

NIE-법정연구-2024-08

2024년 외래생물 정밀조사

Investigating Ecological Risk of Alien Species

조사평가본부 생태조사연구실 외래생물팀

2024

국립생태원

National Institute of Ecology

연구진

연구책임자	송종원	외래생물팀	전임연구원
연구참여자(내부)	백혜준	외래생물팀	연구전문직(부책임자)
	조영호	외래생물팀	책임연구원
	박영준	외래생물팀	선임연구원
	안정섭	외래생물팀	전임연구원
	엄순재	외래생물팀	전임연구원
	이수인	외래생물팀	전임연구원
	조아람	외래생물팀	전임연구원
	김다은	외래생물팀	연구전문직
	박지은	외래생물팀	연구전문직
	석민정	외래생물팀	연구전문직
	유혜린	외래생물팀	연구전문직
	최동희	외래생물팀	연구전문직
연구참여자(외부)	권용주	경기대학교	(마블가재 조사 지원)
	박근용	경기대학교	(마블가재 조사 지원)
	김예지	경기대학교	(범무늬뽕족민달팽이 조사 지원)
	김륜미	경기대학교	(범무늬뽕족민달팽이 조사 지원)

본 연구진은 연구윤리를 준수하였음을 서약합니다.

요약문

1. 제목

2024년 외래생물 정밀조사

2. 목적

본 연구는 잠재적 위해성이 높은 외래생물의 자연 생태계 유입·정착·확산 가능성 및 사회·경제·질병 영향 등 위해성을 파악하여 생태계위해성 평가자료를 확보하고, 체계적인 관리대책 수립을 위한 대상종의 기초자료를 구축하는 데 목적이 있다.

3. 연구내용 및 방법

가. 조사기간: 2024년 1 ~ 12월

나. 대 상 종: 노랑알락하늘소, 범무늬뽕족민달팽이, 마블가재

다. 조사내용: 대상종의 기본정보, 유입·정착·확산 가능성 등 침입성, 생태계 및 사회·경제·질병 영향, 경제 가치 조사

라. 조사방법: 목견조사, 통발 조사, 식이물 분석, 기생성 선충류 분석, 병원성 곰팡이류 분석, 전국 분포조사, 식생 조사, 기후적합도 분석 등

4. 연구결과

가. (가칭)노랑알락하늘소

노랑알락하늘소는 중국 남부, 베트남, 라오스, 대만 등 동아시아 아열대 지역을 원산으로 하는 알락하늘소(*Anoplophora*)속 하늘소이다. 국내에는 2019년부터 발견 기록이 확인되고 있으며, 최소 2015년 이전에 유입된 것으로 추정된다. 노랑알락하늘소는 현재까지 제주도 제주시 용연계곡 반경 4km 이내에서만 발견되고 있으며 주로 팽나무를 가해하는 것으로 알려져 있다. 연구 결과 2023년에는 용연계곡으로부터 2.2km 거리의 해태동산까지 팽나무 탈출공이 발견되었으며, 2024년에는 용연계곡으로부터 4.0km 거리의 제주서중학교에서 발견되어 1년 사이에 최대 1.8km의 분포 범위가 확장되었다.

노랑알락하늘소의 밀도가 가장 높은 용연계곡 하류부를 거점출현지로 선정, 노랑알락하늘소의 선호 서식지 조사 결과 생태계 유형보다 기주식물인 팽나무의

분포 여부가 노랑알락하늘소의 서식지 적합도에서 더욱 중요한 요인이었으며, 팽나무 외, 천선과나무, 좁은잎천선과나무에서 각각 1개씩 발견되었다. 식이물 분석 결과 총 11속의 식물을 섭취하는 것으로 확인되었으며, 그중 높은 비율로 천선과나무와 좁은잎천선과나무에 해당하는 무화과나무속이 확인되었다.

노랑알락하늘소의 주요 기주식물인 팽나무는 제주도 내 보호수로 99그루가 등록·관리되고 있으며, 천연보호구역인 제주 성읍리 느티나무 및 팽나무 군락, 기타 산림보호구역 등에서 가치를 인정받아 보존, 관리되고 있다. 따라서, 노랑알락하늘소가 제주도 전역으로 확산할 경우, 이에 대한 피해가 우려된다. 이뿐만 아니라, 해외 문헌에서 팽나무 외 굴나무, 차나무 등 다양한 목본류를 가해할 수 있다고 알려져 있으므로, 국내 차 생산의 40%를 담당하며 매년 40만톤 내외의 감귤을 생산하고 있는 제주도에 확산할 경우 국내 농가에 피해를 끼칠 가능성이 높다.

노랑알락하늘소는 외형이 독특하고 아름다워, 곤충 애호가들 사이에서 관심이 높으며, 실제로 표본의 형태로 인터넷상에서 거래, 교환되고 있다. 이는 노랑알락하늘소가 내륙으로 유입될 가능성을 제공할 수 있으며, 노랑알락하늘소의 서식지가 제주항과 인접하여 컨테이너 등 이동 과정에서 비의도적으로 내륙에 진입할 수 있는 등, 내륙으로의 확산 또한 우려스러운 상황이다. 노랑알락하늘소와 유사종인 유리알락하늘소는 세계 100대 외래생물로 지정되어 전 세계적으로 관리되고 있으며, 기주식물을 별채하는 방법만이 유일한 근절 방법이었다. 따라서, 노랑알락하늘소의 방제가 필요시, 확산 범위가 한정적인 초기 유입단계에서 근절할 필요가 있다고 판단되었다.

나. (가칭)범무늬뽕족민달팽이

범무늬뽕족민달팽이는 영국, 프랑스, 독일, 노르웨이 등 유럽 지역을 원산으로 한 민달팽이로, 1870년대 이후 뉴질랜드 등 세계 여러 지역으로 농작물과 원예작물, 토양 등에 혼입되어 침입한 외래생물이다. 일본의 경우 2006년 삿포로에서 첫 발견 이후 2012년에는 100km 떨어진 곳에서 발견될 만큼 농산물 등의 혼입으로 빠르게 확산할 가능성이 높은 종이다. 국내에서 범무늬뽕족민달팽이는 수원 밤발청개구리공원과 안안골 인근 지역 반경 1km 이내에서만 확인되고 있으며, 밤발청개구리공원 내에서 1,000개체 이상 확인될 정도로 높은 밀도로 출현하고 있다. 선호하는 서식지는 산림 보다는 인간의 생활반경 내 위치한 농가, 공원 주변 폐기물 적재지로, 향후 인간활동으로 인해 비의도적으로 확산될 가능성이 높다. 범무늬뽕족민달팽이는 주로 균류, 떨어진 꽃잎, 과일, 동물의 배설물 등 생물의 사체나 유기물을 섭식하는 분해자로 알려져 있으나, 과실수, 밭작물 등에도

가해가 가능하여 일부 국가에서는 농업해충으로 분류하였다.

범무늬뽕족민달팽이를 비롯한 병안류(달팽이목)의 기생성 선충류는 전 세계적으로 보고되고 있으며, 호주에서는 범무늬뽕족민달팽이를 생식하여 뇌수막염에 감염되는 등 사례가 보고된 바 있다. 본 연구에서 선충류 조사 결과 뇌수막염을 일으키는 선충류는 발견되지 않았다. 범무늬뽕족민달팽이는 초기 방제를 제외하고는 방제가 거의 불가능하다고 알려진 생물이다. 현재까지 범무늬뽕족민달팽이의 분포 양상을 미루어 봤을 때, 현재는 도입 혹은 증식 단계로 보여진다. 따라서, 방제를 실시하고자 한다면 현재가 적기라고 판단되며, 지속적인 모니터링을 통해 확산 여부를 추적할 필요가 있을 것으로 사료되었다.

다. 마블가재

마블가재는 독일의 애완동물 시장에서 확인된 단성생식 민물 가재로, 원 서식지는 알려진 바 없으나, 원종인 *Procambarus fallax*는 플로리다를 원 서식지로 하고 있다. 마블가재는 주로 식물성 먹이를 선호하나 동물성 먹이도 섭취가 가능하며, 단성생식으로 번식하는 생리적 특성으로 인해 환경이 적합하다면 단 1개체 만으로도 생태계 내 침입이 가능한 생물이다. 마다가스카르에서는 마블가재의 개체수가 너무나 증가한 탓에, 하천 내 먹이원을 독점하였고, 중국에는 하천 내 종 다양도에 영향을 준 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 국내에서는 마블가재를 2019년부터 유입주의 생물로 지정·관리되고 있으며 추가적인 수입이 발생할 가능성이 낮다. 하지만, 1990년대 중반부터 애완동물 명목으로 수입·사육되어 현재까지 애완 가재로 유통되고 있으며, 번식 난이도가 낮은 탓에 국내에서는 이미 많은 개체수가 사육되고 있는 실정이다.

국내 생태계에서 마블가재가 발견되기 시작한 시점은 2021년으로, 부산 평화공원에서 1개체가 발견되었다. 유입주의 생물이 자연생태계에서 발견된 사례였으므로, 2022년 정밀조사를 실시하였으나 당시 발견된 장소는 오직 3개소 뿐이었다. 하지만 2024년 정밀조사 결과 마블가재는 총 7개소(4개소: 실개체 확인, 3개소: 유전자 확인)에서 발견되어 출몰지가 2022년 대비 2배 이상 확대되었다. 특히, 부산 시민공원에서는 높은 밀도로 출현하는 것이 확인되었으며 남산 생태경관보전지역과 불과 10여 미터 떨어진 남산 야외식물원 내 연못에서도 발견되어 생태경관보전지역 내 유입이 우려되는 상황이다.

마블가재의 질병 분석 결과 가재곰팡이병과 간 디스토마 모두 검출되지 않았으나, 수족관에서 주로 발견되는 환형동물류가 확인되어 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

5. 연구결과의 활용에 대한 건의

가. 연구결과 활용

- 1) 각 종별 법정관리종 지정을 위한 생태계위해성 평가자료 제공
- 2) 생태특성을 기반으로 한 관리방안 수립을 위한 필수자료 마련
- 3) 유입주의 생물인 마블가재의 재조사에 따른 생태계 영향 파악 및 관리방안 수립을 위한 기초자료 제공
- 4) 기존에 연구되지 않은 외래생물에 대한 조사를 통해 국내 생태계 영향 파악
- 5) 종별 정밀조사를 통해 국내 생태계 영향 최소화를 위한 방안 제시
- 6) 외래생물의 종별 형태적·생태적 특성 등 연구 결과를 바탕으로 한 교육·홍보·자료 배포

〈목 차〉

요 약 문	I
목차	V
표 목차	VI
그림 목차	VII
국문요약	IX
Abstract	X
I. 서 론	1
II. 연구내용 및 방법	4
1. 노랑알락하늘소	4
2. 범무늬뽕족민달팽이	9
3. 마블가재	13
III. 연구결과 및 고찰	19
1. 노랑알락하늘소	19
2. 범무늬뽕족민달팽이	44
3. 마블가재	66
IV. 결론 및 제언	90
참 고 문 헌	93

〈표 목차〉

표 1. 외래생물 정밀조사 및 생태계위해성 평가 대상종	2
표 2. 2024년 외래생물 정밀조사 대상종 선정사유	3
표 3. 범무늬뽕족민달팽이 거점 출현지 조사 일정 및 조사영역	10
표 4. 범무늬뽕족민달팽이 분포 범위 야간 조사 일정 및 조사영역	10
표 5. 대상지별 마블가재 최초발견 일시 및 연도별 발견 현황(2021-2023)	13
표 6. 마블가재 조사구 위치 및 조사구별 통발 조사 횟수	14
표 7. 유전자분석에 사용된 샘플의 채집지역 및 날짜	17
표 8. 노랑알락하늘소 거점출현지 용연계곡 현존식생도 조사 결과	25
표 9. 종분포 예측 모형에 사용된 환경변수	31
표 10. 노랑알락하늘소 기주 가능 종 목록(학명, 국명은 국가생물종목록을 따름)	33
표 11. 거점출현지(용연계곡) 내 노랑알락하늘소 기주 의심 종 목록	34
표 12. 노랑알락하늘소 식이물 분석에 따른 식물계 속(Genus) 단위 발생빈도	35
표 13. <i>Celtis</i> 속(팽나무류)을 기주로 하는 하늘소 목록(임종욱 등, 2014)	38
표 14. 범무늬뽕족민달팽이 거점 출현지 출현 개체수 및 평균 전장	46
표 15. 범무늬뽕족민달팽이 분포 범위 조사 출현 개체수 및 평균개체밀도	48
표 16. <i>Limax</i> spp. 9종과 외군의 interspecific divertisy 값(p-distance)	49
표 17. 범무늬뽕족민달팽이 MaxEnt모델의 환경변수들에 대한 기여도, 중요도	57
표 18. 선충류(Nematoda) metabarcoding 결과 및 생태 특성	64
표 19. 2022년-2024년 마블가재 정밀조사 비교(현장조사)	69
표 20. 2022년-2024년 마블가재 정밀조사 비교(eDNA 조사)	70
표 21. 마블가재 채수지점 및 분석 결과	72
표 22. 마블가재 MaxEnt 모델의 환경변수들에 대한 기여도 및 중요도	78
표 23. <i>Aphanomyces astaci</i> 와 <i>Distoma</i> 검출을 위해 사용된 샘플정보	85
표 24. 부산 시민공원 및 평화공원의 저서성대형무척추동물 동소종 목록	87

〈그림 목차〉

그림 1. 임업진흥원과의 업무협약의 및 현장조사	5
그림 2. 노랑알락하늘소 서식조사 및 현존식생도 조사	6
그림 3. 노랑알락하늘소 식이물 분석	8
그림 4. 노랑알락하늘소 Maxent 생물종 분포모델 모식도	8
그림 5. 범무늬뽕족민달팽이 조사방법	11
그림 6. 마블가재 조사 도구 및 포획 방법	14
그림 7. 국내 자연생태계 마블가재 발견 지점 39개소	15
그림 8. Worldclim 2.1 30초 격자 생물기후인자의 상관관계 분석	16
그림 9. 노랑알락하늘소 조사 지점 전경	21
그림 10. 노랑알락하늘소 출현 지점	22
그림 11. 노랑알락하늘소 27개체 485bp를 이용하여 작성한 ML tree	23
그림 12. 노랑알락하늘소 전 세계 분포	24
그림 13. 노랑알락하늘소 거점출현지인 용연계곡 현존식생도	24
그림 14. 노랑알락하늘소 표본 판매 현황	26
그림 15. 노랑알락하늘소의 생김새	27
그림 16. 우화과정에서 발생하는 노랑알락하늘소 탈출공	28
그림 17. 화물 등에 혼입되어 타국가로 이동한 사례(노랑알락하늘소)	29
그림 18. 분포지와 국내 기후 생물기후인자 히스토그램 비교	30
그림 19. 노랑알락하늘소 환경변수 중요도 잭나이프 테스트	31
그림 20. 노랑알락하늘소의 잠재적 분포 및 환경변수 기여율	32
그림 21. 팽나무 탈출공 직경 및 천선과나무류에서 발견된 탈출공	34
그림 22. 인터넷 커뮤니티 등에 게시된 노랑알락하늘소 포획 실태	37
그림 23. 용연계곡 인근 제주향 모습	37
그림 24. 제주도 별도관리지역(국립공원, 천연보호구역 등), 제주도 보호수 위치	39
그림 25. 노랑알락하늘소 팽나무 가해 현황	41
그림 26. 노랑알락하늘소의 짹짹기가 확인된 지석묘 옆 팽나무	42
그림 27. 노랑알락하늘소 방제 현황 (좌: 끈끈이 트랩, 우: 현수막 설치)	43
그림 28. 범무늬뽕족민달팽이 출현 지점 및 확산 현황	45

그림 29. 범무늬뽕족민달팽이 계절별 몸길이 변화(봄: 160개체, 여름: 549개체) ·	47
그림 30. 범무늬뽕족민달팽이 27개체 575bp를 이용하여 작성한 ML tree ·····	49
그림 31. 범무늬뽕족민달팽이 전 세계 분포 ·····	50
그림 32. 범무늬뽕족민달팽이 선호 서식지 분석(밤밭청개구리공원 현존식생도) ··	51
그림 33. 범무늬뽕족민달팽이의 형태적 특징 ·····	52
그림 34. 범무늬뽕족민달팽이의 서식 특성 ·····	53
그림 35. 국내 생태계 내에서 범무늬뽕족민달팽이 먹이 활동 ·····	54
그림 36. 범무늬뽕족민달팽이 교미 ·····	55
그림 37. 야채 등을 섭취하는 범무늬뽕족민달팽이 ·····	56
그림 38. 범무늬뽕족민달팽이 MaxEnt 모형의 ROC 커브. ·····	57
그림 39. 범무늬뽕족민달팽이 MaxEnt 모형의 응답곡선 ·····	58
그림 40. 범무늬뽕족민달팽이의 잠재적인 정착 가능성(좌: 전세계, 우: 대한민국) ·	58
그림 41. 인간활동으로 인해 비의도적 운반 가능성이 높은 범무늬뽕족민달팽이	60
그림 42. 마블가재 인터넷 등 구매 가능 현황 ·····	67
그림 43. 마블가재 국내 분포 지도 ·····	68
그림 44. 죽당천 및 부산 시민공원에서 채집한 마블가재 25개체와 <i>Procambarus</i> spp. 4종 95개체 CO I 유전자 559bp를 이용하여 작성한 ML tree. ·····	73
그림 45. 마블가재와 원종(<i>Procambarus fallax</i>) 전 세계 분포 및 발견시기 ·····	74
그림 46. 마블가재 계절별 서식처 내 수온 · 용존산소량 비교 ·····	75
그림 47. 마블가재 형태적 특성 ·····	76
그림 48. 마블가재 MaxEnt 모형의 ROC 커브 ·····	78
그림 49. 마블가재 MaxEnt 모형의 응답곡선(HII, D.W, W.T, bio3, bio14) ·····	79
그림 50. MaxEnt를 활용한 마블가재의 잠재적인 유입 및 정착 가능성 예측 ·····	80
그림 51. 행정구역별 마블가재의 유입 및 정착 가능성이 높은 지역의 면적 ·····	80
그림 52. 포란 중인 마블가재(좌) 및 생애주기별로 포획된 마블가재(우) ·····	82
그림 53. 부산 시민공원 내 통발 위치별 마블가재 포획 현황 ·····	84
그림 54. 높은 밀도와 개체수로 출현하는 마블가재(부산 시민공원) ·····	85
그림 55. <i>Vejdovskyella comata</i> 의 형태 및 분포 현황 ·····	86
그림 56. 남산 생태경관보전지역 주변 마블가재 서식지(직접조사, eDNA 조사) ·	88

국문요약

외래생물 정밀조사 사업은 국내 유입된 외래생물을 법적으로 관리하기 위해 시행하는 생태계위해성 평가의 기초자료 제공에 목적이 있으며, 2024년에는 3종을 대상으로 연구를 수행하였다. 노랑알락하늘소는 제주도 용연계곡 주변 반경 4km 이내에서 분포하는 것을 확인하였으며, 2023년에 1,123개체가 확인되었으며, 2024년에는 815개체가 포획되었다. 관리하지 않을 경우 내륙으로 유입될 가능성이 높으며, 유입 시 남부 해안선을 따라 확산할 것으로 보이며, 팽나무 등 기주식물을 가해하여 피해를 줄 것으로 확인되었다. 범무늬뽕족민달팽이는 경기도 수원시 밤밭청개구리공원과 안안골 주변 반경 2km 이내에서 1,000개체 이상 확인되었다. 개체수가 많고 생애주기를 모두 수행하는 것으로 보아 정착가능성이 매우 높고, 폐기물 밑에서 휴면하는 생태적 특성으로 인해 확산 가능성 또한 높은 것으로 확인하였다. 유입주의 생물인 마블가재는 2022년 외래생물 정밀조사에서 3개 지점에서 확인되었으나 2024년 외래생물 정밀조사에서 7개 지점(4개 지점: 실개체, 3개 지점: 유전자 검출)에서 출현이 확인되었다. 마블가재는 부산 시민공원에서 높은 밀도로 확인되었으며, 그 외 부산 평화공원, 남산 야외식물원 등 시민들의 이용이 많은 공원에서 종종 발견되었다. 마블가재는 오랜 기간 동안 국내에서 애완동물로 사육되어왔고, 번식 난이도가 낮아 관리하지 않을 경우 시민들의 지속적인 방류, 자연적인 확산 등으로 인해 여러 수변공원이나 하천으로 유입될 가능성이 높을 것으로 확인되었다.

주요어: 외래생물 정밀조사, 노랑알락하늘소, 범무늬뽕족민달팽이, 마블가재

Abstract

「Investigating Ecological Risk of Alien Species」project aims to provide fundamental data for ecosystem risk assessment, with the purpose of legally managing introduced alien species in South Korea. We studied 3 speices, Yellow Citrus Longhorned Beetle (*Anoplophora chinensis*), Leopard Slug (*Limax maximus*), and Marbled Crayfish (*Procambarus virginalis*), in 2024.

The nationwide survey on the distribution of the Yellow Citrus Longhorned Beetle revealed its presence within a 4 km radius around Yongyeon Valley, Jeju Island. A total of 1,123 individuals were identified in 2023, while 815 individuals were captured in 2024. The likelihood of inland dispersal is high if not managed, with potential spread along the southern coastline, causing damage to host plants such as hackberry trees (*Celtis* spp.).

The Leopard Slug was found in large numbers, with over 1,000 individuals confirmed within a 2 km radius of Bam Bat Frog Park and Anangol in Suwon, Gyeonggi Province. Its high population density and life cycle completion suggest a very high likelihood of establishment. Additionally, its ecological trait of dormancy under waste materials indicates a high potential for spread.

