일한 분포를 가지며 평균이 0(Zero)라고 가정하는 임의변수(Random variable)를 나타낸다.

귀하의 가족(가구)은 ‘기금이’ P원일 경우, 이를 지불하실 의향이 있으십니까?란 질문에 응답자가 ‘예’로 응답하는 것을 일정한 금액(P)을 지불하더라도 보전사업을 지지하는 경우가 지지하지 않는 경우보다 더 높다는 것을 의미하고, (2)와 같다.

$$v(1, Y-P) - v(0, Y) \geq \epsilon_0 - \epsilon_1 \quad (2)$$

또한, 두가지 선택에 의한 효용의 차이(Δv)와 오차항의 차이(η)는 (3)과 같이 정의된다.

$$\Delta v(P) = v(1, Y-P) - v(0, Y)$$

$$\eta = \epsilon_0 - \epsilon_1 \quad (3)$$

응답자가 임의의 비용수준에서 이를 지불하고서라도 보전사업을 지지하는 경우를 선택할 확률(Π_1)은 (4)식으로 확률함수(Probability function)로 나타낼 수 있다.

$$\pi_1 = Pr(i=1) = Pr[\Delta v(P) \geq \eta = F\eta[\Delta P]] \quad (4)$$

여기서 $Pr[\cdot]$ 은 확률함수를 나타내며, $F\eta[\cdot]$ 의 η 의 누적분포함수(Cumulative distribution function)이고, 확률모형의 추정에는 프로빗모형(Probit model)과 로짓모형(Logit model)로 활용할 수 있다.

프로빗모형과 로짓모형의 추정결과로부터 가치추정 계산이 프로빗모형보다 로짓모형에서 비교적 용이하며 적합도가 높게 나타나기 때문에(Kang et al., 2011) 식(5)와 같이 로짓모형을 가정하여 가치를 추정한다.

$$\pi_1 = \frac{1}{1 + \exp(-\Delta v)} \quad (5)$$

추정된 확률함수를 소비자의 개별 수요함수로 가정하고, 수요함수를 추정할 수 있다. 현재 정부예산으로 운영중인 멸종위기 침엽수 분비나무 보전사업이 정부예산이 아닌 국민들의 기금을 받아 사업이 수행된다고 가정하다면 편익을 먼저 추정해야 된다. 이는 수혜자들이 편익의 대가로 최대한 지불할 의사가 있는 일정한 지불의사금액(Willingness-to-pay)에 의해 측정된다. 편익에 대한 개인의 지불의사금액은 WTP로서 정의될 수 있으며, 개인의 지불의사금액은 아래 식(6)과 같이 이용의향을 나타내는 상태변수 j 가 상품의 품질을 나타내는 상태변수 q 로 나타난다.

$$v(y - WTP, c|1) + \epsilon_1 = v(y, c|0) + \epsilon_0$$

$$\Delta v(WTP) = \epsilon \quad (6)$$

한편, 여기서 로짓함수에 추정되어지는 소비자의 지불의사확률 함수를 이용하여 소비자의 경제적 편익(가치)을 측정할 수 있다. 즉, 음(-)의 WTP를 고려하여 가격수준을 $-\infty$ 에서 $+\infty$ 까지 추정함수를 적분하여 계산하고, 지불의사금액의 평균은 무작위로 제시되는 금액 P 원에 대하여 $\lim_{p \rightarrow 0} F_p < 1$ 일수도 있기 때문에 WTP의 지불의사금액의 전체평균(WTP overall mean)으로 계산되기 때문에 지불의사금액의 전체평균은 식(7)과 같다.

$$WTP = \int_0^{\infty} F_p dP - \int_{-\infty}^0 (1 - F_p) dP \quad (7)$$

WTP는 선형간접효용함수에 $\pi_1 = \frac{1}{1 + (\exp(-\Delta v))}$ 에서 Δv 가 $\alpha - \beta P$ 로 추정되어지며, 이때 $WTP = \frac{\alpha}{\beta}$ 로 계산된다.

(3) 연구방법

멸종위기 침엽수인 분비나무의 보전가치를 평가하기 위해 전국 20~69세 성인남녀 2,000명의 국민을 대상으로 2023년 9월 15일부터 9월 21일까지(7일간) 온라인 설문조사를 진행하였다. 본 설문조사는 응답자의 설문에 대한 이해를 돕기 위해 분비나무에 대한 현황, 사진 등을 상세하게 기입하고 설문조사를 시작하였다.

분비나무에 대한 가상의 보전기금을 설정하고, 보전에 대해 질문하였다. 이와 같은 가상지장에 대한 구체적인 정보 제공은 응답자들이 생각하는 진실된 가치를 도출하는데 기여한다(Lee, 2013). 여기서 보전기금의 범주는 Pre-test를 통해 95명을 대상으로 지불가능한 금액의 범위를 조사하여(1,000원, 3,000원, 5,000원, 10,000원, 15,000원, 20,000원, 25,000원, 30,000원) 8개의 가격수준으로 설정하였다. 제시된 가상 기금 금액 중 무작위로 하나를 뽑아 제시된 금액을 보전기금으로 지불할 의향이 있는지에 대한 이선선택형으로 ‘예’, ‘아니오’로 제시하였고, 이때 지불수단(payment vehicle)으로 비이용가치의 평가에 대한 가구당 지불하는 기금(bid)으로 구성하였다. 또한 설문 문항으로 일반적 특성인 성별, 연령, 거주지 등 응답자의 일반적인 특성과 관련된 항목으로 구성하였다.