The Marbled Crayfish, an alert alien species, was identified at three locations during the 2022 investigation and at seven locations in 2024. It was found in high densities in Busan Citizen Park and sporadically in other parks with high public activity, such as Busan Peace Park and Namsan Outdoor Botanical Garden. The Marbled Crayfish has been kept as a pet in South Korea for a long time and is easy to breed. If not managed, it is highly likely to spread to waterfront parks and streams through ongoing releases by citizens and natural dispersal.

I. 서론

1980년대 컨테이너 물류의 표준화와 1990년대 개발도상국의 산업화 등 다양한 요인이 맞물리면서, 전 세계 교역의 비중은 19세기 초에 비해 3배 이상 확대되었다(Hulme, 2021). 국제 물동량과 함께, 여행객의 증가로 의도적·비의도적 외래생물의 국내 유입 가능성이 높아지고 있으며, 이로 인해 국내 생태·사회·경제적 피해도 증가하고 있다(환경부, 2019). 침입 외래생물을 제거하기 위한 국제적 노력에도 불구하고, 전 세계적으로 신규 확인된 외래생물 건 수 증가율은 국제 무역 성장률을 상회하는 수준에 이르렀으며, 국내에서 보고된 외래생물 역시 2009년에서 2021년 사이에 3배 증가하였다(IPBES, 2019; 환경부 2020; 이효혜미 등, 2021; Hulme, 2021). 또한, 관상용으로 수입된 애완동물이 의도적·비의도적으로 자연생태계에 유입, 정착하여 확산되는 사례가 증가하고 있으며, 애완동물 수요 증가로 신규 외래생물이 해외에서 수입된 뒤 유기되는 사례가 발생하고 있다(환경부, 2019).

이처럼 급변하는 환경 속에서 외래생물의 유입·정착이 가속화되고, 이로 인해 국내 생태계에 영향을 미치는 사례가 급격히 증가하고 있다. 따라서, 외래생물의 유입 초기 단계에서 정밀조사를 통해 국내 생태계에 미치는 위해성을 파악하고, 분류군별 생태적 특성에 기반으로 한 체계적 관리가 요구된다.

「외래생물 정밀조사」는 2006년부터 2013년까지 국립환경과학원에서 수행되었으며, 2014년 국립생태원으로 이관되어 현재까지 지속되고 있다. 본 사업은 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」 제21조의2에 따라 유입주의 생물 또는 외래생물 등에 대해 생태계 등에 미치는 위해성 평가를 위한 자료 생산을 목적으로 하고 있다. 2006년 이후 2024년까지 총 104종이 연구되었으며, 조사 결과는 해당 외래생물의 생태계위해성을 평가하기 위한 근거 자료로 활용된다(표 1).

2024년에는 국내 분포 현황 및 해외 자료를 바탕으로 생태학 관련 21개 학회·협회의 전문가, 생태계위해성 평가 소속 전문가, 내부 전문가 등의 의견수렴을 통해 2속 37종의 정밀조사 후보종을 발굴하였다. 이후 국내 서식이 불분명한 유입주의 생물, 최근 3년 이내에 위해성 평가 생물, 국내 생태계 위해성이 낮다고 판단되는 생물 등의 사유를 바탕으로 1속 18종을 제외한 1속 19종을 대상으로 타부처 회람·내부 논의 실시하였고, 발굴 결과 노랑알락하늘소, 범무늬뿔족민달팽이, 마블가재를 2024년 외래생물 정밀조사 대상종으로 선정·연구를 수행하였다(표 2).

표 1. 외래생물 정밀조사 및 생태계위해성 평가 대상종

연도	외래생물 정밀조사			위해성 평가		
	종수	동물	식물	종수	동물	식물
계	104	59	45	106	58	48
'06	11	뉴트리아, 붉은가재, 까치, 흑염소, 사슴	서양금혼초, 양미역취, 미국미역취, 쇠채아재비, 나도독미나리, 캐나다영경귀	※ '06~'10까지는 외래생물 정밀조사를 시행하고 생태계위해성을 평가하여 생태계교란종 지정 건의 ※ 2011년 3월(외래생물의 생태계위해성 평가 방법 등에 관한 규정이 제정) 이후는 이 규정에 따라 생태계위해성 평가		
'07	6	왕우렁이, 떡봉어, 산천어	애기수영, 가시비름, 미국썩부쟁이			
'08	5	사향쥐, 무지개송어	비짜루국화, 미국가막사리, 큰김의털	7	뉴트리아, 떡봉어, 왕우렁이	서양금혼초, 양미역취, 애기수영, 미국썩부쟁이
'09	5	중국봉어, 집쥐, 꽃매미	가시상추, 나래가막사리	7	꽃매미, 집쥐	가시상추, 큰김의털, 비짜루국화, 미국가막사리, 나래가막사리
'10	5	돼지풀잎벌레, 고양이	가죽나무, 족제비싸리, 창질경이			
'11	6	미국선녀벌레, 미국흰불나방, 염소	가죽나무, 미국실새삼, 만수국아재비	11	사향쥐, 꽃매미, 고양이, 돼지풀잎벌레	가시상추, 큰김의털, 미국가막사리, 가죽나무, 나래가막사리, 창질경이, 비짜루국화
'12	6	방패광대노린재, 외래거북 3종	울산도깨비바늘, 큰비짜루국화	6	염소, 미국선녀벌레, 미국흰불나방	족제비싸리, 미국실새삼, 만수국아재비
'13	5	등검은말벌, 버즘나무방패벌레, 왕달팽이	미국좁부처꽃, 대청가시풀	6	등검은말벌, 방패광대노린재	가시비름, 미국미역취, 울산도깨비바늘, 큰비짜루국화
'14	6	늑대거북, 악어거북, 갈색날개매미충, 해바라기방패벌레, 대만꽃사슴	달맞이꽃	8	늑대거북, 악어거북, 갈색날개매미충, 버즘나무방패벌레, 대만꽃사슴	큰도꼬마리, 백령풀, 동탄지
'15	6	집토끼, 알팔파바구미, 나일틸라피아	갯줄풀, 영국갯끈풀, 앵무새깃	8	굴토끼, 무지개송어, 알팔파바구미, 해바라기방패벌레	갯줄풀, 영국갯끈풀, 물냉이, 앵무새깃
'16	6	사향쥐, 쿠터류, 뽕죽날개선녀벌레	왕도깨비가지, 서양갯냉이, 미국자리공	8	사향쥐, 나일틸라피아, 쿠터류, 미국선녀벌레, 왕달팽이	왕도깨비가지, 미국자리공, 환삼덩굴
'17	6	왕우렁이, 리버쿠터, 무창어, 소나무허리노린재	들목새아재비, 점개구리밥	6	왕우렁이, 리버쿠터, 무창어, 소나무허리노린재, 붉은불개미	서양갯냉이, 점개구리밥
'18	5	라쿤, 중국줄무늬거북, 미국가재	큰금계국, 마늘냉이	6	미국가재, 중국줄무늬목거북, 등검은말벌	큰금계국, 마늘냉이, 들목새아재비
'19	5	라쿤, 구피, 플로리다붉은배거북	도꼬마리속, 핑크물리	7	악어거북, 구피, 플로리다붉은배거북, 긴다리비틀개미, 라쿤	도꼬마리속, 핑크물리
'20	5	에조사슴, 브라운송어, 아르헨티나개미	벤티지, 돼지풀아재비	7	에조사슴, 브라운송어, 아르헨티나개미, 빗살무늬미주메뚜기, 대서양연어	벤티지, 돼지풀아재비
'21	5	외래꽃사슴류, 늑대거북	나도솔새, 벤티지, 돼지풀아재비	7	외래꽃사슴류, 늑대거북, 피라냐, 아프리카발톱개구리	나도솔새, 벤티지, 돼지풀아재비
'22	4	비단거북류, 마블가재	미국실새삼, 서양산딸기	6	비단거북류, 마블가재, 중국미꾸라지, 열대불개미	미국실새삼, 서양산딸기
'23	4	무지개송어, 북경도마뱀부치, 열대긴수염개미	물여뀌바늘	4	무지개송어, 북경도마뱀부치, 열대긴수염개미	물여뀌바늘
'24	3	노랑알락하늘소, 범무늬뽕족민달팽이, 마블가재		2	노랑알락하늘소, 범무늬뽕족민달팽이	

표 2. 2024년 외래생물 정밀조사 대상종 선정사유

구분	종 명	선정 사유
동물	노랑알락하늘소 (<i>Anoplophora horsfieldii</i>) 원산지: 중국, 대만, 인도, 라오스, 등 중국남부~동남아시아 일대	○ 기본정보 - 2019년 제주도 용담동에서 최초 발견된 이후 용연계곡 일대에서 대 발생 확인 및 7월 중순까지 2,000여개체 확인(제주자연생태공원) ○ 위해성 등 연구 필요성 - 같은 속의 유리알락하늘소는 세계 100대 악성 외래종으로 북미 등 침입하여 피해를 주고 있으며 국내에서도 중국에서 유입 추정되는 개체군이 부산, 인천 등 각지에서 대발생 피해 - 기주식물인 팽나무를 심하게 가해하며 끝내 고사하게 함. 제주기념물 내 노거수(팽나무)에서도 발견되었으므로 보호수 피해 우려(제주도 보호수 159그루 중 99그루 팽나무(62%)) - 원서식지 문헌자료에 따르면 팽나무 뿐만 아니라 차나무, 증가시나무, 비술나무 등에도 기주할 수 있어 국내 차 생산의 40%를 점유하는 제주도 차 산업에도 큰 영향을 미칠 것으로 보임 - 제주도내 개체군을 존치할 경우 곤충 채집가, 여행객, 물류이동 등에 따라 내륙에도 확산될 수 있어 추가적인 피해 발생 가능성 농후
	범무늬뾰족민달팽이 (<i>Limax maximus</i>) 원산지: 유럽, 북아프리카, 아시아	○ 기본정보 - 2023년 8월 수원시 밤발청개구리공원 일대에서 발견 - 도입경로는 불명확 ○ 위해성 등 연구 필요성 - 위도가 유사한 일본에서 2006년도에 발견되었으며, 현재 일본열도 전역으로 확산 중 - 기후가 유사한 일본의 확산 경우와 같이 국내 정착 가능성이 높음 (월동할 것으로 추정됨) - 타 지역에서의 분포 및 개체군 형성에 대한 자료가 전무한 상황 - 몸집이 크고 잡식성으로 농작물 및 식생 등에 심각한 피해를 줄 수 있어 국내 생태계에 미칠 수 있는 영향에 대한 조사 필요
	마블가재 (<i>Procambarus virginalis</i>) 원산지: 미국 남부 조지아, 플로리다 등	○ 기본정보 - 2023년 12월 경기도 이천시 죽당천에서 서식개체(1개체) - 애완동물 거래를 통해 유통되던 개체의 방사 결과로 추정 ○ 위해성 등 연구 필요성 - 단성생식하는 유일한 십각목 동물로 모든 개체는 암컷임 - 애완동물로 전세계적으로 유통되고 있으며, 독일, 이탈리아, 네덜란드, 마다가스카르, 일본에서 심각한 침입외래종으로 지정됨 - 국내에서는 2015년 위해우려종, 2019년에 유입주의 생물로 지정·관리 - 2021년 10월 부산에서 1개체가 발견되어 정밀조사 수행·생태계위해성 평가를 수행하였으나 평가등급 보류, 2024년 재평가 - 미디어(유튜브)에서도 이천 죽당천에서 서식개체 확인, 웹페이지(네이처링)에도 부산 서식개체 확인 등 '23년 국내 서식 지속 확인되어 추가적인 조사와 평가 필요

II. 연구내용 및 방법

1. (가칭)노랑알락하늘소

가. 연구방법

1) 분포 현황 및 팽나무 입목 피해 조사

노랑알락하늘소를 선제적으로 조사하고 있던 기관인 한국임업진흥원과 2024년 6월 업무협의를 통해 2023년, 2024년 산림병해충 모니터링 결과 확보하였으며, 합동조사를 1회 실시하였다.

임업진흥원의 2023년 산림병해충 모니터링 결과자료 및 2024년 산림병해충 모니터링 결과를 공유받았으며, 국립생태원 조사내용과 더불어 2024년 외래생물 정밀조사 내용에 반영하였다.

합동조사는 2024년 7월 노랑알락하늘소 출현시기에 맞춰 실시하였으며, 주/야간 조사를 병행하였다. 노랑알락하늘소가 주로 위치하고 있는 팽나무의 수간을 포충망으로 흔들거나, 육안 조사를 통해 노랑알락하늘소의 서식 여부를 확인하였다. 노랑알락하늘소가 발견될 경우 포충망 등을 이용해 포획, 살아 있는 개체의 경우 코니컬튜브에 넣어 배설을 유도하였다. 또한, Gaia GPS를 활용하여 위치데이터 기록, 포획된 정보는 Qgis를 통해 시각화하였다(그림 1).



국립생태원-임업진흥원 업무협의



임업진흥원 노랑알락하늘소 피해조사 계획도



국립생태원-임업진흥원 합동조사



노랑알락하늘소 포획



수간에 있는 노랑알락하늘소 물리적 조사

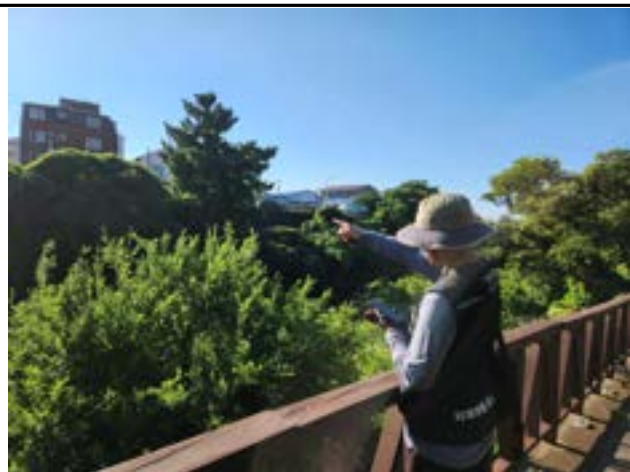
그림 1. 임업진흥원과의 업무협의 및 현장조사

2) 거점출현지역 내 문헌상 기주식물, 탈출공 크기 조사 및 현존식생도 작성
2023년 7월에 수행한 사전답사 과정에서 용연계곡 및 주변 1km 내외에서 노

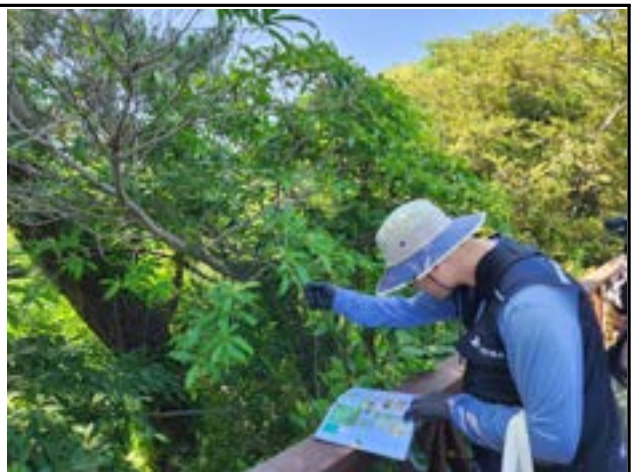
랑알락하늘소 성체 및 탈출공 확인하였으며, 용연계곡을 거점 서식지로 판단한 뒤 조사계획을 수립하였다.

조사는 문헌상에 기록된 노랑알락하늘소의 기주식물 중 국내 서식하는 생물 9종(차나무, 동백나무, 팽나무, 멸구슬나무, 종가시나무, 비술나무 등) 및 동일 속(Genus)에 속하는 국내 출현종 40종을 목록화하여 용연계곡 하류 거점출현지역 내 서식 여부를 조사하였다. 또한, 거점출현지 내 모든 목본 식물에 대하여 탈출공 조사를 실시하였다. 노랑알락하늘소의 탈출공은 원형에 가까웠으므로 장축만을 조사하였다(그림 2).

또한, Qgis를 활용하여 용연계곡 주변 vworld 위성영상을 수집, 위성영상과 실제 식생을 바탕으로 현존식생도를 작성하였다. 현존식생도는 노랑알락하늘소의 거점출현지인 용연계곡 내 수계를 제외한 전 지역에서 실시되었으며, 동일식생이 소규모로 반복될 경우 단일 패치로 분류하여 제작하였다(그림 2).



거점출현지 현존식생도 작성



거점출현지 내 목본 식물 동정



좁은잎천선과나무 탈출공 확인



탈출공 지름 측정

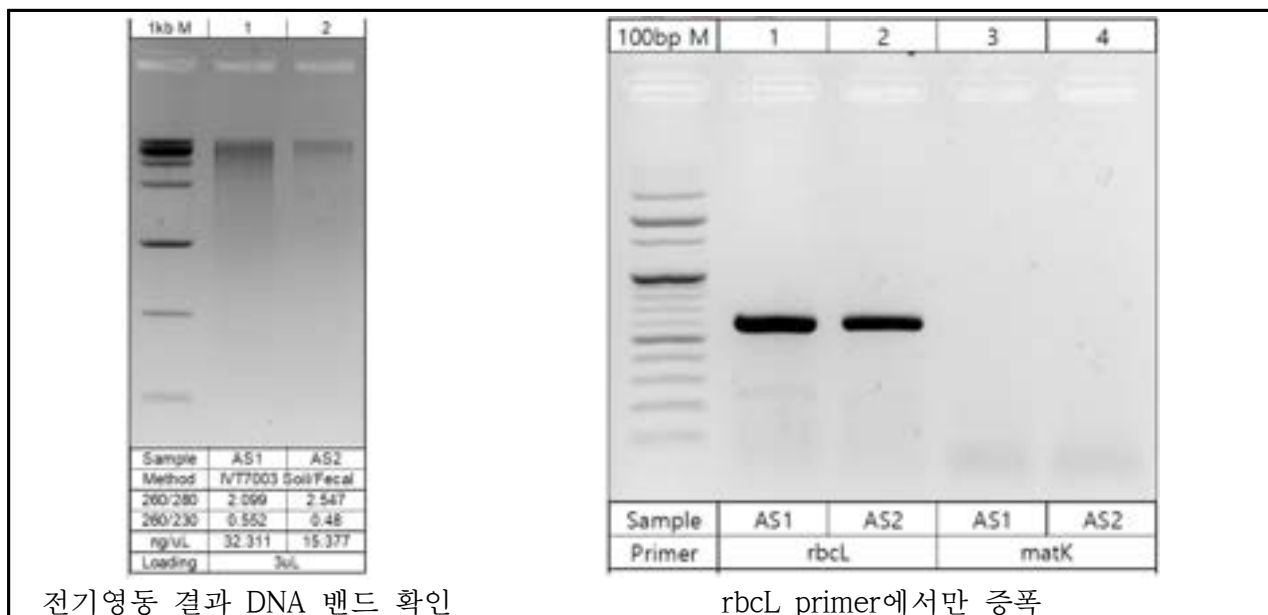
그림 2. 노랑알락하늘소 서식조사 및 현존식생도 조사

3) 분자유전학적 연구를 통한 계통 확인

노랑알락하늘소의 명확한 종 동정을 위하여 mtDNA 중 cytochrome c oxidase subunit I (CO I) 유전자를 증폭하였다. DNA추출은 Clear-STM Quick DNA extraction kit (IVT3002)을 사용하였다. CO I 증폭은 barcode universal primer를 사용하였으며, COI_LepF(5' -ATTCAACCAATCATAAAGATATTGG-3')와 COI_LepR (5' -TAAACTTCT GGATGTCCAAAAAATCA-3')를 이용하였다. 노랑알락하늘소의 염기서열은 Geneious 5.3.6(BIOMATTERS, 뉴질랜드)와 CLUSTAL X(Thompson *et al.*, 1997)을 이용하여 multiple alignment를 수행하였고, 각 집단 내 혹은 집단 간 유전적 거리는 MEGA version 5(Tamura *et al.*, 2011)의 p-distance를 이용하여 도출하였다. 또한 동일 프로그램을 이용하여 Maxium likelihood(ML)계통도를 작성하였다. 계통도를 작성하기 위한 reference 염기서열은 NCBI(National Center for Biotechnology Information)에 등록되어있는 한국, 중국, 대만, 태국, 라오스, 베트남의 *Anoplophora horsfieldi* 12개 서열을 사용하였으며, 외군으로는 동일속의 *A. glabripennis*와 *A. chinensis*의 서열을 사용하였다. ML tree를 작성하기 위한 best fit model은 MEGA version 5(Tamura *et al.*, 2011)를 이용해 도출하였으며, TN93+G 모델을 적용하였다.

4) 노랑알락하늘소 식이물 분석

노랑알락하늘소가 선호하는 식이물을 확인하기 위해 노랑알락하늘소 13개체의 분변을 확보, 식이물 분석을 실시하였다. 노랑알락하늘소의 분변 확보는 노랑알락하늘소를 포획 직후 배설하는 것에 한하였으며, 배설을 유도하기 위한 추가적인 약품처리, 먹이 제공 등은 실시하지 않았다. DNA추출은 Beniprep, Soil/fecal DNA extraction kit(INVIRUSTECH, 한국)를 사용하였으며, 50-60℃로 24시간 이상 건조한 뒤 시료로 사용하였다. PCR 조건 및 사용된 primer는 식물 universal primer인 rbcLa(550bp)와 matK(850bp) primer를 사용하였으며, metabarcoding 분석을 실시하였다. Kraken2, Bracken, Pavian 소프트웨어를 활용하여 FASTQ 파일을 contig를 만들고 이후 BLAST_Ripper-Meta pipeline을 이용하여 분석하였다. BLAST는 Planta로 한정하여 검색하였으며, BLAST 결과에서 얻은 TaxID를 기반으로 로컬 분류학 데이터베이스('names.dmp', 'nodes.dmp')에서 종, 속, 과, 목에 대한 계통 분류 정보를 추가하였다(그림 3).



전기영동 결과 DNA 밴드 확인

rbcl primer에서만 증폭

그림 3. 노랑알락하늘소 식이물 분석

6) 종분포모델링을 통한 노랑알락하늘소 국내 정착 가능성

종분포모형을 위해 maximum-entropy approach를 활용한 MaxEnt 분석을 실시하였다. 국내 자연생태계에서 발견된 위치 좌표가 한 지역에 국한되어 있어 국내외 좌표 188개와 기주식물 5종의 분포, 기후요인 등을 활용해 노랑알락하늘소의 정착 가능성이 높은 서식지를 도출하였다.

MaxEnt 분석을 위해 생물기후요인 19개를 사용하였으며, 생물기후요인은 WorldClim version 2.1(2.5 arc minutes)의 생물기후지도(bio1~19)를 사용하였다. 기후변화에 따른 변화는 SSP5-8.5 미래기후시나리오를 투영하여 예측하였으며, 현재 분포와 2050년대 기후변화에 따른 분포범위 예측을 수행하였다(그림 4).



그림 4. 노랑알락하늘소 Maxent 생물종 분포모델 모식도

2. (가칭)범무늬뽕족민달팽이

가. 연구방법

1) 조사지 정보

국내에서 보고된 범무늬뽕족민달팽이는 유입 시기 및 경로에 대한 정보가 불명확하여, 최초 출현이 보고된 밤발청개구리공원과 안안골 일대를 거점출현지로 선정하였다. 밤발청개구리공원은 도심 내 위치한 생태공원으로, 숲속 놀이시설, 생태학습장, 배드민턴장, 게이트볼장 등 다양한 시설이 조성되어 있으며, 주말농장, 등산로 등 환경친화적인 공간으로 조성되어 있다.

범무늬뽕족민달팽이의 현장조사는 iNaturalist에서 확인된 수원시 광교산 남동부 열림공원 유아숲체험원 일대와 네이처링에서 확인된 덕성산 서쪽 부근의 관찰데이터를 포함하여 거점출현지 반경 4km 내 출현이 의심되는 지역을 중점적으로 조사하였다.

범무늬뽕족민달팽이가 야행성이라는 점을 반영하여, 신규 서식조사지점은 야간조사를 실시하였으며, 기존 서식이 알려진 거점출현지의 경우, 주/야간 조사를 병행하여 실시하였다. 주간조사는 범무늬뽕족민달팽이가 은신처로 사용할 수 있는 나무토막, 농막 비닐, 쓰레기봉투, 비료포대 밑 등을 들춰가며 조사를 수행하였다. 야간조사는 일몰 후 최소 30분 이후부터 지표면이나 구조물 위에 부착하여 이동, 먹이활동 등을 하는 개체 위주로 조사하였다.

2) 거점출현지 조사

기존에 서식이 확인된 4개 지점을 기준으로 범무늬뽕족민달팽이의 실제 분포 여부를 파악하기 위해 수원시 율전동의 밤발청개구리공원과 안안골 일대에서 3월, 8월, 9월에 걸쳐 총 6회 조사를 실시하였다. 육안조사는 범무늬뽕족민달팽이가 출현할 가능성이 높은 습도가 높고 축축한 낙엽 더미, 젖은 흙, 지하실, 비닐아래, 수로 주변부 등을 중심으로 주변 지역과 확산이 우려되는 인근 나지 등을 조사하였다.

조사 중 발견된 개체는 전장(mm) 및 발견지점의 GPS를 기록하였으며, 사진을 촬영하였다. 또한 밀도조사를 위해 1m x 1m 범위 내의 개체수를 파악하였다. 일부 개체들은 질병분석, 식이물분석, 계통분석 등의 분자유전학적 연구를 위해 10% 소금물에 담귀 안락사 한 뒤, 70% 알코올에 보관하였다(표 3).

3) 분포 범위 조사

거점 출현지로 선정된 밤발청개구리공원 반경 2km 내 산림, 민가, 농장, 수로 등을 대상으로 범무늬뽕족민달팽이의 확산 범위를 파악하기 위해 조사를 실시하

였다. 조사는 6월-9월까지 총 9회 실시하였다. 조사 경로는 Gaia GPS 어플리케이션을 이용하여 기록하였으며, 이동 경로 내에서 범무늬뽕족민달팽이가 출현한 지점의 GPS 정보를 기록하였다(표 4).

개체가 발견될 경우, 확산 범위를 파악하기 위해 외곽 부근으로 이동하여 확산 분포의 경계를 확인하였다. 또한, 거점 출현지 조사와 마찬가지로 밀도조사를 위해 1m x 1m 범위 내의 개체수를 파악하여 기록하였다(그림 5).

표 3. 범무늬뽕족민달팽이 거점 출현지 조사 일정 및 조사영역

회차	조사일자	조사시간	조사영역
1	24.03.22	주간	밤발청개구리공원 안안골 일대
2	24.03.28	야간	밤발청개구리공원 동쪽경계(안안골)
3	24.08.08	야간	밤발청개구리공원 동쪽경계(안안골)
4	24.09.15	야간	밤발청개구리공원 및 서쪽경계
5	24.09.16	야간	밤발청개구리공원 동쪽경계(안안골)
6	24.09.25	주간	밤발청개구리공원 안안골 일대

표 4. 범무늬뽕족민달팽이 분포 범위 야간 조사 일정 및 조사영역

회차	조사일자	조사영역
1	24.06.18	밤발청개구리공원 동북부일대
2	24.06.21	밤발청개구리공원 동부일대
3	24.06.26	영동고속도로 인근 이목천 방면
4	24.07.17	밤발청개구리공원 서부 일대
5	24.07.24	밤발청개구리공원 서부 일대
6	24.07.31	영동고속도로 인근 의왕방면
7	24.08.13	의왕 월암동 북부 일대
8	24.08.24	밤발청개구리공원 남부 주거지 일대
9	24.09.27	의왕역인근



그림 5. 범무늬뽕족민달팽이 조사방법

4) 분자유전학적 연구를 통한 계통 확인

채집된 범무늬뽕족민달팽이의 종동정 및 유전적다양성을 확인하기 위해 mitochondrial DNA COI(cytochrome c oxidase subunit 1) 유전자를 분석하였다. 2024년 3월 28일 밤발청개구리공원에서 채집된 27개체를 대상으로 실험을 수행하였으며, DNA barcode분석을 위해 외투막(mantle)에서 DNA를 추출하였다(INVIRUSTECH, 한국). PCR 반응조건 및 primer는 Nitz *et al.*(2009)의 방법과 동일하게 수행하였으며, mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I (CO I)의 증폭은 mtCOI-1F-54 (5' -TTTCAACAAAYCATAARGATATTGG-3')와 mtCOI1R-53 (5' -AAYACCAATAGAAATTATAGCATAAA-3')를 이용하였다. 범무늬뽕족민달팽이의 염기서열은 Geneious 5.3.6(BIOMATTERS, 뉴질랜드)와 CLUSTAL X(Thompson *et al.*, 1997)을 이용하여 multiple alignment를 수행하였고, 각 집단

내 혹은 집단 간 유전적 거리는 MEGA version 5(Tamura *et al.*, 2011)의 p-distance를 이용하여 도출하였다. 또한 동일 프로그램을 이용하여 Maximum likelihood(ML)계통도를 작성하였다. 계통도를 작성하기 위한 reference 염기서열은 NCBI(National Center for Biotechnology Information)에 등록되어있는 *Limax* spp. 10종 75개의 서열을 사용하였으며, 외군으로는 *Vitrina pellucida*(Nitz *et al.*, 2009)의 서열을 사용하였다. ML tree를 작성하기 위한 best fit model은 MEGA version 5(Tamura *et al.*, 2011)를 이용해 도출하였고, TN93+G 모델이 선정되었으며, bootstrap은 1,000번의 replicate을 사용하였다.

5) 범무늬뽕족민달팽이 체내 기생성 선충류 검출 실험

수원 밤발청개구리공원에서 채집된 범무늬뽕족민달팽이 5개체를 대상으로 선충(nematoda) 검출 실험을 수행하였다. DNA는 Clear-STM Quick DNA extraction kit IVT3002(INVIRUSTECH, 한국)로 추출하였으며, 전체개체를 50-60°C로 24시간 이상 건조한 뒤 시료로 사용하였다. PCR 조건 및 사용된 primer는 Sikder *et al.* (2020)을 따랐으며, metabarcoding 분석을 실시하였다. FASTQ 파일을 bbduck과 spades를 이용하여 contig를 만들고 이후 BLAST_Ripper-Meta pipeline을 이용하여 분석하였다. BLAST는 namatode로 한정하여 검색하였으며, BLAST 결과에서 얻은 TaxID를 기반으로 로컬 분류학 데이터베이스('names.dmp', 'nodes.dmp')에서 종, 속, 과, 목에 대한 계통 분류 정보를 추가하였다.

6) 종분포모델링을 통한 범무늬뽕족민달팽이 국내 정착 가능성

종분포모형을 위해 maximum-entropy approach를 활용한 MaxEnt 분석을 실시하였다. 국내 자연생태계에서 발견된 위치 좌표가 한 지역에 국한되어 있어 국내외 좌표 22,577개와 환경변수 7개를 활용해 범무늬뽕족민달팽이의 잠재적으로 및 정착 가능성이 높은 서식지를 도출하였다.

MaxEnt 분석을 위해 생물기후요인 19개를 사용하였으며, 생물기후요인은 WorldClim version 2.1(2.5 arc minutes)의 생물기후지도(bio1~19)를 사용하였다. 범무늬뽕족민달팽이 분포에 영향을 미치는 환경 요인을 선정하기 위해 두 단계의 과정을 거쳤다. 먼저, 다중공선성 제거를 위하여 Pearson 상관계수 0.8 이상의 높은 변수를 제외하였으며, 제외되지 않은 변수들을 이용해 MaxEnt 모델을 생성하여 변수의 중요도가 0이 아닌 변수들만 선정하였다. 그 결과 bio2, bio4, bio11, bio12, bio14, bio15, bio19로 총 7개의 변수가 선발되었다.

3. 마블가재

가. 연구방법

1) 전국 분포 조사 출현 의심 지역 선정

마블가재는 2022년 「외래생물 정밀조사」 대상종으로 2022년 당시 남산야외식물원(서울), 용인 정평천(경기), 부산 평화공원(부산)에서 각 1개체 또는 탈피각만 발견되었다. 2023년 「미국가재 생태계위해성 조사 및 관리방안 마련 연구」에서 부산 시민공원에 서식하는 것을 추가 확인하였으며, 당시 구피천으로 유명세를 타던 이천 죽당천 조사 과정에서 마블가재 1개체를 포획하였다.

이를 반영하여, 본 연구에서는 기출현 지점인 부산 평화공원, 남산 야외식물원, 용인 정평천, 부산 시민공원, 이천 죽당천 이상 5개 지점을 고정 조사구로 설정, 통발 조사와 육안조사를 병행하였다. 조사구 중 부산 평화공원, 남산 야외식물원, 부산 시민공원은 인공호수로 출수구 위치, 배출수와 합류되는 자연형 하천의 유무 등 인근 지역으로의 확산가능성을 조사하였으며, 더불어 인접 수계 또한 조사하였다(표 5).

표 5. 대상지별 마블가재 최초발견 일시 및 연도별 발견 현황(2021-2023)

대상지	최초 발견	연도별 발견 현황		
		2021년	2022년	2023년
부산 평화공원	'21.11.	1개체 포획	X	-
남산 야외식물원	'22.4.	-	탈피각 확인	-
용인 정평천	'22.7.	-	1개체 포획	-
부산 시민공원	'23.9.	-	-	1개체 포획
이천 죽당천	'23.12.	-	-	1개체 포획

2) 서식지 조사

가) 현장 조사

현장조사는 봄(5월), 여름(8월), 가을(10월) 계절별 조사를 실시하였으며, 육안 조사와 포획조사(뜰채 및 통발)를 병행하였다. 조사 대상지는 기존 서식이 확인된 5개 지점과 서식가능성이 높은 3개 지점을 추가하여 총 8개 지점에서 수행되었다. 조사 범위 내 출현한 마블가재의 개체수, 동반출현종, 서식지 특성, 먹이 생물, 서식지 환경 등을 기술하였으며, 통발 조사는 7개 지점에 총 40개를 설치하였다. 통발은 하루 밤새 설치 후 수거하였으며, 통발에 채집된 생물은 마블가재, 저서무척

추동물 및 어류 3개 분류군의 종단위 동정 및 개체수를 파악하였다(표 6, 그림 6).

표 6. 마블가재 조사구 위치 및 조사구별 통발 조사 횟수

번호	지점명	지점주소	계절별 통발 갯수		
			5월	8월	10월
1	남산야외식물원	서울 용산구 이태원동	5	5	-
2	정평천	경기도 하남시 덕풍동	10	-	-
3	죽당천 상류(기존 출현지)	경기도 성남시 중원구 은행동	10	10	-
4	죽당천 하류(북하천, 확산 조사)	경기 이천시 부발읍 대관리	-	10	10
5	부산 평화공원	부산광역시 남구 대연동	6	6	6
6	부산시민공원	부산광역시 범전동	9	9	9
7	남산골 한옥마을(확산 조사)	서울 중구 필동2	-	-	10
8	장충단공원(확산 조사)	서울 중구 장충동2가	-	-	5



마블가재 조사 도구



우산형 통발 설치 모습



수질측정 조사



마블가재 체장, 무게 측정

그림 6. 마블가재 조사 도구 및 포획 방법

나) eDNA 조사

마블가재의 추가서식지를 확인하기 위해, 마블가재의 서식가능성이 높은 지점에 대한 현장조사 및 eDNA분석을 병행하였다. eDNA 분석을 위한 프라이머 및 digital PCR방법은 2022년 「외래생물 정밀조사」 마블가재 eDNA 조사 방법을 따랐다. 마블가재의 종 특이마커는 Pro-CO1F(5' -TATATTTTTRTTTTTGGTACYTGAGCTGG-3'), Pro-CO1R(5' -AAAGCATGAGCTGTAACCTACYACATTATA-3'), Provg(5' -FSM-ACCTGGTAGATTAATTGGGGATGATCAA-BHQ1-3')을 사용하였으며, digital PCR은 총 3번 반복 실시하였다. 서울, 부산 경기 총 14개 지점에서 시료를 채수하였으며, 0.45µm 거름망으로 필터 후, Clear-STM Quick DNA extraction kit IVT3002(INVIRUSTECH, 한국)으로 DNA를 추출하였다.

3) 종분포 모델링을 통한 잠재서식지 분석

가) 국내 마블가재 발견 지점

2021년부터 2024년까지 마블가재가 국내 자연생태계 내에서 확인되었던 5개 대상지(서울, 용인, 이천, 부산)의 발견 지점 39개소를 기준으로 하였다(그림 7).

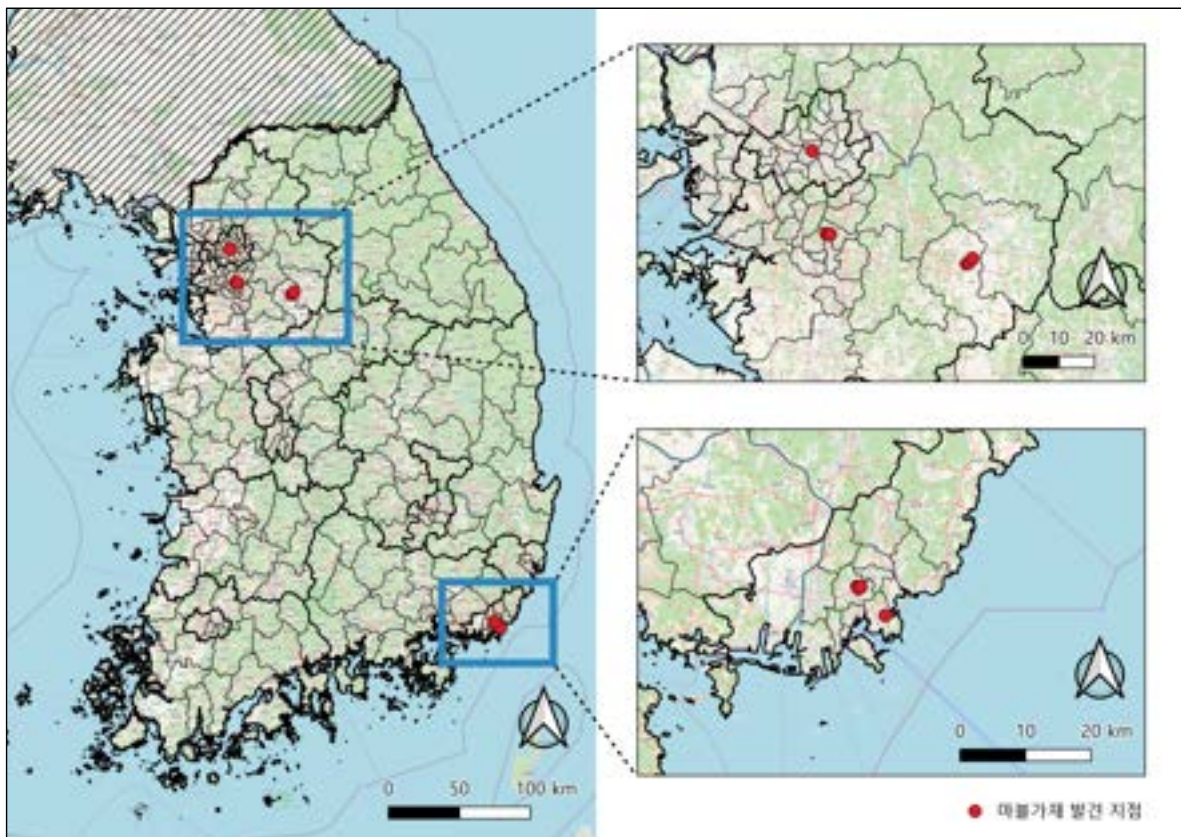
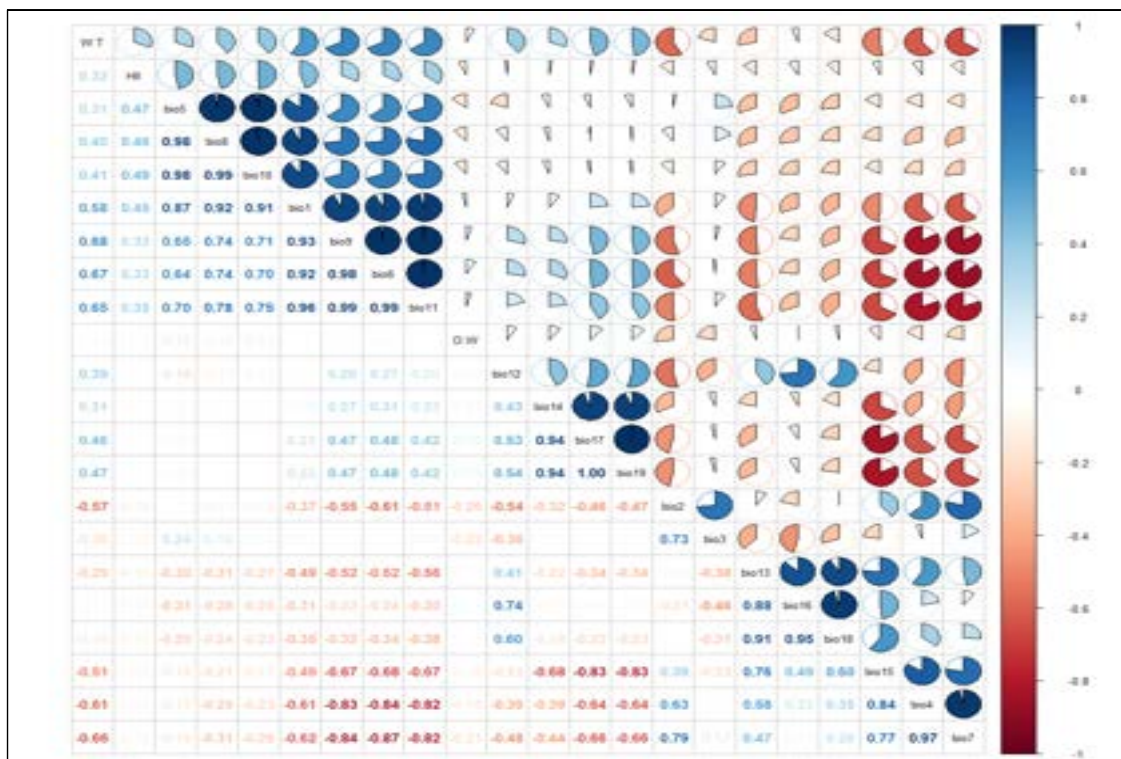


그림 7. 국내 자연생태계 마블가재 발견 지점 39개소

나) 환경변수 선정

MaxEnt 분석을 위해 생물기후요인 19개, 인위적 요인 1개, 환경요인 2개를 사용하였다. 생물기후요인은 WorldClim version 2.1(30 arc-sec)의 생물기후지도(bio1~19)를 사용하였다. 인위적 요인은 인구밀도, 접근성, 토지이용 등의 요인을 지표로 만든 Human Influence Index(HII) version 2(SEDAC)를 사용하였다. 환경요인은 수계로부터 거리(D.W)와 마블가재 생육에 영향을 미치는 최한월의 수온(W.T)을 사용하였다. 수계 데이터로 환경공간정보서비스의 하천구역과 소하천구역 지도를 다운받았으며, 수온은 환경부에서 제공한 물환경 수질측정망을 다운받았다. 두 환경요인은 ArcMap을 이용해 1차 가공하였다. 모든 환경변수는 R에서 50m*50m 해상도(좌표계: EPGS5179)로 변환되었다.