다. 연구결과

(1) 응답자의 일반적 특성

멸종위기 침엽수 분비나무의 보전가치 평가를 위한 응답자는 성별, 연령, 거주지 인구비례로 할당하였고, 불성실 응답값을 제외하고 총 2,000명이 조사에 참여하였다. 응답자의 일반적 특성을 살펴보면 성별은 남성이 1,017명(50.9%), 여성 983명(49.1%)으로 나타났고, 연령은 20~29세 352명(17.6%), 30~40세 356명(17.7%), 40~50세 436명(21.8%), 50~60세 463명(23.2%), 60~69세 393명(19.7%)으로 40~69세의 응답 비율이 높은 것으로 확인되었다. 거주지는 서울특별시, 경기도의 응답자의 참여가 많았고, 부산광역시, 경상남도, 인천광역시, 경상북도 순으로 나타났다.

표 36. 응답자 특성

Section		N	%	Section		N	%
Gender	Man	1,017	50.9	Residence	Sejong	14	0.7
	Woman	983	49.1		Daejeon	55	2.8
Age	10~20'	-	-		Ulsan	44	2.2
	20~30'	352	17.6		Gyeonggi-do	535	26.7
	30~40'	356	17.7		Gangwon-do	58	2.9
	40~50'	436	21.8		Chungcheongbuk-do	63	3.2
	50~60'	463	23.2		Chungcheongnam-do	78	3.9
	60~70'	393	19.7		Jeollabuk-do	65	3.3
Residence	Seoul	382	19.1		Jeollanam-do	65	3.3
	Busan	128	6.4		Gyeongsangbuk-do	98	4.8
	Daegu	93	4.7		Gyeongsangnam-do	125	6.2
	Incheon	118	5.8		Jeju	24	1.2
	Gwangju	55	2.8	Job	Self-employment	174	8.7
Academic ability	Middle school	21	1.1		Profession	214	10.6
	High school	426	21.3		Public official etc.	132	6.6
	College	1,370	68.4		Agriculture and Forestry etc.	15	.8
	Graduate school	183	9.2		Student	98	4.9
Income	Less than 1 million won	97	4.9		Housewife	304	15.2
	1 to 2 million won	131	6.6		Employee	765	38.3
	2 to 3 million won	373	18.6		Etc.	298	14.9
	3 to 4 million won	382	19.1				
	4 to 5 million won	328	16.4				
	5 million won more	689	34.4				

(2) 분비나무 관리 및 보전을 위한 기금의사 응답반응

설문문항에서 분비나무가 풍해 및 수분스트레스 등으로 인해 쇠퇴하고 있어, 이를 체계적인 관리 및 보전을 위해 정부예산이 아닌 일반 국민들의 보전기금을 조성하여 수행한다면, 귀하의 가족(가구)은 ‘기금’을 내실 의향이 있으신지, 만약 이 보전기금이 조성되지 않는다면 더 이상 멸종위기 침엽수종인 분비나무는 우리나라에서 완전히 멸종하다고 가정하였고, 지불 방식은 기금의 특성을 반영하여 단 한번 지불하는 것으로 하였고, 분비나무의 관리 및 보전에만 쓰여지는 것으로 한정하였다. 제시된 가격수준에 대하여 응답자가 ‘예’라고 대답하는 경우의 확률은 1,000원(74.8%)일 때가 가장 높았고, 전체적으로 기금으로 제시된 금액이 높아질 수록 지불의사는 감소하는 것으로 나타났다. 응답자 특성별로는 여성, 60대(연령), 대학원졸(학력), 500만원 이상(총 가구소득), 학생(직업)의 지불의사 의향이 가장 높은 것으로 확인되었다.

표 37. 기금의사 응답반응

Bid(1,000won)		Willingness to pay		
		Yes	No	Total
1.0	N	187	63	250
	%	74.8%	25.2%	100.0%
3.0	N	169	81	250
	%	67.6%	32.4	100.0%
5.0	N	154	96	250
	%	61.6%	38.4%	100.0%
10.0	N	136	114	250
	%	54.4%	45.6%	100.0%
15.0	N	137	113	250
	%	54.8%	45.2%	100.0%
20.0	N	124	126	250
	%	49.6%	50.4%	100.0%
25.0	N	99	151	250
	%	39.6%	60.4%	100.0%
30.0	N	104	146	250
	%	41.6%	58.4%	100.0%
Total	N	1,110	890	2,000
	%	55.5%	44.5%	100.0%

(3) 분비나무 관리 및 보전을 위한 자동이체 및 은행지로 납부 여부

앞서 분비나무의 관리 및 보전 기금 지불 의향이 있는 응답자 1,100명 중에서 기금 지불방법을 자동이체나 은행지로 용지 납부 등에 동의하는 비율은 73.5%로 높게 나타났다. 최초금액 1,000원~20,000원 사이에서의 납부 여부는 지급 기금의 금액이 낮을수록 동의하는 비율이 높아지는 경향을 보였다. 한편, 제시금액 중 10,000원~15,000원과 25,000원~30,000원 간에는 동의하는 비율의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

응답자 특성별로는 경남권과 서울(지역), 500만원 이상(총 가구소득), 공무원·교원·사무기술직·자영업(직업)의 동의하는 비율이 확인되었다.

표 38. 자동이체 및 은행지로 납부여부

Bid(1,000won)		Willingness to pay		
		Yes	No	Total
1.0	N %	150 80.2%	37 19.8%	187 100.0%
3.0	N %	134 79.3%	35 20.7	169 100.0%
5.0	N %	117 76.0%	37 24.0%	154 100.0%
10.0	N %	98 72.1%	38 27.9%	136 100.0%
15.0	N %	98 71.5%	39 28.5%	137 100.0%
20.0	N %	80 64.5%	36 35.5%	124 100.0%
25.0	N %	68 68.7%	31 31.3%	99 100.0%
30.0	N %	71 68.3%	33 31.7%	104 100.0%
Total	N %	816 74.3%	214 26.7%	1,100 100.0%

(4) 분비나무 관리 및 보전을 위한 최초금액의 1/2배 금액 기금 지불 의향
 앞서 분비나무의 관리 및 보전 기금 지불 의향이 없거나 자동이체 및 은행지로 용지 납부 등에 동의하지 않은 응답자 1,184명에게 ‘최초금액의 1/2배 금액’의 지불 의향을 다시 질문한 결과 37.0%가 지불 의향이 있는 것으로 나타났다. 최초금액 중 20,000원의 1/2배 금액의 지불 의향이 44.7%로 가장 높게 나타났고, 5,000원(42.9%), 10,000원(40.8%) 등의 순으로 나타났으며, 상대적으로 30,000원(30.7%)이 가장 낮았다. 또한 최초금액의 1/2배 금액 지불의향에서는 금액의 고저에 따른 경향성이 나타나지 않았다.

응답자 특성별로는 여성(성별), 서울(지역), 고졸(학력), 200만원~300만원 미만(총 가구소득), 학생(직업)의 기금 지불의향이 높은 것으로 확인되었다.

표 39. 최초지불의향 금액의 1/2배 금액 기금 지불 의향

Bid(1,000won)		Willingness to pay		
		Yes	No	Total
1.0	N	38	62	100
	%	38.0%	62.0%	100.0%
3.0	N	40	76	116
	%	34.5%	65.5%	100.0%
5.0	N	57	76	133
	%	42.9%	57.1%	100.0%
10.0	N	62	90	152
	%	40.8%	59.2%	100.0%
15.0	N	52	100	152
	%	34.2%	65.8%	100.0%
20.0	N	76	94	170
	%	44.7%	55.3%	100.0%
25.0	N	58	124	182
	%	31.9%	68.1%	100.0%
30.0	N	55	124	179
	%	30.7%	69.3%	100.0%
Total	N	438	746	1,184
	%	37.0%	63.0%	100.0%

(5) 분비나무 관리 및 보전을 위한 보전 기금 지불 의사가 있는 이유

최초금액의 자동이체·은행지로 용지납부 등 동의자 또는 1/2배 금액 지불 응답자 1,254명을 대상으로 분비나무에 대한 보전기금 지불의사의 이유에 대한 설문한 결과 유산가치인 미래 세대들에게 물려줄 책임이 있기 때문이 67.9%로 가장 높게 나타났고, 지속적인 관리 및 유지가 필요가 23.8%, 존재가치인 분비나무가 존재한다는 사실만으로 만족이 4.1%, 선택가치인 산행 등을 통해 직접 보기 위해서가 3.5% 순으로 나타났다.

응답자 특성별로 보면 20대(연령), 100만원 미만(총 가구소득), 학생(직업)은 ‘지속적인 관리 및 유지가 필요하기 때문에 기금의 지불의사가 있는 것으로 나타났고, 50대(연령), 500만원 이상(총 가구소득), 대학원졸(학력), 전업주부(직업)는 유산가치인 ‘미래 세대들에게 물려줄 책임이 있기 때문에’의 응답률이 가장 높은 것으로 나타났다.

표 40. 보전 기금 지불의사 이유

Section	N	Ratio(%)
Need continuous care and maintenance	851	67.9
Bequest value	298	23.8
Existence value	51	4.1
Option value	44	3.5
Etc.	9	0.7
Total	1,254	100.0

(6) 분비나무 관리 및 보전을 위한 보전 기금 지불 의사가 없는 이유

최초금액의 1/2배 보전기금의 지불기금의사가 없는 응답자 746명을 대상으로 분비나무에 대한 보전기금 지불의사가 없는 이유에 대한 설문한 결과 ‘멸종위기 침엽수 분비나무의 관리는 정부 또는 공공기관에서 해야 하기 때문’이 50.8%로 가장 높게 나타났고, 지불할 기금의 비용이 부담스러움 23.7%, 해당사업은 관심의

대상이 아님 12.1%, 현재에도 유사한 사업들이 많이 진행되고 있음 6.3%, 분비나무에 대한 이용 만족도가 낮기 때문 5.5%, 멸종위기 침엽수로서의 가치가 낮기 때문이 1.6% 순으로 나타났다.