마블가재 분포에 영향을 미치는 환경 요인을 선정하기 위해 두 단계의 과정을 거쳤다. 먼저, 다중공선성 제거를 위하여 Pearson 상관계수 0.8 이상의 높은 변수를 제외하였다. 제외되지 않은 변수들을 이용해 MaxEnt 모델을 생성하여 변수의 중요도가 0이 아닌 변수들만 선정하였다. 그 결과 bio1, bio3, bio4, bio12, bio13, bio14, HII, D.W, W.T의 총 9개의 변수가 선발되었다(그림 8).



4) 분자유전학적 연구를 통한 계통 확인

현장조사 시 채집된 개체의 명확한 종동정을 위하여 mitochondrial DNA(mtDNA) cytochrome c oxidase subunit 1(CO1) 유전자를 분석하였다. 2024년 2월~5월 까지 이천 죽당천과 부산 시민공원에서 채집된 개체 8개체 및 수족관 3곳에서 구입한 17개체를 대상으로 실험을 수행하였으며(표 1), CO1 유전자 부위의 증폭을 위한 PCR 반응조건 및 primer는 선행연구와 동일하게 수행되었다(Sanna *et al.*, 2017; Vrijenhoek 1994). 마블가재의 염기서열은 Geneious 5.3.6(BIOMATTER S, 뉴질랜드)와 CLUSTAL X(Thompson *et al.*, 1997)을 이용하여 multiple alignment를 수행하였고, 각 집단 내 혹은 집단 간 유전적 거리는 MEGA version 5(Tamura *et al.*, 2011)의 p-distance를 이용하여 도출하였다, 또한 동일 프로그램을 이용하여 Maxium likelihood(ML)계통도를 작성하였다. 계통도를 작성하기 위한 reference 염기서열은 NCBI(National Center for Biotechnology Information)에 등록되어있는 *Procambarus* spp. 4종 95개의 서열을 사용하였으며, *P. fallax*(7개), *P. virginalis*(69개), *P. clarkii*(13개), *P. allen*(6개)의 서열을 사용하였다. ML tree를 작성하기 위한 best fit model은 MEGA version 5(Tamura *et al.*, 2011)를 이용해 도출하였고(그림 1), HKY+G 모델이 선정되었으며, bootstrap은 1,000번의 replicate를 사용하였다(표 7).

표 7. 유전자분석에 사용된 샘플의 채집지역 및 날짜

번호	채집지역	개체수	채집일자
1	(수족관)조이하우스_서울시 강남구 개포동 개포로7	8	2024.4.18.
2	(수족관)니모수족관_경상북도 경산시 백암로 35번길 13	3	2024.4.18.
3	(수족관)하뚜니연못_강원도 원주시 판부면 오성마을길 63-25	6	2024.4.19.
4	(현장)경기도 이천시 부발읍 신원리_죽당천	1	2024.2.23.
5	(현장)부산광역시 남구 대연동_부산시민공원	7	2024.5.09.

5) 마블가재 질병 검출 실험

가) 가재곰팡이병(*Aphanomyces astaci*) 감염 여부 확인

가재곰팡이병 감염여부를 확인하기 위해, 6개 지점 12개체를 사용하였으며, 마블가재의 배면 큐티클(cuticle)에서 DNA를 추출해(INVIRUSTECH, 한국), ITS1, 2 약 500bp를 증폭하였다. PCR방법은 nested-PCR을 사용하였으며, 첫 번째 PCR의 primer는 42v2(5'-GCTTGTGCTGGGATGTTCTT-3')와 BO640(5'-CTATCCGACTCCGCATTCTG-3')를 이용하였고, 두 번째 PCR은 525(5'-AAGAAGGCTAAATTGCGGTA-3')와 640(5'-CTATCCGACTCCGCATTCTG-3')을 이용하였으며, PCR반응 조건은 Oidtmann *et al.* (2006)을 따랐다. 이후 증폭된 PCR product에 대한 염기서열을 분석하여, NCBI에서 blast 하였다.

나) 간 Distoma 감염 여부 확인

마블가재의 distoma를 검출하기 위해, 4개지점 8개체를 사용하였다. 검출을 위한 DNA추출은 가재곰팡이병과 동일하게 진행하였으며, PCR은 multiplex방법을 이용하였다. 사용된 프라이머는 Sugiyama *et al.* (2005)와 Bowles *et al.* (1995)의 PhTF1 (5'-TTCCCCAACGTGGCCTTGTGT-3'), PwTF3(5'-GTCTGCGTTCGATGCTGACCTACG-3'), 3S (5'-G GTACCGGTGGATCACTCGGCTCGTG-3'), A28 (5'-, -GGGATCCTGGTTAGTTTTTTCCTCCGC-3')를 사용하였으며, BIT seq(NGS 방식)으로 반응하여 염기서열을 분석하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. (가칭)노랑알락하늘소(*Anoplophora horsfieldii*)

가. 기본정보

1) 분류

- 국명: (가칭)노랑알락하늘소
- 학명: *Anoplophora horsfieldii* (Hope, 1843)
- 영명: 없음(중명: 棟星天牛, 연성천우)
- 이명: *Anoplophora horsfieldi* Hua, 2002

Anoplophora horsfieldi Pu, 1992

Anoplophora nigrofasciatus Breuning, 1961

Anoplophora nigrofasciatus f. *quadrifasciatus* Breuning, 1961

Cerosterna voluptuosa Thomson, 1856

Cyriocrates horsfieldi Aurivillius, 1922

Cyriocrates horsfieldi Kriesche, 1924

Cyriocrates horsfieldi subsp. *tonkinensis* Kriesche, 1924

Cyriocrates horsfieldii Bates, 1890

Cyriocrates nigrotrifasciatus Pic, 1953

Cyriocrates nigrotrifasciatus var. *4-fasciata* Pic, 1953

Melanauster horsfieldii Fairmaire, 1889

Oplophora horsfieldii Hope, 1843

- 생물분류체계: 계(Kingdom) - Animalia

문(Phylum) - Arthropoda

강(Class) - Insecta

목(Order) - Coleoptera

과(Family) - Cerambycidae

속(Genus) - *Anoplophora*

종(Species) - *Anoplophora horsfieldii*

2) 원산지

중국 남부, 대만, 라오스, 베트남, 태국 등 동아시아 아열대 지역

3) 침입지

한국 외 침입지는 보고된 바 없다.

4) 침입경로

노랑알락하늘소가 제주도로 유입된 직접적인 경로는 알려진 바 없으나, 2021년 울산에 입항하는 국제 선박에서 사체가 발견된 사례가 있었으며, iNaturalist 관찰 결과 미국에서도 팽나무 등 기주식물로 제작된 목재 선반 수입 과정에서 혼입하여 들어온 경우도 확인된 바 있다(강태화 등 2021). 이를 토대로 제주도로 유입된 노랑알락하늘소는 목재 등과 같은 수입물류 또는 여행객의 짐에 부착되어 비의도적으로 유입되었을 가능성이 높다.

5) 국내 분포지도

노랑알락하늘소 관련 선행 연구인 Lee *et al.*(2023, 2024)의 연구결과 및 국립생태원과 임업진흥원 등 유관기관 조사에 따르면 노랑알락하늘소의 출현 지점은 제주시 용연계곡 주변 외에서는 발견되지 않았다.

2023년 한국임업진흥원 「제주지역 주요·외래 산림병해충 모니터링」 사업에서는 노랑알락하늘소의 거점출현지로 알려진 제주도 용연계곡을 중심으로 반경 5km 이내에 분포하는 팽나무 2,708주에 대한 탈출공 조사를 수행하였다. 2023년 조사 결과 총 83주의 팽나무에서 탈출공이 발견되었으며, 제주도 용연계곡으로부터 가장 멀리 떨어진 감염목은 2.2km 밖의 해태동산으로 확인되었다.

2024년 동일사업에서 팽나무를 재조사한 결과 14주의 팽나무 감염목을 추가로 발견하였으며, 기존 출현지에서 가장 멀리 떨어진 감염목은 4.0km 떨어진 제주서중학교 인근 팽나무였으며, 1년 사이 1.8km를 이동한 것으로 확인되었다. 그 외에도 제주 향교, 삼성혈, 제주목 관아, 용담지서묘 1호 등 제주시 지정 문화재에 식재된 팽나무에서도 노랑알락하늘소의 탈출공을 다수 확인되었다.

또한, Lee *et al.*(2024)에 따르면 용연계곡으로부터 약 18km 떨어진 애월농협하나로마트 주차장에서도 노랑알락하늘소 사체가 발견되어, 해당 지역을 조사하였으나 주변에 분포하고 있는 팽나무 주변에서 노랑알락하늘소가 서식한 흔적을 찾을 수 없었다(그림 9, 10).



용연계곡 전경



용담공원(용연계곡 인근) 전경



해태동산 전경



끈끈이트랩, 홍보물 시건



애월농협하나로마트 주변 전경 및 팽나무

그림 9. 노랑알락하늘소 조사 지점 전경

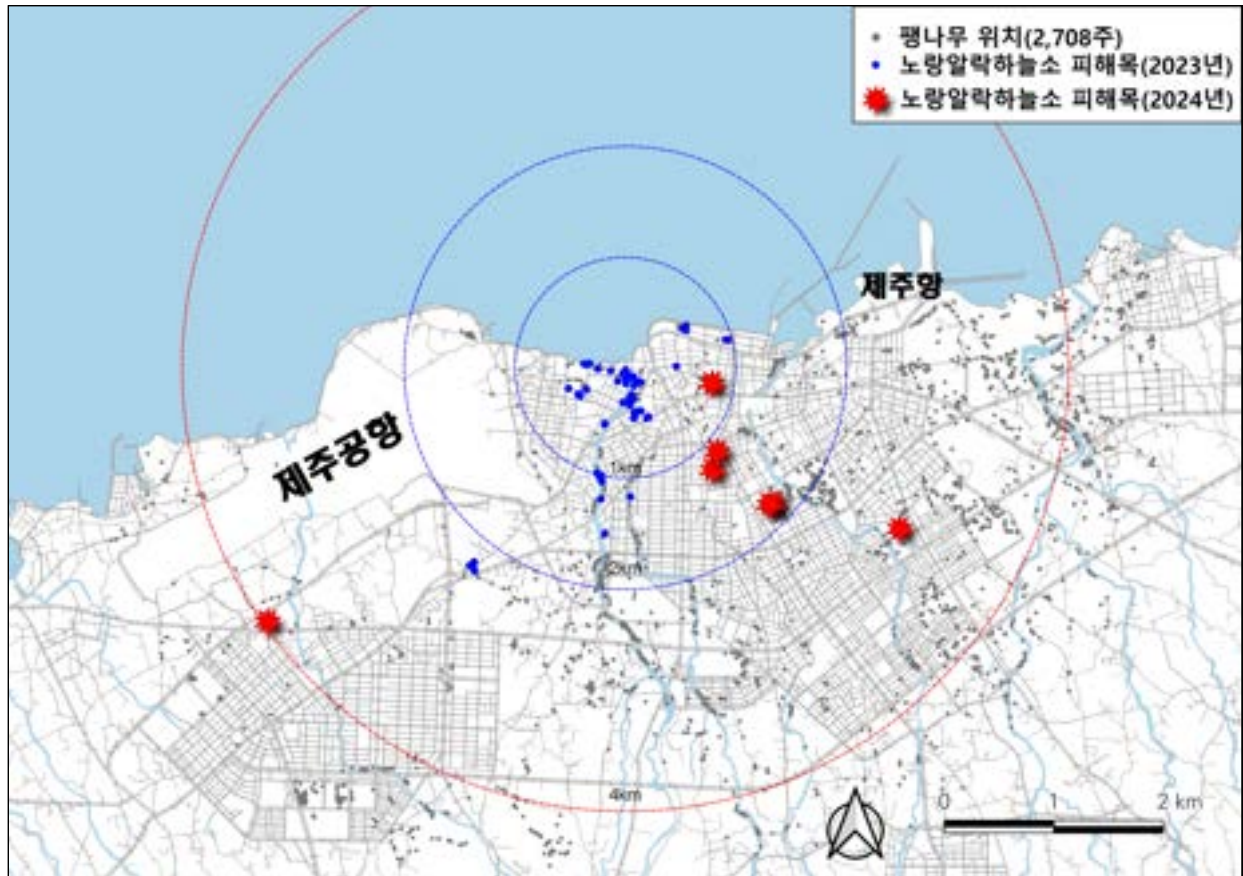


그림 10. 노랑알락하늘소 출현 지점
(출처: 한국임업진흥원 조사자료 재구성)

가) 분자유전학적 연구를 통한 계통 확인

종동정을 위한 유전자분석 결과 2024년 제주에서 채집된 노랑알락하늘소는 모두 노랑알락하늘소로 확인되었다. NCBI에 등록되어있는 노랑알락하늘소 12개 서열과 함께 ML계통도를 작성한 결과 한국에서 채집된 노랑알락하늘소는 독립된 clade를 형성하는 것으로 확인되었다(그림 11). 노랑알락하늘소와 알락하늘소, 유리알락하늘소의 유전적 거리는 약 10%로 확인되었으며, 같은 노랑알락하늘소 내 유전적 거리는 0.2-3.3%로 확인되었다. 한국과 다른 나라에서 채집된 노랑알락하늘소간의 유전자 거리는 0.2-2.7%로 나타났으며, 중국에서 채집된 노랑알락하늘소와 유전적 거리가 가장 낮았으며, 아종으로 분리된 *A. h. tokinensis*와는 1.7% 차이를 보였다.

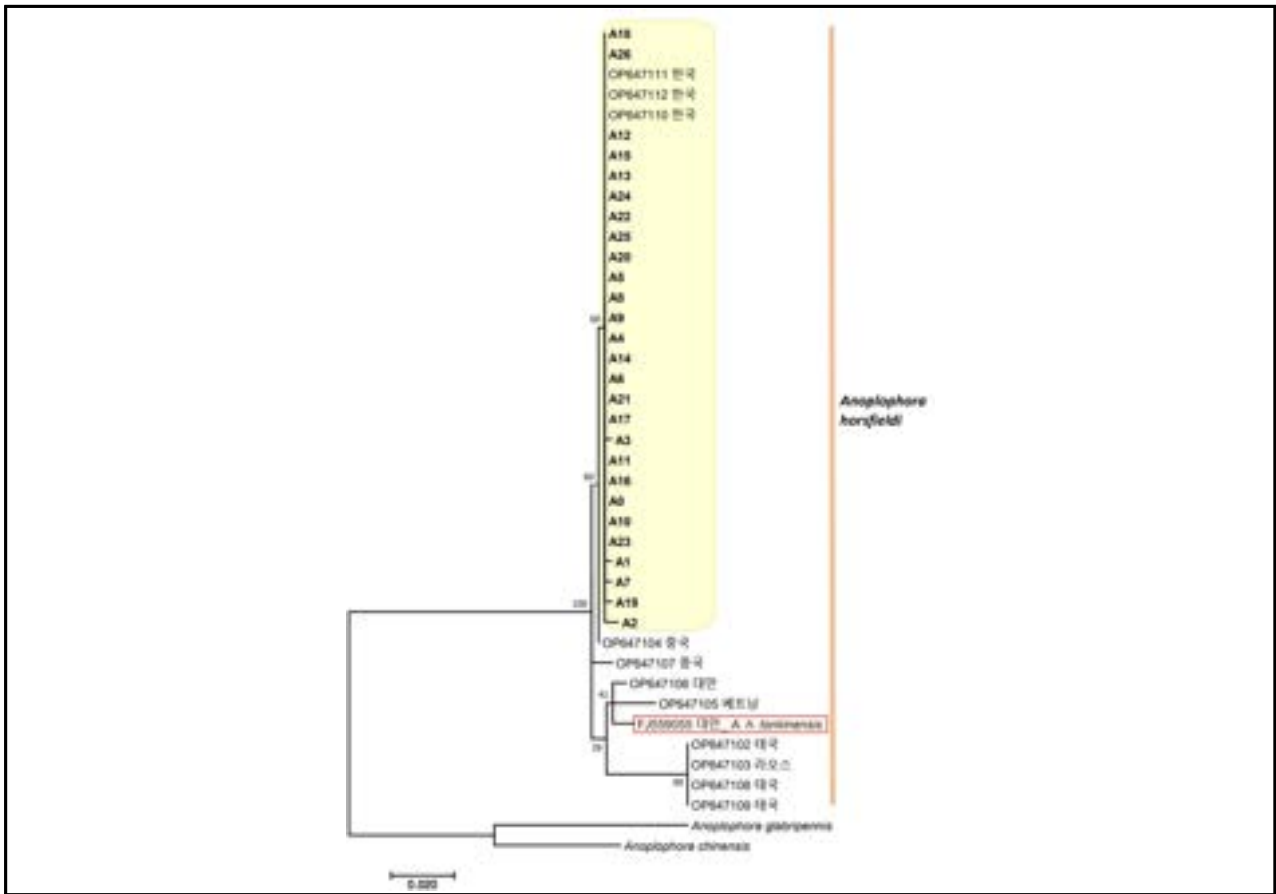


그림 11. 제주도에서 채집한 노랑알락하늘소 27개체와 NCBI에 등록된 노랑알락하늘소 서열을 485bp를 이용하여 작성한 ML tree

6) 국외 분포지도

원산지인 라오스, 대만, 태국, 베트남을 포함한 중국과 인도차이나반도에 분포하는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2023; Barševskis *et al.*, 2022). GBIF 데이터를 바탕으로 작성된 도면에 표시된 북미의 경우, 중국에서 포장된 선반 수입 과정에서 노랑알락하늘소의 사체가 발견된 사례로, 일시적 발견지점이다.



그림 12. 노랑알락하늘소 전 세계 분포
(출처:GBIF(<https://doi.org/10.15468/dl.dn85br>))

7) 서식 환경



그림 13. 노랑알락하늘소 거점출현지인 용연계곡 현존식생도

노랑알락하늘소의 밀도가 높게 출현하는 용연계곡 하류부를 거점출현지로 선정, 현존식생도 조사를 수행하였다. 조사 결과 계곡부에는 상록수림을 비롯한 자

연림이 발달하였으며, 용연계곡 주변으로 팽나무, 멸구슬나무, 곰솔, 가중나무 등을 식재한 인공림이 조성되어 있었다. 그중 노랑알락하늘소의 피해목은 계곡 부 상록수림 내 팽나무에서 가장 많은 본 수가 확인되었으며, 공원 내에서도 식재된 팽나무에서 주로 확인되었다. 현존식생도 조사지점 내 노랑알락하늘소 피해목은 총 32본이었으며, 그중 30본(약 94%)은 팽나무였다. 그 외, 무화과나무속(*Ficus*)인 천선과나무와 좁은잎천선과나무에서 노랑알락하늘소의 탈출공으로 추정되는 것이 각각 1개씩 확인되었다. 거점출현지 외 제주 향교, 제주사범대부설 고등학교, 제주목관아, 탐동공원 등 인공적으로 조성된 식재림이나 공원 지역 내의 팽나무에서 다수의 피해목을 확인할 수 있었다(그림 13).

조사 결과를 미루어봤을 때, 노랑알락하늘소의 서식환경은 팽나무로 대표되는 기주식물의 분포 여부가 가장 중요한 요인으로 판단되며, 사람의 이동과 상관 없이, 자연림과 인공림 모두에서 서식하는 것으로 확인되었다(표 8).

표 8. 노랑알락하늘소 거점출현지 용연계곡 현존식생도 조사 결과

분류	면적(㎡)	비율	피해목*(본)
자연림	7,064	21.0%	12
상록수림	6,411	19.1%	11**
곰솔 군락	302	0.9%	1
가중나무 군락	188	0.6%	
사철나무 군락	120	0.4%	
까마귀쪽나무 군락	43	0.1%	
인공림	11,267	33.5%	15
공원 식재림	3,776	11.2%	4
공원 식재림(팽나무)	2,661	7.9%	8
공원 식재림(멸구슬나무)	1,998	5.9%	
공원 식재림(곰솔)	1,875	5.6%	2
공원 식재림(가중나무+팽나무)	957	2.8%	1
관목림	2,531	7.5%	
관목림	1,307	3.9%	
관목림(철)	1,224	3.6%	
초지	12,761	38.0%	5
공원 초지	5,640	16.8%	5
공원 초지(코스모스)	3,703	11.0%	
초지	1,919	5.7%	
경작지	82	0.2%	
나지	364	1.1%	
암석	1,053	3.1%	
합계	33,623	100.0%	32
* 추가적으로 기재하지 않은 피해목은 모두 팽나무임			
** 천선과나무류 탈출공 2개 포함			

8) 용도

원서식지인 중국, 대만에서는 노랑알락하늘소의 매력적인 외형으로 인해, 곤충 표본 거래가 활발히 이루어지고 있다. 국내에서도 역시 표본을 수입·판매하거나, 제주도에서 서식하는 노랑알락하늘소를 표본화하여 판매하는 것이 확인되었다(그림 14).