응답자 특성별로 보면 여성(성별), 60대(연령), 400만원 이상(총 가구소득), 공무원·교원·사무·기술직·자영업(직업)은 ‘멸종위기 침엽수의 관리는 정부 또는 공공기관에서 해야 하기 때문에’가 가장 높았고, 20대(연령), 경북권(지역), 200만원 미만(총 가구소득), 학생(직업)은 ‘지불할 기금의 비용의 부담스러움’의 응답률이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, ‘지불할 기금의 비용이 부담스러움’ 응답은 25,000원에서 가장 높고, 1,000원에서 가장 낮게 나타났다.

표 41. 보전 기금 지불의사가 없는 이유

Section	N	Ratio(%)
Government or public agency role	379	50.8
Payment fund cost burden	177	23.7
Not an object of interest	90	12.1
There are many similar projects	47	6.3
Low satisfaction with use	41	5.5
Low conservation value	12	1.6
Total	746	100.0

(7) 분비나무 관리 및 보전을 위한 보전 기금 지불 의사 금액 및 로짓모형 추정
분비나무의 보전기금 지불의사에 관한 변수에 영향을 미칠 것으로 기대되는 독립변수(성별, 연령, 학력, 소득, 지역, 기금금액)를 포함하여 일반적으로 적합도가 높고 지불의사금액의 산출이 편리한 로짓모형을 적용하여 추정하였다. 보전기금에 대한 지불의사에 통계적으로 미치는 변수는 총소득, 성별, 연령으로 나타났으며, 성별, 기금금액은 유의 수준 1%, 총소득·연령은 5% 내에서 유의성을 가지는 것

으로 나타났다.

최종적으로 지불의사금액을 추정하기 위해 기금지불금액만을 고려하여 추정한 결과, 아래 표와 같이 가격수준이 1%의 유의성을 보였으며, 지불의사금액에 대한 부호도 음(-)으로 나타나 이는 제시금액이 높을수록 이를 지불하고자 하는 응답자의 의사가 ‘아니오’라고 대답할 확률이 높아지고 있는 경제적 이론에 부합하는 것으로 확인되었다.

표 42. 보전 기금 지불의사에 미치는 변수에 대한 결과

stepwise	Variable	B	S.E	Wald	df	p-value	EXP(B)
Final step	Income	0.068	0.031	4.845	1	0.028	1.071
	Gender	0.239	0.093	6.602	1	0.010	1.270
	Age	0.074	0.034	4.764	1	0.029	1.077
	Bid(won)	-0.203	0.021	98.092	1	0.000	0.815
	Constant term	0.460	0.273	2.842	1	0.001	1.585

앞에서 추정된 함수를 적용하여 최종적으로 멸종위기 침엽수 분비나무의 보전가치에 대한 지불의사금액(WTP)를 추정하면 $\pi_1 = \frac{1}{1 + \exp(-1.146 + 0.203 * Bid)}$ 으로 나타났으며, 우리나라 한 가구당 기금 지불의사금액은 5,645원으로 추정되었다 (Fig 1).