태국에서 제작된 노랑알락하늘소 표본 판매

인터넷 카페 노랑알락하늘소 표본판매

인터넷 쇼핑몰 노랑알락하늘소 표본판매

그림 14. 노랑알락하늘소 표본 판매 현황

9) 국내 규제 현황

산림청의 산림과학원에서는 「산림병해충 방제규정」에 따라, 2022년 산림병해충 위험평가를 시행하였고, 노랑알락하늘소는 중위험 병해충으로 분류하였다. 중위험 병해충이란 특별한 위험관리방안이 요구될 수 있는 병해충으로, 병해충 위험도가 임산물 생산의 경제성 및 상품성에는 영향을 주지만, 산림환경에 심대한 영향을 미치지 않는 생물을 의미한다.

10) 국외 규제 현황

캐나다 식품검사청(CFIA)에서 *Anoplophora* spp.(주로 *A. glabripennis*)의 자연생태계 피해를 막기 위해 Plant Protection Regulations SOR/95-212에 따라 엄격히 수입 통제를 실시하고 있다.

11) 형태 특성



그림 15. 노랑알락하늘소의 생김새

노랑알락하늘소 성충의 몸길이는 22~43mm이며, 머리에는 6개 반점이 있고 몸 전체적으로 암갈색 혹은 검은색 바탕에 노란색 반점이 분포하고 있다. 앞가슴등판에 한쌍의 노란색 세로줄이 있고, 작은 방패판은 때때로 작고 둥근 반점이 있다. 딱지날개에서 황으로 이어지는 노란색 반점이 4줄 분포하는 것이 다른 *Anoplophora*속 근연종과의 차이점이다. 더듬이는 암컷의 경우 몸길이의 3/4 이상이며, 수컷은 몸길이보다 더 길다. 또한, 더듬이 기부 1/3이상이 은회색 잔털로 덮여있고, 제 3마디부터 제 10마디까지 각 마디의 절반은 흰색, 절반은 검정색이다.

12) 생태 특성

2024년 정밀조사 과정에서 노랑알락하늘소 성충 총 21개체를 확인하였으며, 주/야간 모두 출현하였다. 햇볕이 강하여 노랑알락하늘소의 체온이 오르는 주간에 비행하는 것을 목견하였다. 비행 능력은 알려진 바 없으나, 근연종인 유리알락하늘소는 산림(9년간 200m)보다 개활지(5년간 3.2km)에서 분산 능력이 좋은 것으로 알려져 있다(Sawyer *et al.* 2011; Turgeon *et al.* 2015; Straw *et al.* 2016). 생애주기의 경우 노랑알락하늘소와 근연종인 알락하늘소(*A. chinensis*), 유리알락하늘소(*A. glabripennis*)와 같이 기주식물 내에서 약 2년 가량의 유충, 번데기를 거쳐 성충으로 우화하는 것으로 보이며 성충이 되어 기주식물로부터 벗어나는 과정에서 탈출공을 남긴다. 노랑알락하늘소는 팽나무를 기주식물로 하여 가해하는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2023). 실제로 확인해본 결과 대부분의 탈출공이 팽나무에서 확인되었고 노랑알락하늘소 실개체 역시 대부분 팽나무 수간에서 움직이는 것을 목견하거나, 팽나무를 흔드는 과정에서 포획할 수 있었다. 해외 문헌상으로는 팽나무 뿐만 아니라 멸구슬나무, 동백나무, 종가시나무 등 다양한 수종을 가해한다고 알려져 있다. 증명인 연성천우의 연(楝)은 멸구슬나무를 의미하므로, 실제로 멸구슬나무류 또한 가해할 수 있을 것으로 추정된다.



그림 16. 우화과정에서 발생하는 노랑알락하늘소 탈출공

나. 유입 가능성

1) 국내 이용을 위하여 수입·반입될 가능성

농림축산검역본부에서는 모든 곤충의 수입을 금지하고 있다. 사육, 재배의 목적으로 살아있는 외래 곤충류를 수입할 경우 농림축산검역본부 고시 제2024-43호 「금지품에서 제외되는 해충의 위험분석 및 수입검역요령」에 따라 애완용 곤충 수입허용 신청 후 검역본부장의 허가 이후 수입이 가능하지만, 본 규칙이 제정된 2013년 3월부터 2024년 현재까지 애완용 곤충의 명목으로 허용된 생물은 존재하지 않으므로 의도적으로 국내에 수입될 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

2) 운송 수단과 화물 등에 혼입·부착되어 국내로 유입될 가능성

전세계 무역량 증가에 따라 항만 등을 이용한 생물의 침입이 증가하고 있으며 노랑알락하늘소의 근연종인 알락하늘소(*A. chinensis*), 유리알락하늘소(*A. glabripennis*)의 경우 목재포장재와 함께 수입되는 사례가 다수 보고되고 있다(Haack *et al.*, 2010). 노랑알락하늘소 역시 근연종과 같이 먹이식물로 알려진 팽나무(*Celtis sinensis*)로 만들어진 목재포장재나 팽나무 생목 수입 과정에서 국내로 유입될 가능성이 크며, 실제 울산에 노랑알락하늘소의 비의도적 유입이 확인되었을 뿐 아니라, 북미 지역에서도 수입 선박에서 노랑알락하늘소의 사체가 발견되는 등의 사례가 보고되고 있다(강태화 등, 2023, 그림 17).

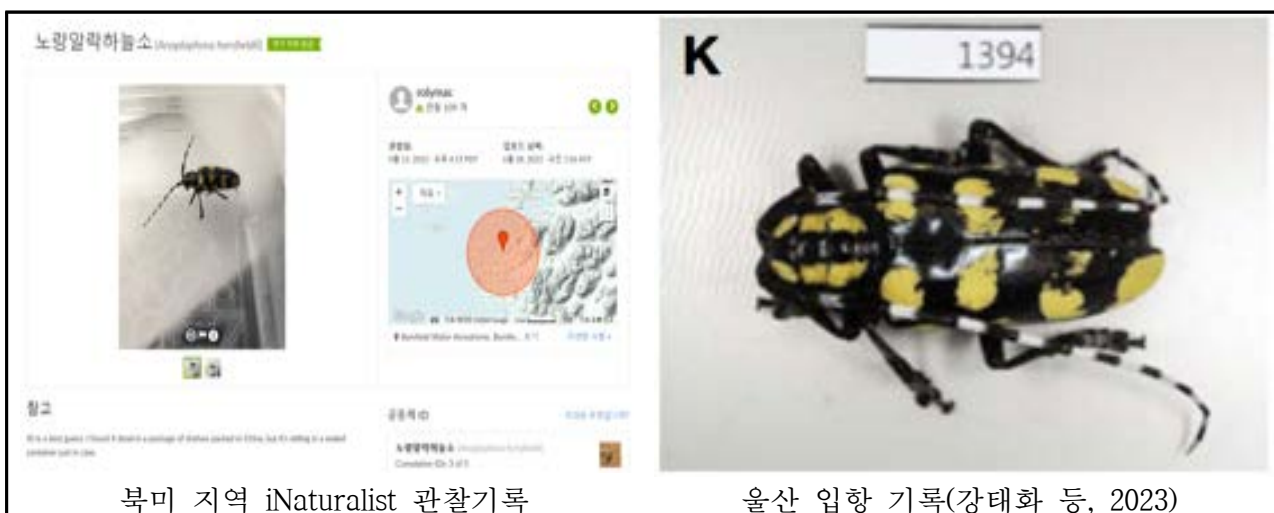


그림 17. 화물 등에 혼입되어 타국가로 이동한 사례(노랑알락하늘소)

다. 정착 가능성

1) 기후 적합성

발견이 보고된 2019년 이후, 지속적인 관찰을 통해 국내 월동이 가능한 것으로 보이며, 국내 생태계에 성공적으로 정착한 것으로 판단된다(Kim, 2023). 또한, 원서식지와 국내 기후 비교를 위해 원산지인 중국 남부, 베트남, 미얀마 등의 기후와 국내 기후의 생물기후인자를 추출하여 히스토그램으로 비교한 결과, 등온성(Bio3), 가장 온난한 달의 최대 온도(Bio5), 가장 습한 분기의 평균 온도(Bio8), 그리고 강수계절성(Bio15)에서 원산지와 국내 기후와 중첩을 확인하였다(그림 18).

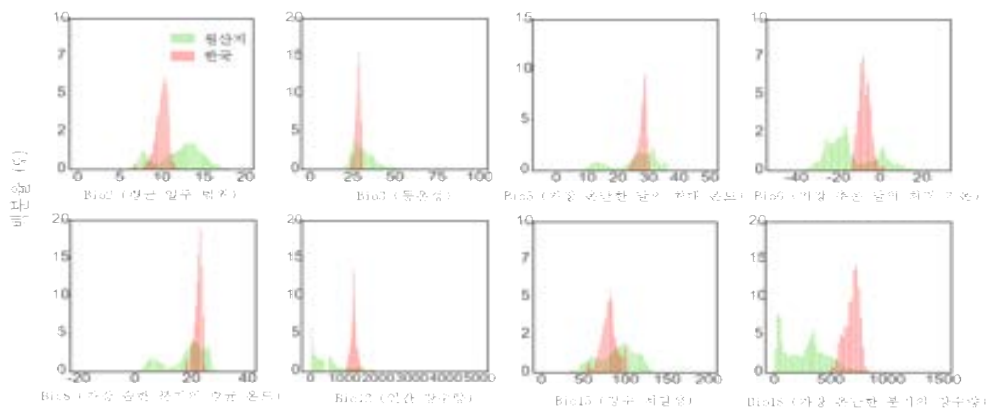


그림 18. 분포지와 국내 기후 생물기후인자 히스토그램 비교

가) MaxEnt 분석

노랑알락하늘소의 MaxEnt 모형 구축을 위해서 노랑알락하늘소의 분포지 188개 데이터, 노랑알락하늘소의 먹이식물로 알려진 차나무, 팽나무, 멸구슬나무, 종가시나무, 비술나무의 분포지, 생물기후변수와 해발고도가 모형 학습 및 테스트 데이터로 사용되었다. 기후변화에 따른 변화는 SSP5-8.5 미래기후시나리오를 투영하여 예측하였다. 구축된 모형의 AUC 값은 0.983으로 나타났으며 이는 모형의 신뢰성이 매우 높음을 보여준다. 모형이 학습될 때 예측력에 기여를 많이 한 변수는 종가시나무의 분포지, 멸구슬나무의 분포지, 팽나무의 분포지 등의 순이었으며, 각각의 변수를 제외했을 때 모형의 정확도에 영향을 크게 미치는 중요한 변수는 종가시나무의 분포지, 멸구슬나무의 분포지, Bio08 등의 순이었다. 기여도와 중요도 모두 높게 나온 환경인자는 종가시나무의 분포지였다(표 9, 그림 19).

표 9. 종분포 예측 모형에 사용된 환경변수

환경변수		기여도	중요도
생물기후변수	Bio2(평균 일주 범위)	4.7	2.7
	Bio3(등온성)	1.1	1.5
	Bio5(가장 온난한 달의 최대 온도)	2.6	0.5
	Bio6(가장 추운 달의 최저 기온)	2.4	0
	Bio8(가장 습한 분기의 평균 온도)	3.3	10.1
	Bio12(연평균강수량)	2	5.3
	Bio15(강수 계절성)	2.5	2.6
	Bio18(가장 온난한 분기의 강수량)	0.5	6
기주식물 분포도	팽나무(<i>Celtis sinensis</i>) 분포도	7.9	2.8
	멀구슬나무(<i>Melia azedarach</i>) 분포도	15.9	17.5
	비술나무(<i>Ulmus pumila</i>) 분포도	1.4	0.9
	종가시나무(<i>Quercus glauca</i>) 분포도	45.3	36.6
	차나무(<i>Camellia sinensis</i>) 분포도	2.2	0.9
고도	DEM(수치표고모델)	1	7

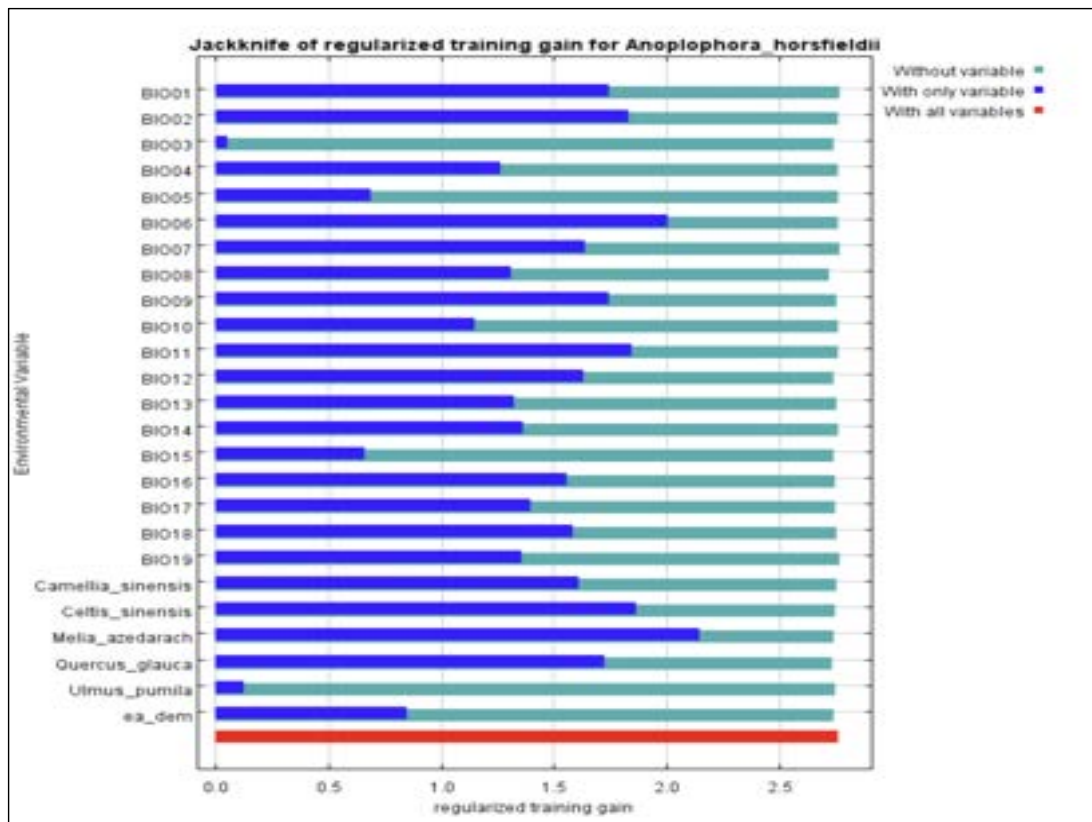


그림 19. 노랑알락하늘소 환경변수 중요도 잭나이프 테스트

나) 노랑알락하늘소의 잠재적인 정착 가능성 및 미래 분포 확산 가능성

노랑알락하늘소가 내륙으로 진입했을 때, 분포 확률은 전남 완도군, 경북 포항시 일부가 75% 이상이며, 전남 서해안, 경상도 울진 등 동해안 일대가 50~75%인 것으로 확인되었다.

SSP 5-8.5 기후변화 시나리오에 따른 2050년대 노랑알락하늘소의 분포 예측지는 전남 완도군에서 충남 서산까지 이르는 서해안과 울산광역시에서 북한 금강군에 이르는 동해안 등 넓은 면적에서 75% 이상의 분포 확률을 보였다.

모델 예측에서 환경변수를 개별적으로 예측했을 때, 정확도가 가장 높은 것은 멸구슬나무 분포도였으며, 이는 멸구슬나무 분포도 변수 혼자서 가장 유용한 정보를 갖는 것을 의미한다. 또한, 모델 예측에서 환경변수를 개별적으로 제외했을 때 정확도가 가장 많이 감소하는 것은 가장 습한 분기의 평균 온도(Bio8)로, 본 변수는 다른 변수에는 없는 유용한 정보가 있다는 것을 의미한다(그림 20).

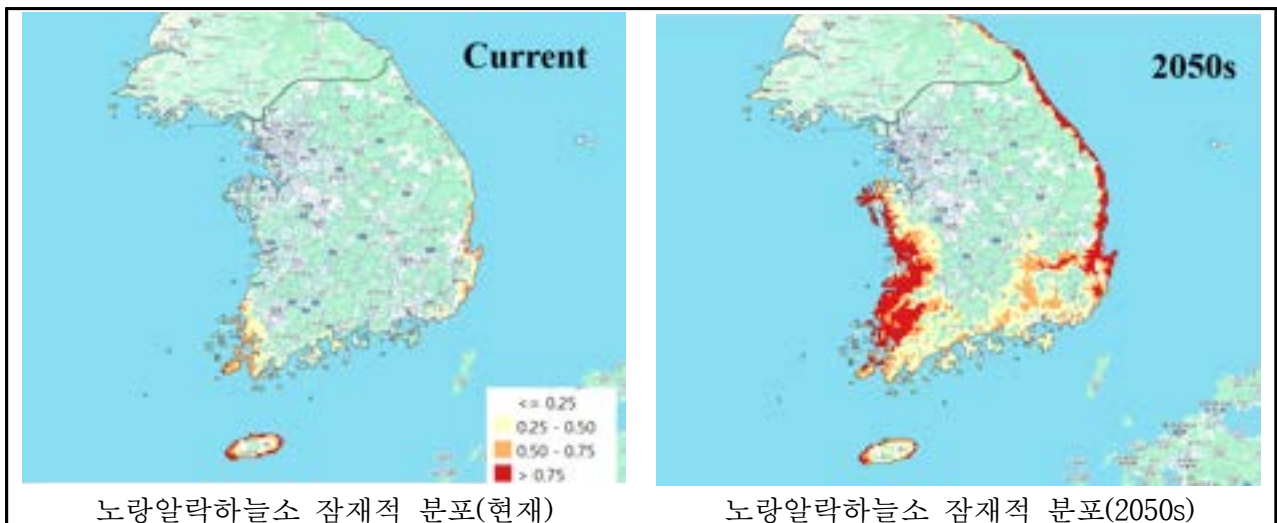


그림 20. 노랑알락하늘소의 잠재적 분포 및 환경변수 기여율

2) 서식지 비생물환경에 대한 내성, 생물 및 번식에 필요한 먹이, 수분매개자, 산포매개자, 기주생물, 적합성

문헌상으로 알려진 노랑알락하늘소의 기주식물은 님나무(*Azadirachta indica*), 동백나무(*Camellia sinensis*), 팽나무(*Celtis sinensis*), 귤나무류(*Citrus* sp.), 종가시나무(*Quercus glauca*), 비솔나무(*Ulmus pumila*) 등으로 알려져 있다(Lee et al., 2023). 문헌상 노랑알락하늘소의 기주식물과 동속의 근연종을 대상으로 국내 서식 여부를 확인, 총 40종을 추출하여 거점출현지 내 수목조사를 실시하였다(표 10).

표 10. 노랑알락하늘소 기주 가능 종 목록(학명, 국명은 국가생물종목록을 따름)

no	Family	Scientific name	국명	문헌 기주
1	Theaceae	<i>Camellia sinensis</i>	차나무	O
2	Theaceae	<i>Camellia sasanqua</i>	애기동백	
3	Theaceae	<i>Camellia japonica</i>	동백나무	O
4	Celtidaceae	<i>Celtis sinensis</i>	팽나무	O
5	Celtidaceae	<i>Celtis koraiensis</i>	왕팽나무	
6	Celtidaceae	<i>Celtis jessoensis</i>	풍계나무	
7	Celtidaceae	<i>Celtis edulis</i>	노랑팽나무	
8	Celtidaceae	<i>Celtis cordifolia</i>	장수팽나무	
9	Celtidaceae	<i>Celtis choseniana</i>	검팽나무	
10	Celtidaceae	<i>Celtis bungeana</i>	좁풍계나무	
11	Celtidaceae	<i>Celtis biondii</i> var. <i>heterophylla</i>	꼭나무	
12	Meliaceae	<i>Melia azedarach</i>	멀구슬나무	O
13	Meliaceae	<i>Toona sinensis</i>	참죽나무	
14	Fagaceae	<i>Quercus rubra</i>	루브라참나무	
15	Fagaceae	<i>Quercus palustris</i>	대왕참나무	
16	Fagaceae	<i>Quercus</i>	갈줄참나무	
17	Fagaceae	<i>Quercus variabilis</i>	굴참나무	
18	Fagaceae	<i>Quercus serrata</i>	줄참나무	
19	Fagaceae	<i>Quercus salicina</i>	참가시나무	
20	Fagaceae	<i>Quercus phillyraeoides</i>	줄가시나무	
21	Fagaceae	<i>Quercus myrsinifolia</i>	가시나무	
22	Fagaceae	<i>Quercus mongolica</i> var. <i>liatungensis</i>	깃참나무	
23	Fagaceae	<i>Quercus mongolica</i> var. <i>crispula</i>	물참나무	
24	Fagaceae	<i>Quercus mongolica</i>	신갈나무	
25	Fagaceae	<i>Quercus glauca</i>	종가시나무	O
26	Fagaceae	<i>Quercus gilva</i>	개가시나무	
27	Fagaceae	<i>Quercus dentata</i>	떡갈나무	
28	Fagaceae	<i>Quercus aliena</i>	갈참나무	
29	Fagaceae	<i>Quercus acutissima</i>	상수리나무	
30	Fagaceae	<i>Quercus acuta</i>	붉가시나무	
31	Ulmaceae	<i>Ulmus americana</i>	미국느릅나무	
32	Ulmaceae	<i>Ulmus pumila</i>	비술나무	O
33	Ulmaceae	<i>Ulmus parvifolia</i>	참느릅나무	
34	Ulmaceae	<i>Ulmus macrocarpa</i>	왕느릅나무	
35	Ulmaceae	<i>Ulmus laciniata</i>	난티나무	
36	Ulmaceae	<i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	느릅나무	
37	Ulmaceae	<i>Ulmus davidiana</i>	당느릅나무	
38	Rutaceae	<i>Citrus reticulata</i>	귤나무	O
39	Rutaceae	<i>Citrus maxima</i>	당유자나무	O
40	Rutaceae	<i>Citrus trifoliata</i>	탱자나무	O

조사 결과 거점출현지 내 기주식물은 팽나무 외 멀구슬나무 53본, 동백나무 4본, 종가시나무 2본이 확인되었으며 천선과나무 14본, 좁은잎천선과나무 11본, 무화과나무 5본, 느티나무 1본을 추가로 조사하였다. 조사 결과 문헌상 기주식물인 멀구슬나무, 동백나무, 종가시나무에서는 흉고직경이 50cm가 넘는 개체가 있음에도 탈출공을 확인하지 못하였으나, 천선과나무, 좁은잎천선과나무에서 노랑알락하늘소의 것으로 보이는 탈출공 각각 1개씩 확인하였다. 탈출공의 크기는 각각 12mm, 15mm였으며, 팽나무 탈출공 조사 결과 평균 직경은 16.1mm, 가장 작은 탈출공은 11mm, 가장 큰 탈출공은 20mm로 팽나무 탈출공 범위 내에 있었다(표 11, 그림 21).