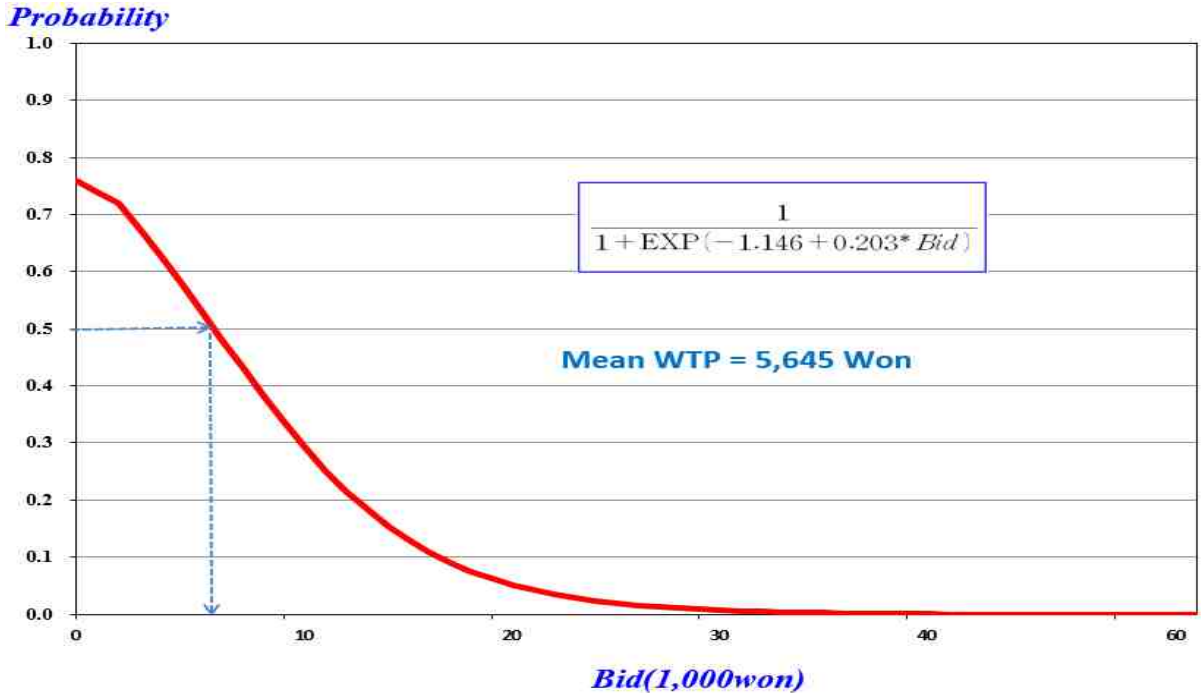


그림 140. 보전 기금 로짓모형 결과

표 43. 최종 로짓모형 추정 결과

Variable	B	S.E	Wald	df	p-value	EXP(B)
Bid(1,00won)	-0.203	0.021	97.220	1	0.000	0.816
Constant trem	1.146	0.106	117.727	1	0.000	3.144

라. 결론 및 고찰

멸종위기 침엽수 분비나무의 보전가치를 평가하고, 객관적인 지표를 제시하기 위해 전국민을 대상으로 보전가치 평가를 실시하였다. 연구결과 멸종위기 침엽수 분비나무의 보전 기금의 지불의사금액 응답자는 2,000명 중 1,100명으로 지불 의향이 있는 것으로 조사되었으며, 보전 기금 지불의사 이유를 살펴본 결과 미래세대에게 물려줄 책임이 있음이 가장 높게 나타났다. 또한 가구당 보전기금을 추정한 결과 5,645원, '23년 우리나라 약 2,177만 가구수를 환산한 결과 약 1,229억원의 보

전가치가 있는 것으로 추정하였다.

멸종위기 고산지역 침엽수 분비나무의 보전가치 평가 결과를 바탕으로 국민들에게 멸종위기 침엽수 분비나무에 대한 자원의 중요성 및 가치에 대한 인식을 제고시키고, 더불어 보전정책을 추진하고 있는 수단으로 활용이 가능할 것이다. 또한 중앙정부 및 지자체에게는 멸종위기 침엽수 보전의 필요성 및 당위성에 대한 객관적인 지표를 제공할 수 있을 것으로 판단 된다.

보전가치를 화폐적 가치로 환산하여 언론보도(뉴스, 신문), 캠페인 등을 통해 국민들에게 홍보함으로써 보전사업에 대한 관심을 높일 수 있을 것이고, 이외에도 멸종위기 침엽수 분비나무의 보전 교육, 서식지 복원 연구, 세미나, 박람회 등 다방면으로 국민들과 함께 동참하고 소통할 수 있는 창구를 만들어 갈 수 있는 적극적인 보전정책 및 관리방안이 동반되어야 할 것이다. 또한 멸종위기 침엽수 분비나무의 보전·복원을 위한 예산을 집행하는데 있어 정당한 평가를 하는 근거자료로 활용될 수 있을 것이다(Lee, 2023).

분비나무 보전기금을 지불하려는 이유가 미래 세대에게 멸종위기 침엽수 분비나무를 물려주기 위해(유산가치)가 높게 나타남에 따라 연구자들의 연구 뿐만 아니라, 국민들도 함께 저탄소 생활 실천 등을 통해 기후변화를 막기 위한 노력을 통해 함께 멸종위기 침엽수 분비나무 보전을 위해 함께 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

<참고문헌>

- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223–1232.
- Baek, W.-G. 1999. The status of endemic plants in Korea and our tasks in the 21st century. *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 29(3), 263–263.
- Barbet Massin, M., Jiguet, F., Albert, C. H., & Thuiller, W. 2012. Selecting pseudo absences for species distribution models: How, where and how many? *Methods in ecology and evolution*, 3(2), 327–338.
- Betts, M. G., Diamond, A., Forbes, G., Villard, M.-A., & Gunn, J. 2006. The importance of spatial autocorrelation, extent and resolution in predicting forest bird occurrence. *Ecological Modelling*, 191(2), 197–224.
- Buisson, L., Thuiller, W., Casajus, N., Lek, S., & Grenouillet, G. 2010. Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution. *Global Change Biology*, 16(4), 1145–1157.
- Byeon JG., Cheon K., Lee DH., Heo TI., Lee JW., Kim JD., and Park BJ. 2020. The Character of Community Structure and Distribution for *Thuja koraiensis* Nakai, South Korea. *Korea Journal of Plant Resources*. 33(2): 93–105.(in korean).
- Center for Plant Conservation. CPC Best Plant Conservation Practices to