표 11. 거점출현지(용연계곡) 내 노랑알락하늘소 기주 의심 종 목록

Family	Scientific name	국명	본(수)	탈출공 본(수)	비고
Celtidaceae	<i>Celtis sinensis</i>	팽나무	65	34	
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i>	멀구슬나무	54	0	
Fagaceae	<i>Quercus glauca</i>	종가시나무	2	0	
Theaceae	<i>Camellia japonica</i>	동백나무	4	0	
Ulmaceae	<i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	느티나무	1	0	가해흔적 확인
Moraceae	<i>Ficus erecta</i> var. <i>sieboldii</i>	좁은잎천선과나무	11	1	직경: 12mm
Moraceae	<i>Ficus erecta</i>	천선과나무	12	1	직경: 15mm
Moraceae	<i>Ficus carica</i>	무화과나무	5	5	구멍형태 상이
6과	8종		154	41	

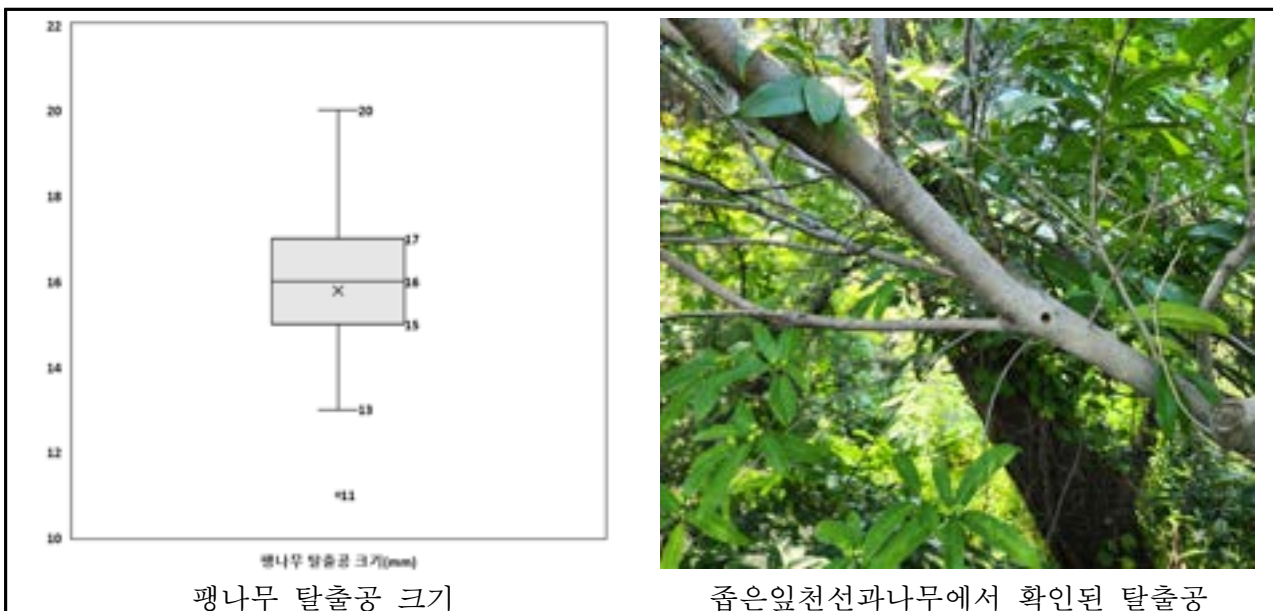


그림 21. 팽나무 탈출공 직경 및 천선과나무류에서 발견된 탈출공

노랑알락하늘소 13개체의 분변을 메타바코딩으로 분석한 결과 노랑알락하늘소는 총 식물 13종을 섭취한 것으로 확인되었다. 가장 높은 풍부도를 가지고 있는 생물은 바랭이속, 겉보리속 등 벼과 식물이었으며, 무화과 속 등이 뒤를 이었다. 분변에서 역시 좁은잎천선과나무, 천선과나무와 같은 속인 무화과나무속이 발견되었으므로, 천선과나무에서 확인된 탈출공이 노랑알락하늘소로 인한 흔적일 가능성이 높다고 판단하였다. Lee *et al.*(2023)에 따르면, 현재까지 노랑알락하늘소는 팽나무 외 다른 목본에서 먹이활동을 수행하지 않는 것으로 알려져 있는데, 본 연구 결과를 통해 노랑알락하늘소가 팽나무 외 다른 식물 또한 가해할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 문헌상으로 알려진 차나무, 굴나무 등 경제수종에도 노랑알락하늘소가 실제로 기주할 가능성이 있음을 암시한다(표 12).

표 12. 노랑알락하늘소 식이물 분석에 따른 식물계 속(Genus) 단위 발생빈도

과명 (Family)	속명 (Genus)	상대 풍부도 (Relative abundance)	
		샘플 1	샘플 2
벼과(Poaceae)	<i>Digitaria</i> (바랭이속)	63.7%	67.9%
	<i>Triticum</i> (밀속)	2.1%	10.3%
	<i>Hordeum</i> (겉보리속)	4.1%	4.2%
	<i>Oryza</i> (벼속)	1.6%	1.8%
	<i>Zea</i> (옥수수속)	0.0%	2.4%
뽕나무과(Moraceae)	<i>Ficus</i> (무화과나무속)	12.4%	0.0%
팽나무과(Celtidaceae)	<i>Celtis</i> (팽나무속)	5.2%	3.0%
콩과(Fabaceae)	<i>Glycine</i> (콩속)	1.6%	3.0%
	<i>Sphenostylis</i>	0.0%	1.8%
십자화과(Brassicaceae)	<i>Arabidopsis</i> (애기장대속)	4.7%	4.2%
	<i>Boechera</i>	2.1%	0.0%
난초과(Orchidaceae)	<i>Arisaema</i> (천남성속)	0.0%	1.2%
꼬리고사리과(Aspleniaceae)	<i>Pteris</i> (봉의꼬리속)	2.6%	0.0%
합계		100%	100%

라. 확산 가능성

1) 번식력

노랑알락하늘소의 번식력에 대해 연구된 바가 없으나, 근연종인 알락하늘소는 암컷 1개체당 평균 70개의 알을 산란하며(Sabbatini and Roversi, 2010), 유리알락하늘소도 45~62개의 알을 산란하는 점으로 미뤄보아, 노랑알락하늘소도 이와 유사할 것으로 추정된다(Keena, 2002).

2) 분산 능력

노랑알락하늘소의 분산 능력에 대해 직접적으로 연구된 바는 없으나, 근연종인 유리알락하늘소의 경우 성별, 연령, 환경조건 등에 따라 비행거리가 상이한 것으로 확인되었다(Smith *et al.*, 2001; Keena, 2018). 중국에서 실시한 유리알락하늘소 방사-재포획 연구에 따르면 나무가 더 크거나 나무끼리 사이 간격이 멀 때는 계절당 266m를 이동하는 반면, 나무가 작거나 나무끼리 간격이 가까이 있을 때는 20~28일 동안 106m로 더욱 짧은 거리를 이동하는 것을 확인하였다. 또한, 비행 실험을 통해 표준화된 환경에서 일부 개체가 평생 14km 이상을 날 수 있는 것을 확인하였다(Lopez *et al.*, 2017; Javal *et al.*, 2018).

노랑알락하늘소의 분포 범위를 통해 분산 능력을 추정하기 위해, 2023년 한국 임업진흥원 「제주지역 주요·외래 산림병해충 모니터링」 사업에서는 노랑알락하늘소의 거점출현지로 알려진 제주도 용연계곡을 중심으로 반경 5km 이내에 분포하는 팽나무 2,708주에 대한 탈출공 조사를 수행하였다. 조사 결과 총 83주의 팽나무에서 탈출공이 발견되었으며, 제주도 용연계곡으로부터 가장 멀리 떨어진 감염목은 2.2km 밖의 해태동산으로 확인되었다. 2024년 노랑알락하늘소 피해목 조사 결과, 신규 피해목 총 14본 중 2023년 서식지와 이격된 6개 지점은 기존 피해 지점과 평균 1.25km 떨어져 있었으며, 가장 멀리 떨어진 지점은 2.4km으로 확인되었다. 또한, 문헌상 가장 멀리서 확인된 내용으로 서쪽으로 18km 떨어진 지역 슈퍼마켓 근처 주차장에서 죽은 한 개체가 발견되었다.(Lee *et al.*, 2024)

3) 사육·재배 환경으로부터 탈출·일출하거나, 사육·재배 환경 밖에 유기될 가능성

노랑알락하늘소의 주요 서식지인 용연계곡은 제주 공항과 인접하여 접근성이 높은 관광지이다. 용연계곡을 이용하는 관광객이 많은 만큼 독특한 외형의 노랑알락하늘소를 발견하는 경우가 다수 있으며, 이를 사진을 찍어 올리는 사례 또한 확인되었다. 이러한 관심은 곤충 애호가들에게 일종의 홍보 효과로 작용할 가능성이 크며, 노랑알락하늘소의 채집·사육·분양 활동을 증가시켜 내륙으로 확산을 유발할 수 있다(Lee *et al.*, 2024).

실제로 웹사이트, 블로그를 통해서 곤충 애호가들이 노랑알락하늘소 채집을 자랑하는 글을 게시하거나, 하늘소 표본을 판매하는 행위가 목격되고 있으며, 가격 대도 20,000원-40,000원까지 다양하게 형성되어 있다.

이처럼, 희소성·인기·가격상승 등의 이유로 인해 포획 활동이 증가할 경우, 탈출하거나 유기될 가능성, 혹은 서식지를 늘리고자 하는 일부 곤충애호가들의

방생 행위가 발생할 수 있을 것으로 판단된다(그림 22).

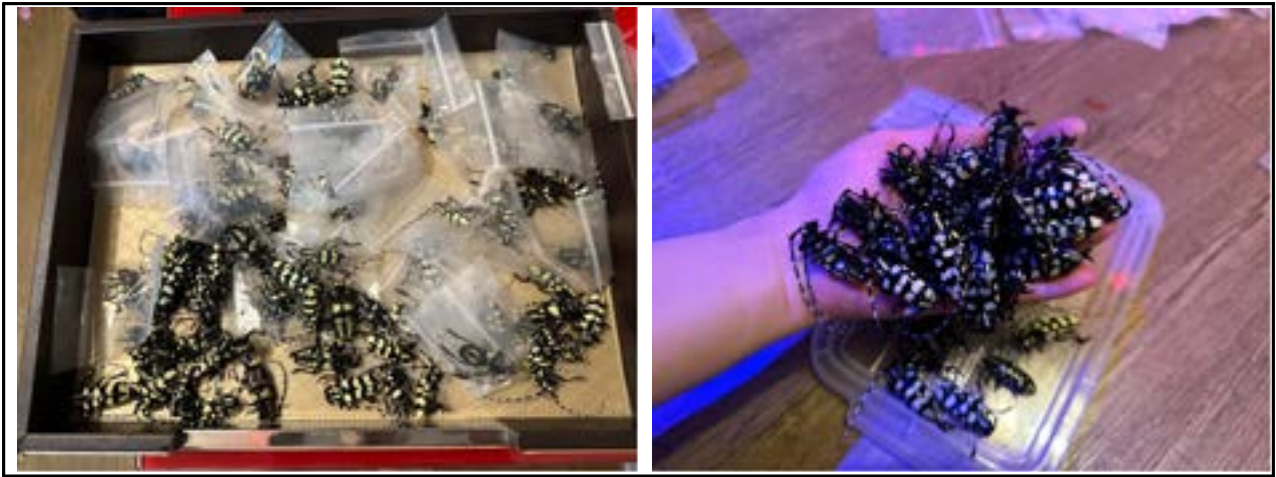


그림 22. 인터넷 커뮤니티 등에 게시된 노랑알락하늘소 포획 실태

4) 운송 수단과 화물 등에 혼입 부착되어 국내에서 분포가 확대될 가능성
노랑알락하늘소는 생물을 가해하는 특성으로 인해, 제주항 주변 목재를 타고 내륙으로 이동할 가능성이 높지는 않다. 하지만, 울산 입항 사례, 미국의 선박 수입 과정에서 유입된 사례 등으로 미루어 봤을 때, 제주항까지 서식 범위를 확장할 경우 운송 수단과 화물 등에 혼입 부착하여 내륙으로 진입할 가능성이 높아질 것으로 판단된다(그림 23).



그림 23. 용연계곡 인근 제주항 모습

마. 생태계 및 사회·경제·질병에 대한 영향

1) 초식, 포식, 기생, 독성 및 타감 작용의 영향

해외 문헌에서 멀구슬나무, 종가시나무, 굴나무, 차나무 등 다양한 식물을 먹이원으로 한다고 알려져 있으며, 국내 채집된 노랑알락하늘소의 식이물분석을 한

결과 바랭이속, 무화과 속 등을 섭식하는 것으로 확인된 바, 팽나무 뿐만 아닌 다양한 수목이 영향을 받을 것으로 판단된다. *Anoplophora*속 곤충을 매개로 전염되는 질병이나 감염병에 대해서는 알려진 바 없다.

2) 경쟁의 영향

하늘소류 중 팽나무류(*Celtis* sp.)를 기주식물로 하는 종이 노랑알락하늘소와 경쟁 가능성이 있을 것으로 예상되어 이에 해당하는 종을 추출한 결과 총 13종이 경쟁관계에 놓일 가능성이 큰 것으로 판단되었다(임종욱 등 2014). 다만, 팽나무가해 하늘소류의 생태 특성을 조사해본 결과, 뽕나무하늘소를 제외한 모든 국내 하늘소류는 팽나무의 고사목을 가해하는 것으로 확인되었다. 또한, 뽕나무하늘소 또한 주요 기주식물은 뽕나무이며, 노랑알락하늘소와 같이 팽나무 생목을 주요 기주식물로 가해하는 하늘소류는 국내에서 알려진 바 없었다(표 13).

다만, 근연종인 *Anoplophora*속의 유리알락하늘소, 알락하늘소의 기주 범위가 넓고, 식이물 분석, 탈출공 조사를 통해 노랑알락하늘소의 기주식물이 팽나무 1종이 아닌, 여러 종일 가능성이 높으므로, 팽나무 외 다른 식물을 먹이로 하는 곤충과의 경쟁 가능성을 염두해야 한다고 판단하였다. 따라서, 경쟁의 영향은 추가적인 연구가 필요하다.

표 13. *Celtis*속(팽나무류)을 기주로 하는 하늘소 목록(임종욱 등, 2014)

국명	학명	기주식물	가해방법
넓은홍호랑하늘소	<i>Cyrtoclytus monticallius</i>	풍게나무	고사목 산란 ²⁾
풍게꼬마벌하늘소	<i>Molorchus (Molorchus) nitidus nitidus</i>	풍게나무	고사목 산란 ²⁾
꼬마긴다리범하늘소	<i>Rhaphuma diminuta diminuta</i>	팽나무	고사목 산란 ^{1,2)}
긴다리범하늘소	<i>Rhaphuma gracilipes</i>	팽나무	고사목 산란 ¹⁾
노란다리송사리엿하늘소	<i>Stenhomalus (Stenhomalus) incongruus parallelus</i>	풍게나무 팽나무속	고사목 산란 ^{1,2)}
노란줄호랑하늘소	<i>Xylotrechus (Xylotrechus) yanoi</i>	팽나무	고사목 산란 ^{1,2)}
뽕나무하늘소	<i>Apriona (Apriona) germari</i>	팽나무	생목 가해 ^{1,2)}
줄콩알하늘소	<i>Exocentrus (Exocentrus) lineatus</i>	풍게나무	고사목 산란 ^{1,2)}
큰곰보하늘소	<i>Pterolophia (Hylobrotus) annulata</i>	팽나무	고사목 산란 ^{1,2)}
대륙곰보하늘소	<i>Pterolophia (Pterolophia) maacki</i>	팽나무	고사목 산란 ^{1,2)}
우리곰보하늘소	<i>Pterolophia (Pterolophia) multinotata</i>	팽나무	고사목 산란 ^{1,2)}
정하늘소	<i>Miaenia (Estoliops) fasciata fasciata</i>	풍게나무	고사목 산란 ^{1,2)}
반날개하늘소	<i>Psephactus remiger remiger</i>	팽나무	고사목 산란 ^{1,2)}

1) 황상환, 2015

2) 장현규 등, 2015

3) 병해충 전파의 영향

*Anoplophora*속 하늘소 매개 병해충에 대해 보고된 바 없으나, 근연종인 유리알락하늘소의 경우 유충에 의해 생긴 상처에서 수액이 유출되어 2차 해충에 감염되기 쉽다고 알려져 있다(Cabi, 2022).

4) 교잡의 영향

노랑알락하늘소가 국내에 서식하는 근연종인 알락하늘소, 유리알락하늘소와 교잡 가능성에 대해서는 알려진 바 없다. 다만, 알락하늘소와 유리알락하늘소는 생식적으로 격리되었다고 알려져 있으나(Wang and Keena, 2021), 일본에서 서식하는 알락하늘소(synonym=*A. malasiaca*)와 유리알락하늘소가 교잡이 가능한 것으로 확인된 바(Qin *et al.*, 2024), 국내 노랑알락하늘소 역시 국내에 분포하는 *Anoplophora*속 곤충들의 교잡 가능성에 대한 연구가 필요하다.

5) 주요 생물다양성 보호구역에 대한 영향

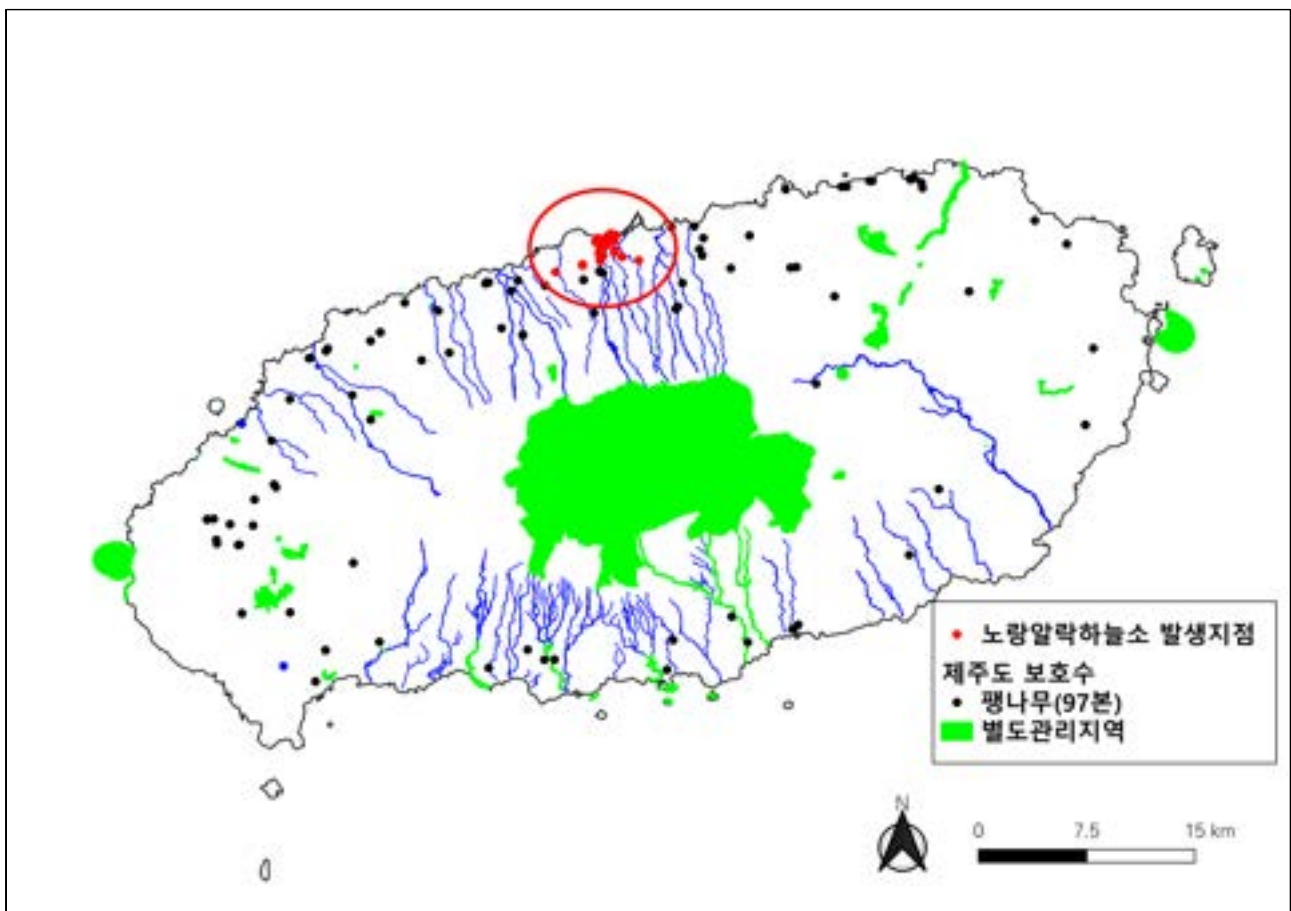


그림 24. 제주도 별도관리지역(국립공원, 천연보호구역 등), 제주도 보호수 위치

노랑알락하늘소의 분포지인 제주도는 한라산 천연보호구역, 성산일출봉, 거문오름용암동굴계 3개 지역이 2007년 유네스코 세계자연유산으로 지정되어 있다. 이중, 국립공원으로 지정·관리되고 있는 한라산 천연보호구역은 노랑알락하늘소 거점출현지와 불과 9km 이격되어 있어 집중 모니터링이 필요한 실정이다.