- Support Species Survival in the Wild. Center for Plant Conservation: Escondido, CA, USA. 2019.
- Chun, Y.M., Hong, M.P., Lee, N.Y., Seo, E.K. and Lee, S.H. 2012. Structure and dynamics of *Taxus cuspidata* populations. Korean Journal of Plant Resources 25(1): 123–131.
- Climate Change 2021 The Physical Science Basis—Summary for Policymakers. 2021. IPCC: Geneva, Switzerland. Aizawa M, Yoshimaru H, Saito H, Katsuki T, Kawahara T, Kitamura K, Shi F, Sabirov R, Kaju M. 2009. Range-wide genetic structure in a north-east Asian spruce (*Picea jezoensis*) determined using nuclear microsatellite markers. Journal of Biogeography 36:996–1007.
- Convention on Biological Diversity. 1992. pp. 1–30.
- Convention on Biological Diversity Global Strategy for Plant Conservation. <https://www.cbd.int/gspc/> (accessed on 2011).
- Curtis, J. T. and McIntosh, R. P. 1951. An Upland Continuum in the Prairie–Forest Border Region of Wisconsin. Ecological Society of America 32(3): 476–496.
- Dar, A. A., and N. Parthasarathy. 2023. Herb stratum diversity and community structure in Gurez valley of Kashmir Himalaya: application of multivariate techniques in community analyses. Geology, Ecology, and Landscapes: 1–17.
- Department for Environment Food & Rural Affairs. <https://planthealthportal.defra.gov.uk>. Accessed on 22. Dec. 2023.

- Department of Agriculture, Food and the Marine. 2021. Forest Health. Pest Information Note 2 of 2021. The eight-toothed spruce bark beetle (*Ips typographus*). Accessed on 22. Dec. 2023.
- Duckett, P.E., Wilson, P.D. and Stow, A.J. 2013. Keeping up with the neighbours: Using a genetic measurement of dispersal and species distribution modelling to assess the impact of climate change on an Australian arid zone gecko (*Gehyra variegata*). *Divers. Distrib* 19: 964 - 976.
- Eun-Sook Kim , Ji-Sun Lee, Go-Eun Park and Jong-Hwan Lim Change of Subalpine Coniferous Forest Area over the Last 20 Years *J. Korean Soc. For. Sci.* Vol. 108, No. 1, pp. 10~20 (2019).
- F. Dormann, C., M. McPherson, J., B. Araújo, M., Bivand, R., Bolliger, J., Carl, G., G. Davies, R., Hirzel, A., Jetz, W., & Daniel Kissling, W. 2007. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. *Ecography*, 30(5), 609–628.
- Freeman, A.M. 1993. *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*, Resources for the Future. p.516.
- Franklin, J., Wejnert, K. E., Hathaway, S. A., Rochester, C. J., & Fisher, R. N. 2009. Effect of species rarity on the accuracy of species distribution models for reptiles and amphibians in southern California. *Diversity and distributions*, 15(1), 167–177.
- Franklin, J. 2010. *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*, Cambridge University Press.

- Galbreath, K. E., Hafner, D. J., & Zamudio, K. R. 2009. When cold is better: climate-driven elevation shifts yield complex patterns of diversification and demography in an alpine specialist (American pika, *Ochotona princeps*). *Evolution*, 63(11), 2848–2863.
- Gallagher, R.V., Hughes, L. and Leishman, M.R. 2013. Species loss and gain in communities under future climate change: Consequences for functional diversity. *Ecography* 36: 531 - 540.
- Gaston, K. J., and K. J. Gaston. 1994. What is rarity? Chapman and Hall, London.
- Germino, M.J., W.K. Smith and A.C. Resor. 2002. Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone. *Plant Ecol.* 162:157 - 168.
- Golicher, D., L. Cayuela, R. Alkemade, M. Gonzalez-Espinosa and N. Ramirez-Marcial. 2008. Applying climatically associated species pools to the modeling of compositional change in tropica montane forests. *Global Ecol. Biogeogr.* 17:262–273.
- Guerrant, E.O.; Fiedler, P.L. Accounting for sample decline during ex situ storage and reintroduction. In *Ex Situ Plant Conservation: Supporting Species Survival in the Wild*. Guerrant, E.O., Havens, K., Maunder, M., Eds.; Island Press: Washington, USA, 2004; pp. 365 - 385.
- Han, B. S. and S. H. Kim. 1977. The comparison of travel cost method with contingent valuation method in the non - Marketedresource

- valuation: The methodological superiority. *Journal of the Tourism Sciences Society of Korea* 20(2): 15–13.
- Haneman, W. M. 1984. Welfare evaluation in contingent valuation experiments with discrete responses. *American Journal of Agricultura Economics* 71(3): 1057–1061.
- Harcombe, P. A., and Marks, P. L.. 1978. Tree diameter distributions and replacement processes in southeast Texas forests. *Forest Science* 24(2):153–166.
- Hasegawa, S.F. and A. Mori. 2007. Structural characteristics of *Abies mariesii* saplings in a snowy subalpine parkland in central Japan. *Tree Physiol.* 27(1):141 - 148.
- Hijmans, R.J. and Graham, C.H. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Glob. Change Biol* 12: 2272 - 2281.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate Change 2014: Synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC.Geneva. Switzerland. pp. 151.
- IPCC. 2023. *Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of working Groups I, II, and III to the fourth assessmeent report of the intergovernmental panel on climate change.* In Core writing team, Pachauri, R.K and A. Reisinger (eds.), IPCC, Geneva,

Switzerland.

- Jang, J. 2019. Valuation of jirisan National Park's Ecosystem Services Using the Choice Experiment Method(CE). Korean Institute of Forest Recreation and Welfare. 23(2):49-57.
- Kang, K. R., K. C. Le, H. T. Le, B. R. Ryu and D. P. Kim(2010) A study on economic value of Daegu arboretum based on contingent valuation methods. Journal of the Korean Society of Environment and Ecology 25(5): 787-798.
- KFS (Korea Forest Service). 2023. Introduction of Main planning on Korea Forest Service. www.forest.go.kr.
- Koo, K.A. and D.B. Kim. 2020. Review Forty-year Studies of Korean fir (*Abies koreana* Wilson). J. Ecol. Environ. 34(5):358-371.
- Kong, W.S. 2002. Species composition and distribution of Korean Alpine Plants. J. korean Geogr. Soc. 37: 357-370.
- Krutilla, J. V. 1967. Conservation reconsidered. American Economic Review 57:777-786.
- Kullman, L. 2002. Rapid recent range-margins rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. Journal of Ecology 90:68-77.
- Kwak, S.Y. and Lee, C.H. 2015. Resarch on national ship for environment in 2015. Korea Environment Institute. pp. 3.
- Lee, C, K. 2013. Estimating the Preservation Value of Dokdo: Using Two Stage Contingent Valuation Method. journal of tourism sciences. 37(4):117-139.

- Lee, D.K. and J.U. Kim. 2007. Vulnerability Assessment of Sub-Alpine Vegetations by climate Change in Korea. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 10(6):110-119.
- Lee, H.-Y., B.-K. Chung., Y.-M. Chun., and C.-H. Oh. 2021. The Research on the Phytosociological Characteristics of *Abies nephrolepis* Maxim. Community in Mt. Seorak, Korea. Korean Journal of Environment and Ecology 35:37-47.
- Lee, K.J., Kim, J.Y. and Kim, D.W.. 1998. Plant Community Structure of Paekdam-Valley in Soraksan National Park. Kor. J. Env. Eco. 11(4):450-461.
- Lee, S.H., Lee, D. H., Byeon J. G. 2023. Preservation Value of Endangered Alpine Coniferous Species. Journal of Korean Society of Forest Science. 112(3): 322-330.
- Lee, S.-J., Shin, D.-B., Byeon, J.-G., & Oh, S.-H. 2023. Climate Change Vulnerability Assessment and Ecological Characteristics Study of *Abies nephrolepis* in South Korea. Forests, 14(4), 855.
- Naimi, B., Skidmore, A. K., Groen, T. A., & Hamm, N. A. 2011. Spatial autocorrelation in predictors reduces the impact of positional uncertainty in occurrence data on species distribution modelling. Journal of biogeography, 38(8), 1497-1509.
- Naudiyal, N., J. Wang., W. Ning., N. P. Gaire., S. Peili., W. Yanqiang., H. Jiali., and S. Ning. 2021. Potential distribution of *Abies*, *Picea*, and *Juniperus* species in the sub-alpine forest of Minjiang

headwater region under current and future climate scenarios and its implications on ecosystem services supply. *Ecological Indicators* 121:107131.

Meshinev, T., I. Apostolova and E.S. Koleva. 2000. Influence of warming on timberling rising: a case study on *Pinus peuce* Griseb. in Bulgaria. *Phytocoenologia* 30: 431–438.

Mori, A., E. Mizumachi, T. Osono and Y. Doi. 2004. Substrate-associated seedling recruitment and establishment of major conifer species in an old-growth subalpine forest in central Japan. *For. Ecol. Manag.* 196(2–3): 287 – 297.

Kim D.H., Sim K.Y., Kwon H.G., Han S.Y. 2022. How Does the Endangered Species Restoration Project Benefit the Community. *Journal of National Park Reserarch* 13(1): 139–146.

Kim, J., Lim, J.H. and Yun, C. 2019. Dynamics of *Abies nephrolepis* seedlings in relation to environmental factors in Seorak Mountain, South Korea. *Forests* 10: 702.

Kim, K. O., S. H. Hong., Y. H. Lee., C. S. Na., B. H. Kang., Y. W. Son. 2009. Taxonomic status of endemic plants in Korea. *Journal of Ecology and Environment* 32:277–293.

Kong, W.-S. 2004. Species composition and distribution of native Korean conifers. *Journal of the Korean Geographical Society* 39(4): 528–543.

Korea Climate Change Assessment Report 2020. 2020. Ministry of Environment: Seoul, Korea.