또한, 제주도 보호수 중 노랑알락하늘소의 주된 기주식물인 팽나무 보호수가 99본이며, 그 외, 천연보호구역으로 등록된 제주 성읍리 느티나무 및 팽나무 군락, 산림보호구역 등 보존가치가 높은 자연자원이 다수 분포되어 있어, 제주도 내, 노랑알락하늘소가 확산될 경우, 제주도의 생물다양성 보호구역에 부정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다(그림 24).

6) 먹이그물, 천이, 수분, 산포 등 생태계 생물요소에 대한 영향

노랑알락하늘소의 유충은 추운 겨울에는 나무 속에서 머물다가 기온이 높아지면 우화하는 것으로 추정된다. *Anoplophora*속에 속하는 곤충은 주로 생목에 산란, 가해하며 고사목은 먹이식물로 활용하지 않는다. 따라서, 유충 단계에서 숙주 나무의 뿌리, 줄기, 가지 등을 내부에서 갉아 먹고, 이로 인해 생긴 터널은 나무를 약화시키고 수년에 걸쳐 나무를 죽일 수 있다(Nowak *et al.*, 2001).

또한, 근연종인 유리알락하늘소는 원서식지인 중국에서 1980년대까지는 동부지역에 한정되어있었으나, 사막화를 막기 위해 중국에서 사시나무류를 심자 숙주 나무의 증가로 개체수가 극적으로 증가한 사례가 보고되었다. 팽나무를 주요 기주식물로 하는 노랑알락하늘소 역시 팽나무가 집단적으로 식재되어 있는 장소에 유입되거나, 노랑알락하늘소 서식지에 팽나무를 다량 식재할 경우 노랑알락하늘소의 개체수가 극적으로 증가할 가능성이 농후하다.

7) 영양염류 순환, 수질, 토양 침식 및 퇴적 등 생태계 비생물요소에 대한 영향

노랑알락하늘소로 인한 영양염류 순환, 토양침식, 퇴적 활동 등 비생물적요소에 대해 미치는 영향은 미미할 것으로 추정된다.

8) 농림축수산업에 대한 영향



그림 25. 노랑알락하늘소 팽나무 가해 현황

2024년 정밀조사 결과 탈출공이 30개 이상 발견된 팽나무도 확인되었으며, 식재된 어린 팽나무 중 노랑알락하늘소의 가해로 인해 밑둥이 썩어 넘어진 것도 확인하였다(그림 25).

팽나무 및 팽나무류(*Celtis*속)는 강원도를 제외한 대부분의 지역에 산발적으로 분포하고 있으며, 남부지방에서는 마을의 당산목으로 심겨져 있어, 노랑알락하늘소가 내륙으로 확산될 경우 팽나무가 있는 산림 및 목재 산업에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 매우 크다.

제주도의 경우, 제주지역의 보호수 159그루 가운데 99그루가 팽나무이므로 노랑알락하늘소의 분포 범위가 넓어지게 되면 추가 피해가 예상되었다. 또한, 문헌상으로 노랑알락하늘소는 귤나무속(*Citrus*속), 차나무 등 농업 수종 또한 가해할 수 있는데, 국내 차 생산의 40% 및 매년 40만 톤 내외의 감귤을 생산하고 있는 제주도에 노랑알락하늘소가 확산할 경우 농업에 대한 영향을 크게 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

근연종인 유리알락하늘소는 세계 100대 침입종 중 하나로 원서식지인 중국에서도 피해가 보고되어있으며, 자두, 배, 사과와 같은 과실수와 목재와 종이 생산에 악영향을 미쳐 한해 약 15억 달러의 경제적 손실을 일으켰으며, 캐나다에서 상업적 단풍나무(*Acer* spp.)목재에 대한 피해는 16억~4억 3,100만 캐나다 달러, 식용 단풍나무 제품에 대한 영향은 연간 3억 5,800만 캐나다 달러로 추산되고 있다(Sjöman *et al.*, 2014; Pedlar *et al.*, 2020). 또한, 터키에서는 알락하늘소의 침입으로 인해 286ha 헤이즐넛 과수원이 피해를 입었고, 172,000그루 이상의 참나무가 제거 및 파괴되었다(Turan and Erdogan, 2022). 이처럼, 노랑알락하늘소

로 인한 피해는 현재 발생하는 상황보다 확대될 가능성이 농후하므로, 지속적인 관심을 기울여야 하는 실정이다.

9) 사회기반시설(교통시설, 하천, 부두, 댐, 건물 등), 경관 및 문화적 가치 등에 대한 영향



그림 26. 노랑알락하늘소의 짹짹기가 확인된 지석묘 옆 팽나무

노랑알락하늘소의 주요 기주식물인 팽나무는 공원의 가로수뿐만 아니라, 마을을 수호하는 당산목, 천연기념물, 보호수 등으로 식재되는 경우가 많다. 노랑알락하늘소가 확산될 경우 팽나무의 활력이 저하되거나 고사하여 경관적 가치 하락을 야기할 수 있다(그림 26).

근연종인 유리알락하늘소 역시 북미와 유럽에서 조경수 및 가로수에 악영향을 주고 있으며, 감염된 가로수의 가지가 떨어지거나 나무가 전도되는 과정에서 거리를 이용하는 사람들의 안전이 위협할 수 있다. 이를 경제적 손실로 추산하였을 때, 미국에서는 최대 약 6,690억 달러 규모의 손실을 추정하고 있다(Nowak *et al.*, 2001).

10) 인체 건강에 대한 영향(독성, 알레르기성, 질병 및 기생충 전파, 상해 등)
노랑알락하늘소로 인한 인체 건강에 대한 영향은 보고된 바 없다.

11) 방제 난이도 및 비용



그림 27. 노랑알락하늘소 방제 현황(좌: 끈끈이 트랩, 우: 현수막 설치)

노랑알락하늘소는 생애의 대부분을 팽나무 등 기주식물 속에서 보내며, 조사나 포획, 방제가 가능한 시기는 성충 시기인 6월에서 8월 사이 한정된 기간만 가능하다. 국립산림과학원과 난대·아열대산림연구소는 노랑알락하늘소의 생태 특성을 반영하여 성충 시기인 6월에서 8월 사이 팽나무를 흔들어 직접 포획, 끈끈이 트랩 설치 등 밀도 억제를 위해 성충 제거 작업을 추진하고 있으며, 난대·아열대산림연구소에서는 노랑알락하늘소 방제를 위해 긴급약제등록(2024.7.)을 하는 등 피해 확산 저감조치를 실시하고 있다(그림 27).

다만, 유충 등 근원적인 방제를 위해서는 먹이원이 되는 기주식물까지 제거하는 것이 필요한 실정이다. 근연종인 유리알락하늘소의 경우 이탈리아에서는 방제를 위해 11년간 총 36,000그루의 나무를 조사하였고, 이중, 2,000그루 이상의 나무를 베었다(Marchioro and Faccoli, 2021). 캐나다에서는 약 26,000그루의 나무를 제거하였으며, 현재까지 새로운 침입을 조기에 감지하기 위해 매년 조사를 실시하고 있다(Government of Canada, 2011). 영국 패독우드에서 2012년 3월 유리알락하늘소 침입이 확인되었고 감염된 나무 24그루와 감염된 나무로부터 100m 이내에 있는 숙주 나무를 베고, 100~300m 내외에서 3차례 검사를 추가로 실시하고 7년간 모니터링한 결과 2019년 근절이 선언되었다(Eyre and Barbrook, 2021).

근연종인 알락하늘소는 유럽에서 침입종으로 여겨지며 덴마크(2011-2015), 독일(2008-2017), 네덜란드(2008-2010), 스위스(2014-2019)에 발생 후 박멸되었다(Esfa, 2021). 이처럼 노랑알락하늘소도 마찬가지로 근절에는 막대한 예산과 노동력 투입이 필요할 것으로 사료되며, 방제를 실시할 경우 확산 범위가 더욱 넓어지기 전에 적극적으로 수행할 필요가 있다.

2. (가칭)범무늬뾰족민달팽이(*Limax maximus*)

가. 기본정보

1) 분류

- 국명: (가칭)범무늬뾰족민달팽이
- 학명: *Limax maximus* (Linnaeus, 1758)
- 영명: Leopard slug
- 이명: *Limax cinereus* Lister, 1678

Limax cinereus O. F. Muller, 1774 (partim)

Limacella parma Brard, 1815

Limax antiquorum Ferussaac, 1819 (partim)

Limax maculatus Munneley, 1837 (non maculatus Kaleniczenko, 1851)

Limax cellarius (d'Argenville) Lessona et Polonera, 1882

Limax carbonarius albanicus Jaeckel, 1954

- 생물분류체계: 계(Kingdom) - Animalia

문(Phylum) - Mollusca

강(Class) - Gastropoda

목(Order) - Stylommatophora

과(Family) - Limacidae

속(Genus) - *Limax*

종(Species) - *Limax maximus*

2) 원산지

영국, 스페인, 프랑스, 독일, 이탈리아 등 유럽 일대

3) 침입지

잠비크, 남아프리카, 캐나다, 멕시코, 미국, 아르헨티나, 브라질, 칠레, 콜롬비아, 아르헨티나, 호주, 뉴질랜드 등으로 뉴질랜드는 1870년대부터 유입 기록이 확인되었다(Barker and McGhie, 1984)

4) 침입경로

주요 침입경로는 알려진 바 없으나, 선박, 컨테이너, 원예·농작물 등에 부착한 채로 수입된 후 자연생태계로 유입되는 비의도적 확산으로 추정되었다.

5) 국내 분포지도

범무늬뽕족민달팽이는 경기도 수원시 밤발청개구리공원과 안안골 일대에서만 발견되었다. 밤발청개구리공원 주변 입지 특성은 반경 2km 이내에 내륙컨테이너 터미널 기지인 의왕ICD, 영동고속도로, 의왕역 등 사람과 물류의 이동이 잦다. 2023년에 네이처링, iNaturalist, 최초 발견 논문 모두 수원시 밤발청개구리공원 인근에서만 발견 기록이 확인되었으며, 2024년 정밀조사 결과 밤발청개구리공원과 안안골 주변 반경 약 1km 범위에서 서식하는 것을 확인하였다.

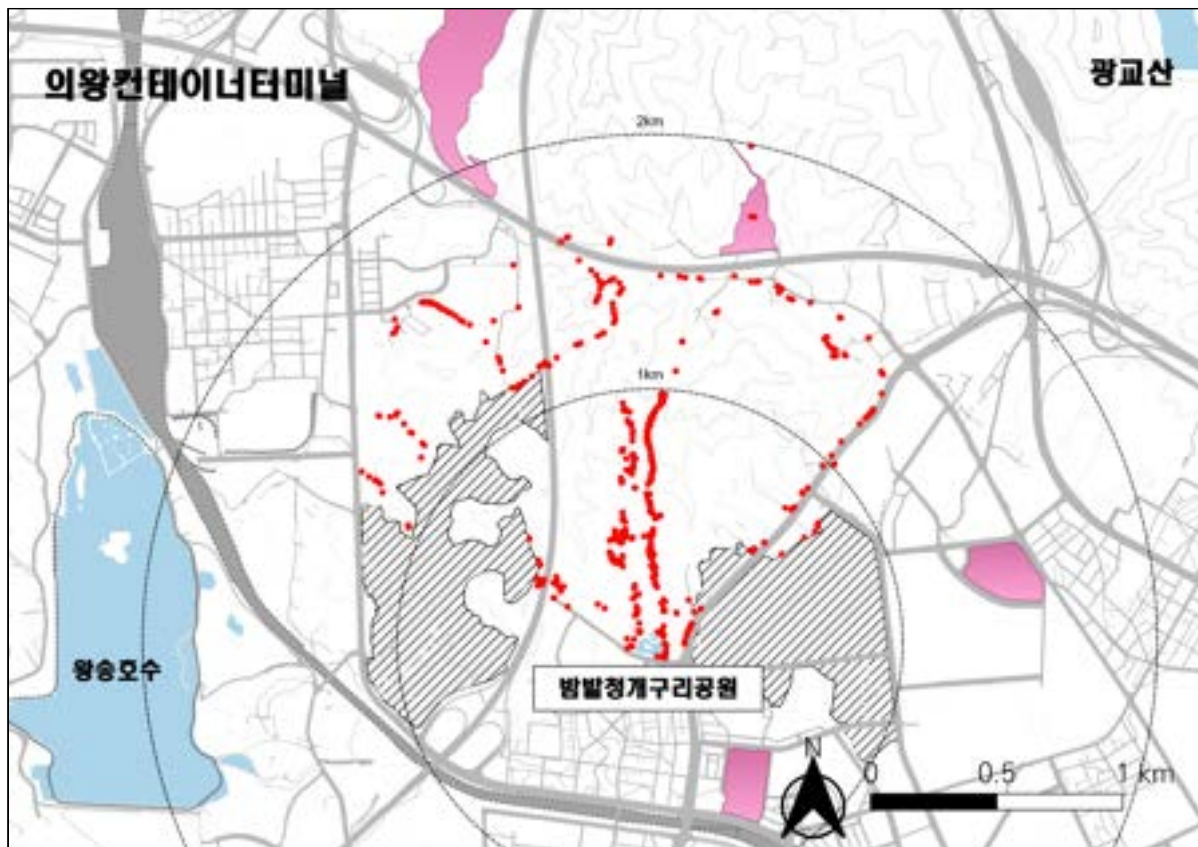


그림 28. 범무늬뽕족민달팽이 출현 지점 및 확산 현황

가) 거점출현지 조사 결과(밤밭청개구리공원과 안안골 일대)

기존에 서식이 확인된 거점 출현지인 밤밭청개구리공원 및 안안골 일대를 기준으로 범무늬뾰족민달팽이의 실제 분포 유무를 확인하기 위해 조사를 실시하였다. 조사는 3월, 8월, 9월에 주간 및 야간으로 나누어 총 6회 진행되었으며, 출현 개체수, 발견지점의 GPS, 전장의 길이(mm) 등을 측정, 기록하였다.

3월 주간 1개체, 야간 123개체가 확인되었으며, 야간 조사 시, 최저기온의 상승으로 인해 민달팽이의 활동성이 높아져 많은 개체가 관찰되었다. 여름철 8월 야간 조사에서 총 387개체가 확인되어 조사기간 중 가장 많은 개체수가 기록되었다. 가을철 9월 조사에서는 개체 수가 감소하여 주간 21개체, 야간 279개체가 확인되었다(표 14).

2024년 3월 28일과 8월 7일, 8일 거점 출현지에서 확인된 범무늬뾰족민달팽이 총 1,096개체의 전장을 측정한 결과 평균 56.3mm로 확인되었다. 봄철(3월) 160개체에 대한 평균값은 27.9mm로, 최소 8mm에서 최대 100mm로 확인되었다. 여름(8월) 936개의 평균 전장길이는 70.5mm로, 최소 20mm에서 최대 150mm로 확인되었다(그림 29).

봄과 여름은 각각 독립된 집단으로 확인되었으며, 통계 분석 결과 봄이 여름에 비해 집단의 몸길이 비율이 유의하게 작았다(t-statistic: -31.34, p-value < 0.01). 봄에 확인한 범무늬뾰족민달팽이는 주로 크기가 작고 몸에 표범무늬가 나타나지 않은 아성체 개체들이 대부분을 차지하였으며, 낮은 비율로 성체가 확인되었다. 봄 조사에서 낮은 온도임에도 야간에 농지와 배수로, 산책로 등을 높은 밀도로 배회하는 것이 관찰되었고, 주간에는 아성체와 성체 모두 은신처 밑에서 휴식을 취하는 모습이 확인되었다. 여름 조사에서도 주간보다 야간에 주로 활동하는 경향이 나타났으며, 주간에는 쓰레기 봉투 밑에서 휴식하는 것이 발견되었고, 야간에는 음식물 쓰레기통과 농업 폐기물 적재 장소 등에서 높은 밀도로 활동하는 모습을 확인하였다.

표 14. 범무늬뾰족민달팽이 거점 출현지 출현 개체수 및 평균 전장

회차	조사일자	조사시간	개체수	평균체장(cm)	평균기온	최저기온
1	24.03.22	주간	1	1.50	10.4	2.5
2	24.03.28	야간	123	2.48	9.7	7.7
3	24.08.08	야간	387	6.78	26.9	23.9
4	24.09.15	야간	105	7.26	27.5	23.8
5	24.09.16	야간	279	6.17	27.6	23.3
6	24.09.25	주간	21	6.05	23.0	17.4

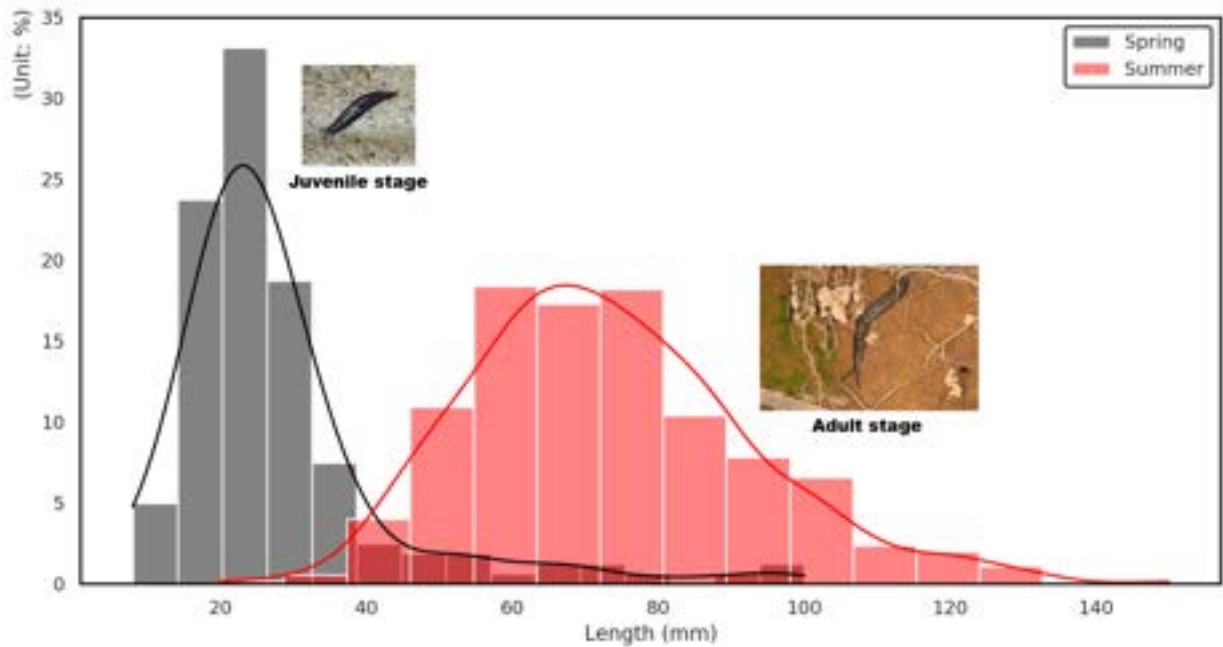


그림 29. 범무늬뾰족민달팽이 계절별 몸길이 변화(봄: 160개체, 여름: 549개체)

나) 분포조사 결과

범무늬뾰족민달팽이의 분포 확산을 확인하기 위해 거점 출현지인 밤밭청개구리공원과 안안골로 부터 반경 2km 범위 내 산림 주변부, 민가 등을 대상으로 총 10일에 걸쳐 현장 조사를 실시하였다. 조사의 범위는 도로를 기준으로 서부로인 근의 동부지역, 봉담과천로 일대인 서부, 영동고속도로 너머 북부로 구분하였다.

동부 지역(성균관대역 방면)에서는 서부로를 경계로 중심으로 범무늬뾰족민달팽이 개체들이 다수 확인되었으며, 주로 수로의 담벼락과 보행자 도로 주변에서 서식하는 것이 관찰되었다. 6월 18일과 21일 조사에서는 북수원 IC 방면 굴다리에서도 일부 개체가 발견되어 거점 출현지를 기준으로 동부 지역 내에서도 서식지가 확장되고 있는 양상을 보였다.

서부 지역(봉담과천로 인근)에서는 거점 출현지인 밤밭청개구리공원 일대와 택지 개발 구역이 포함된 의왕월암공공주택지구 방면에서 범무늬뾰족민달팽이 개체들이 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 공원 인근에서는 비료 포대, 고사목, 폐플라스틱 통 등에서 개체들이 발견되었고, 야간에는 보행자 도로와 울타리에서 활동적인 모습이 관찰되었다. 특히 7월 24일 조사에서는 영동고속도로를 넘어 이목천 방향으로 개체의 이동이 확인되었다.