- Noh, H.J. 2003. Intrinsic Value in Biodiversity and Moral Education 86:115–137.
- Park, H.C., Lee, J.H., Lee, G.G. and Um, G.J. 2015. Environmental features of the distribution areas and climate sensitivity assesment of Korean Fir and Khinghan Fir. *Journal of Enviromental Impact Assess* 24(3): 260–277.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst* 37:637–669.
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Townsend Peterson, A. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of biogeography*, 34(1), 102–117.
- Pielou, E. C. 1977. *Mathematical ecology*. Wiley, New York.
- Rubidge, E. M., J. L. Patton., M. Lim., A. C. Burton., J. S. Brashares., and C. Moritz. 2012. Climate-induced range contraction drives genetic erosion in an alpine mammal *Nature Climate Change* 2:285–288.
- Segurado, P., Araujo, M. B., & Kunin, W. 2006. Consequences of spatial autocorrelation for niche based models. *Journal of Applied Ecology*, 43(3), 433–444.
- Shannon, C. E. and Weaver, W. 1949. *The mathematical theory of communication* University of Illinois. Illinois, USA. pp. 144.
- Sim, K.Y. 2013. A study on Economic Value of National Park based on

Contingent Valuation Methods. Korean Institute of Forest Recreation and Welfare. 17(4):33-40.

Shin, Y.M., Nam, J.W., Kim, D.K., Byun, B.K., Kim, I.K. 2018. Two lepidopteran pests and damage on the cones of *Abies koreana* (Pinaceae) in Jeju Island, Korea. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 11: 80-86.

Simon, A., K. Katzensteiner., and G. Gratzner. 2019. Drivers of forest regeneration patterns in drought prone mixed-species forests in the Northern Calcareous Alps. *Forest ecology and management* 453:117589.

Song, H.K. 2000. Study on classification of forest vegetation of Songinbong and Taeharyong in Ullungdo -With a special reference to TWINSpan and phytosociological method-Korean Journal of Environment and Ecology 14(1): 57-66.

Song, H.K., Lee, M.J., Yee, S., Kim, H.J. and Kwon, O.W.. 2003. Vegetation Structures and Ecological Niche of *Quercus mongolica* Forests. *Jour. Korean For. Soc.* 92(4): 409-420.

Sun, S.C. and Chen, L.Z. 2000. A preliminary study on the ecological responses of seedlings to drought and simulated defoliation in *Quercus liaotungensis*. *Acta Ecologica Sinica* 20(5): 893-897.

Tellez, O., P. Davila, M. Ayala, K. Gutierrez and I. Melchor. 2007. Case studies on the effect of climate change on the flora of Mexico. *Bgjournal* 4(2):17-21.

- Villén Pérez, S., Heikkinen, J., Salemaa, M., & Mäkipää, R. 2020. Global warming will affect the maximum potential abundance of boreal plant species. *Ecography*, 43(6), 801–811.
- Walther, G. R., S. Beißner., and C. A. Burga. 2005. Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16:541–548.
- Woo, L. S., Hoon, Y. B., Don, H. S., Ho, S. J., & Joo, L. J. 2008. Genetic variation in natural populations of *Abies nephrolepis* Max. in South Korea. *Annals of forest science*, 65(3), 1.
- Yuqi, W., Lee, S.-J., Shin, D.-B., Lee, A.-R., Byun, J.-G., Lim, C. H., Bae, K. H., & Oh, S.-H. 2023. Vegetation characteristics and assessment of habitat suitability for *Pedicularis ishidoyana* Koidz. & Ohwi (Scrophulariaceae) community. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*.
- Yim, K. B., Park, I. H., & Lee, K. J. 1980. Phytosociological changes of *Pinus densiflora* forest induced by insect damage in Kyonggi-do area. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 50(1), 56–71.
- Yoon KH, Kong WS. 2011. Distribution and climate factors of *Picea jezoensis* native to the Korean peninsula. *Kor Geog Soc Proceedings of Conference on Geography*: 68–72. [in Korean with English abstract]
- Villén Pérez, S., Heikkinen, J., Salemaa, M., & Mäkipää, R. 2020. Global warming will affect the maximum potential abundance of boreal

plant species. *Ecography*, 43(6), 801-811.

공우석. 2006. 한반도에 자생하는 소나무과 나무의 생물지리. *대한지리학회지* 41(1):73-93.

구경아, 박원규, 공우석. 2001. 한라산 구상나무(*Abies koreana* W.)의 연륜 연대학적 연구-기후변화에 따른 생장변동 분석-. *한국생태학회지* 24(5):281-288.

구경아, 박원규, 공우석. 2001. 한라산 구상나무(*Abies koreana* W.)의 연륜 연대학적 연구 -기후변화에 따른 생장변동 분석-. *한국생태학회지* 24:281-288.

국립백두대간수목원. 2021. 산림종자 품질관리 업무매뉴얼(행정간행물등록번호: 11-B554620-000007-07)

산림청. 산림병해충. <https://www.forest.go.kr>. Accessed on 22. Dec. 2023.

이유미, 조동광, 정수영, 장정원, 오승환, 양종철, 유혜선. 2009. 식별이 쉬운 나무 도감. 국립수목원. Geobook. 725 pp.

이호영, 정보광, 전영문, 오충현. 2021. 설악산 분비나무군락의 식물사회학적 특성. *한국환경생태학회지*, 35(1): 37-47.