북부 지역(영동고속도로 북쪽)에서는 이목천 인근에서 개체가 발견되었으며, 6월 26일 조사에서는 영동고속도로 너머 외곽에서는 개체가 확인되지 않았으나,

도로 하부의 굴다리 인근에서 일부 개체가 관찰되었다. 8월 7일 주간 및 야간 조사를 통해 의왕ICD 인접 지역에서도 조사를 진행했으나, 이곳에서는 범무늬뽕족민달팽이가 아닌 다른 민달팽이들만 발견되었다. 특히, 의왕ICD 인접 지역에 대한 조사를 집중적으로 수행하였으나, 농업 적재물, 화단에서 민달팽이 (*Meghimatium bilineatum*), 두줄민달팽이(*Ambigolimax valentianus*), 작은뽕족민달팽이(*Deroceras laeve*)만을 확인할 수 있었다(표 15).

표 15. 범무늬뽕족민달팽이 분포 범위 조사 출현 개체수 및 평균개체밀도

회차	조사일자	방형구수	출현개체수	평균개체밀도
1	24.06.18	47	107	2.28
2	24.06.21	33	124	3.76
3	24.06.26	18	18	2.22
4	24.07.17	23	56	2.43
5	24.07.24	62	135	1.30
6	24.07.31	89	192	2.15
7	24.08.13	21	48	2.29
8	24.08.24	-	-	-
9	24.09.27	-	-	-

다) 분자유전학적 연구를 통한 계통 확인

2024년 수원에서 채집된 민달팽이는 모두 범무늬뽕족민달팽이로 확인되었다. 수원에서 채집된 27개체와 NCBI에서 획득한 23개의 CO I 염기서열 575bp의 유전적 다양성을 확인한 결과 6개의 단상형(haplotype)을 확인하였으며, 다양성값은 0.449로 확인되었다. 또한 nucleotide diversity는 0.00271로 나타났다. 수원에서 채집된 민달팽이의 유전적 다양성은 거의 없었으며, 단상형은 영국, 스위스에서 채집된 개체와 동일하였다(표 16, 그림 30). 범무늬뽕족민달팽이의 interspecific diversity는 0.2%로 매우 낮았으며, *Limax*속의 intraspecific diversity는 6~13.4%로 나타났다.

표 16. *Limax* spp. 9종과 외군의 interspecific diverstisy 값(p-distance)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. <i>L. ianninii</i>		0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	0.012	0.011	0.013	0.015
2. <i>L. minimus</i>	0.106		0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.012	0.012	0.014
3. <i>L. senensis</i>	0.099	0.099		0.005	0.008	0.013	0.011	0.012	0.012	0.015
4. <i>L. corsicus</i>	0.111	0.099	0.020		0.009	0.013	0.011	0.012	0.012	0.015
5. <i>L. ciminensis</i>	0.113	0.103	0.040	0.050		0.013	0.012	0.013	0.013	0.015
6. <i>L. cinereoniger</i>	0.134	0.110	0.120	0.118	0.128		0.012	0.013	0.013	0.014
7. <i>L. sarnensis</i>	0.110	0.081	0.107	0.104	0.110	0.121		0.012	0.012	0.014
8. <i>L. maximus</i>	0.107	0.111	0.105	0.114	0.118	0.134	0.121		0.010	0.015
9. <i>L. brandstetteri</i>	0.117	0.106	0.110	0.107	0.120	0.131	0.117	0.060		0.015
10. <i>Vitrina pellucida</i>	0.166	0.157	0.178	0.172	0.180	0.146	0.149	0.181	0.176	

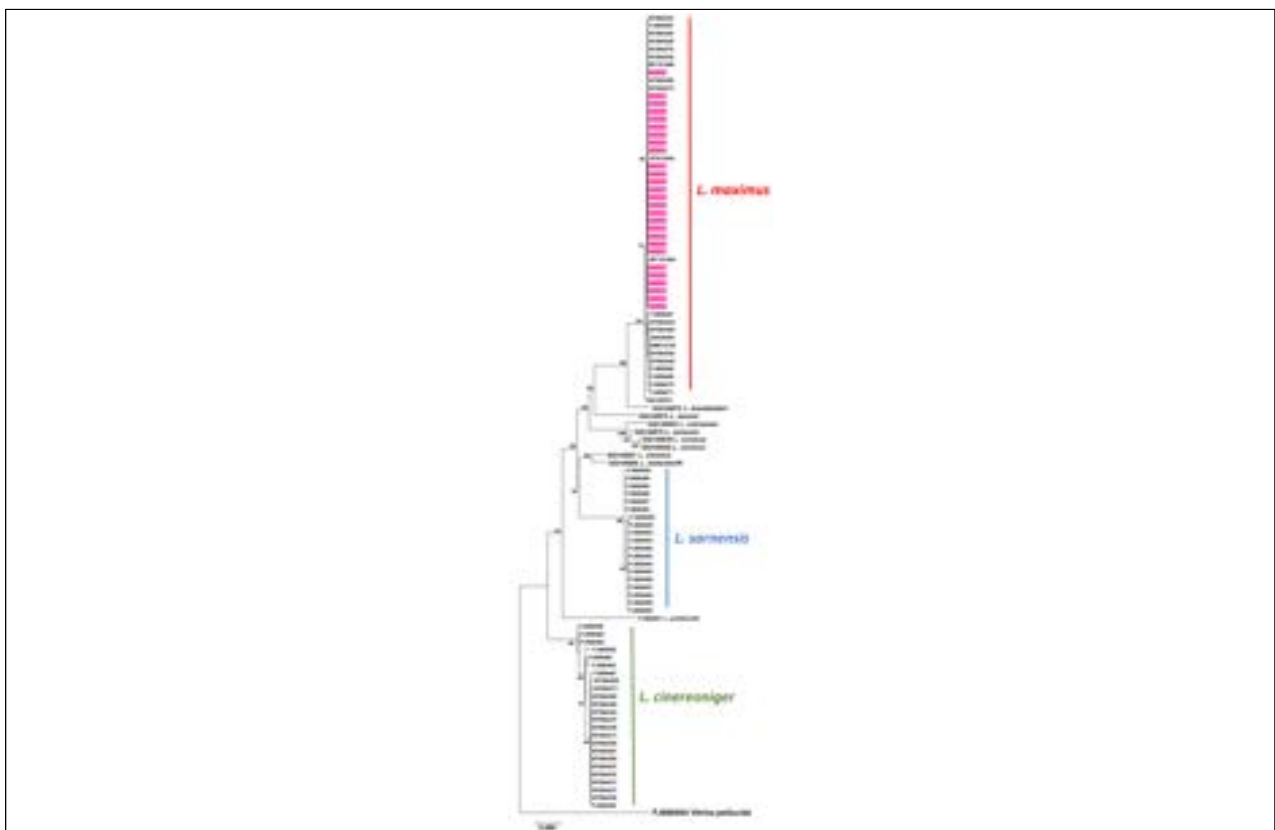


그림 30. 수원에서 채집한 범무늬뽕족민달팽이 27개체와 *Limax* spp. 10종 75개체 CO I 유전자 575bp를 이용하여 작성한 ML tree

6) 국외 분포지도

유럽, 북아프리카, 북미, 멕시코, 아르헨티나, 브라질, 칠레, 콜롬비아, 아르헨티나, 호주, 뉴질랜드 등

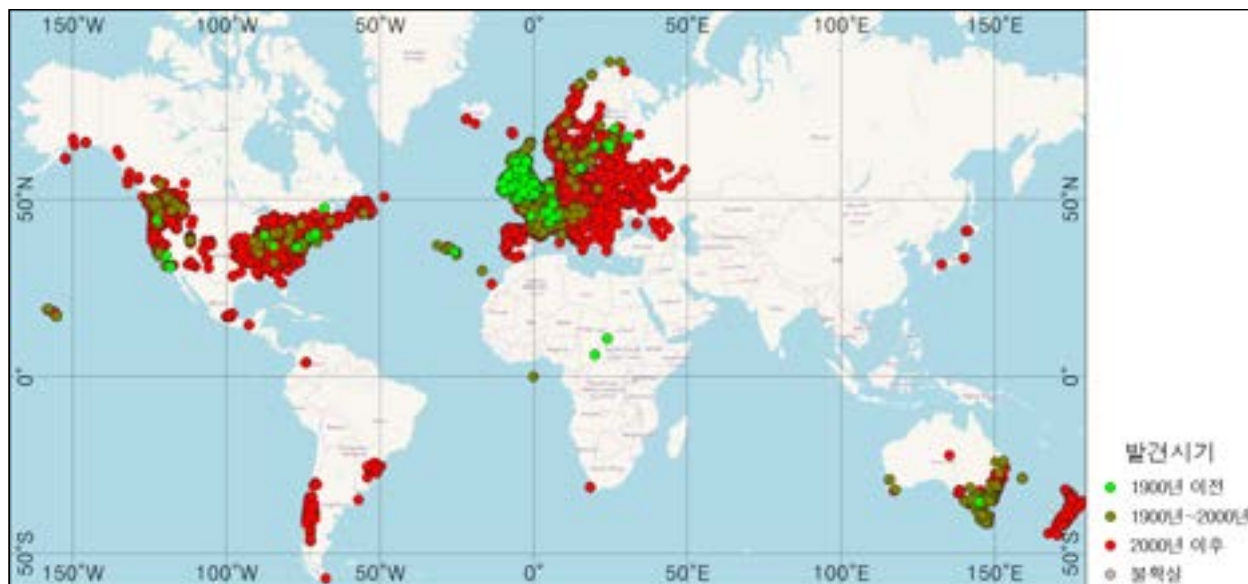


그림 31. ㄱ뽕뽕뽕민달팽이 전 세계 분포
(출처: GBIF(<https://doi.org/10.15468/dl.dn85br>)

7) 서식 환경

ㄱ뽕뽕뽕민달팽이는 원서식지에서 주로 도시, 시골 정원, 폐건물, 지하실, 온실, 공원 등 반자연환경(Semi-nature)이며 은신처가 충분한 공간에서 주로 발견되었다(Cabi, 2015)

ㄱ뽕뽕뽕민달팽이의 분포 조사 결과를 바탕으로 토지피복도 대분류 항목에 따라 선호 서식지를 분류한 결과 초지(41.3%)에서 가장 많은 개체수가 확인되었으며, 산림지역(27.9%), 시가화/건조지역(15.0%), 농업지역(14.1%), 나지(1.3%) 순으로 분포하는 것을 확인하였다.

거점출현지인 밤밭청개구리공원과 안안골 일대에서 ㄱ뽕뽕뽕민달팽이는 습도가 높은 다양한 환경에 출현하는 것으로 확인되었다. 밤밭청개구리공원에서는 산책로 주변의 나무 기둥, 공원 내 바위틈, 낙엽층, 비료 포대, 고사목 및 폐플라스틱 통 밑과 같은 은신처에서 다수의 개체가 발견되었다. 주간에는 주로 이러한 은신처에서 휴면 상태로 관찰되었으며, 습도가 높은 야간에는 산책로와 울타리, 풀숲, 나무 표면을 따라 활발히 이동하는 경향을 보였다.

안안골 일대에서는 산림 가장자리, 민가 인근, 농업 자재 적재지 등 다양한 서식처에서 출현하였으며, 특히 습도가 높은 굴다리 주변과 수목 아래와 같은 그늘진 장소에 다수의 개체가 분포하는 양상을 보였다. 또한, 주변 농경지와 산림 가장자리로 서식지가 확장되며, 다양한 은신처를 효과적으로 이용하는 것으로

확인되었다. 거점출현지를 대상으로 현존식생도 조사를 실시한 결과 시민들이 이용하는 길가에서 가장 많은 개체수(175개체)를 확인하였고, 경작지는 논(12개체)에 비해 밭(121개체)을 선호하였고, 인공시설물 주변에서도 다수를 확인하였다. 인공구조물이나 생활폐기물, 농업적재물 등 인간활동으로 인해 설치·관리되는 시설물 주변 10m 이내에서 463개체 중 282개체(60.9%)가 확인되었다. 연구 결과, 범무늬뽕족민달팽이가 선호하는 서식지는 원서식지에서와 마찬가지로 반자연적 생태계로 판단되며, 산림보다는 초지를 선호하는 것으로 보인다(그림 32).

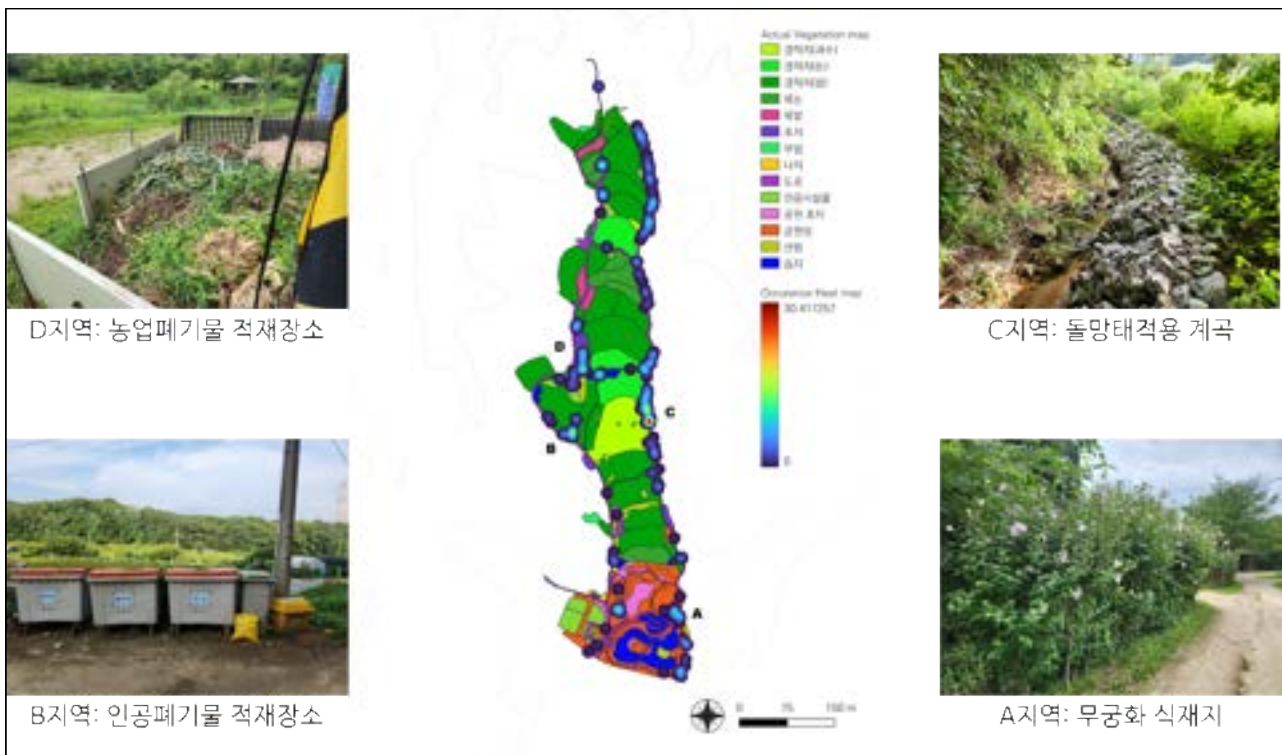


그림 32. 범무늬뽕족민달팽이 선호 서식지 분석(밤밭청개구리공원 현존식생도)

8) 용도

범무늬뽕족민달팽이의 원산지, 침입지의 문헌을 참고하였을 때, 특별한 용도는 없는 것으로 확인하였다.

9) 국내 규제 현황

범무늬뽕족민달팽이에 대해 국내에서 직접적으로 규제하고 있는 법령, 규칙 등은 찾아볼 수 없었으나, 국립생물자원관에서 2019년에 수행된 「주요 관리대상 생물종의 국명 부여 및 국가생물종목록 발전방안 연구」에서 국내 미도입 위해우려종의 후보종으로 *L. maximus*의 국명을 범무늬뽕족민달팽이로 부여한 바 있다.

10) 국외 규제 현황

미국 뉴저지주에서는 자생종에 대한 매우 높은 위해성과 넓은 분포지로 인해 침입종 목록에 포함해 제거 방안을 연구하였다(invasive org, 2024).

포르투갈 국가 침입종 목록(Decreto-Lei n.º 92/2019)에 포함되어 수입, 보관, 사육, 거래, 자연으로의 도입 및 재번식 등이 금지되었다.

11) 형태 특성

성체의 길이는 15~20cm로, 최대 20cm까지 성장하는 대형 민달팽이류에 속한다. 범무늬뽕족민달팽이라는 이름은 이 종의 색상과 무늬에서 유래했으며, 몸 표면에 표범 무늬 같은 불규칙한 검은 반점이 특징적이다. 이러한 무늬는 성체에서 뚜렷하게 나타나지만, 미성숙한 어린 개체에서는 확인하기 어렵다. 체색은 일반적으로 회색에서 갈색을 띠며, 주변 환경에 따라 황회색으로 변하기도 한다. 피부 표면에서는 끈적하고 투명한 점액질이 분비되어 매끄러우며, 이 점액은 보호막 역할을 하며 이동을 돕는다. 체형은 길쭉하고 유선형으로, 꼬리 쪽으로 갈수록 점차 가늘어져 뽕족한 형태를 띤다(그림 33).



그림 33. 범무늬뽕족민달팽이의 형태적 특징

12) 생태 특성

범무늬뽕족민달팽이는 습기가 많은 환경을 선호하였으며, 실제 조사에서는 주간에 비료 포대, 폐플라스틱 통 등 은신처 밑에서 휴면 상태로 발견되었고, 공원에 버려진 쓰레기봉투 밑이나 나무토막, 농업 적재물 밑에서도 휴식하는 모습이 관찰되었다. 낮 시간에는 활동을 멈추고 몸을 수축하지 않은 상태로 머리를 쥘드

(shield) 안으로 넣어 습한 환경에서 휴식하였다. 주된 휴식 장소로는 낙엽 더미, 웅이구멍, 그루터기 아래 젖은 흙, 비닐 아래, 수로 주변부 등이 있었다. 행동패턴은 야행성으로 주로 일몰 이후에 활동성이 높아져 보행자 도로나 주변 산림의 나무기둥, 젖은 흙, 수로 인근 담벼락, 울타리 등에 매달려 있거나 주변을 배회하는 등 활발히 움직였다. 습도와 온도에 민감하여 건조한 환경에서는 활동이 제한되었고, 높은 습도를 유지할 수 있는 장소를 은신처로 삼는 경향을 보였다(그림 34).



그림 34. 범무늬뾰족민달팽이의 서식특성

식성은 잡식성으로, 특히 양배추, 브로콜리, 케일 등 십자화과 식물을 선호하는 것으로 알려져 있다. 현장 조사에서 확인된 바에 따르면, 인근 야산에서는 버려진 음식물, 버섯, 죽은 곤충 및 달팽이류의 사체를 섭취하는 모습이 관찰되었으며, 공원의 산책로 같은 보행자 도로에서는 조경수의 떨어진 꽃봉오리를 섭취했

다. 또한, 주말농장 같은 경작지에서는 낙과하여 썩은 열매를 섭취하며, 동물의 분변을 섭취하는 경우도 발견되었다. 이러한 다양한 식성 덕분에 환경에 따라 다양한 먹이를 찾아 생존할 수 있으며, 농업에 피해를 줄 수 있다는 우려가 있다 (그림 35).



그림 35. 국내 생태계 내에서 범무늬뾰족민달팽이 먹이 활동

범무늬뾰족민달팽이는 자웅동체로 독특한 교미 자세를 취하며, 나무에 매달려 점액질로 된 질기고 긴 줄을 내려 회전하며 교미하는 방식이 특징적이다. 현장 조사에서는 이른 저녁에 교미 직전 서로를 탐색하는 장면만 관찰할 수 있었고, 자정 이후에 교미하는 장면을 확인하였다. 산란 후 3~4주 이내에 알이 부화하는 것으로 알려져 있다. 또한, 습도와 온도에 따라 번식력이 달라지며, 번식력이 뛰어나 한 번 산란할 때 다수의 알을 낳지만 조사 중 산란하는 개체는 발견하지 못하였다(그림 36).



교미 전 탐색(1)



교미 전 탐색(2)



공중교미(1)



공중교미(2)

그림 36. 범무늬뽕족민달팽이 교미

나. 유입 가능성

1) 국내 이용을 위하여 수입 · 반입될 가능성

범무늬뽕족민달팽이의 국내 이용을 위하여 수입 · 반입될 가능성은 매우 적을 것으로 판단된다.

2) 운송 수단과 화물 등에 혼입 · 부착되어 국내로 유입될 가능성

병안류(Stylommatophora)는 식량, 애완동물 등 이용을 위한 목적 외에 생태적 특성으로 인해 비의도적으로 각 국가에 침입하는 사례가 다수 보고되었다(Cowie and Robinson, 2003). 범무늬뽕족민달팽이는 국외에서 국제 생물 보안 규정과 감시로 인해 비의도적 운반 가능성이 많이 줄었으나, 1870년대부터 뉴질랜드에 유입되었으며, 미국 국경 검역 과정에서 발견된 사례가 보고된 만큼, 원예, 용기, 절화, 신선한 과일, 신선한 야채와 허브, 군수화물 등을 통한 잦은 비의도적 유입이 보고된 생물이다.(Robinson, 1999, Cabi, 2015)

국내에 유입된 범무늬뽕족민달팽이의 유입 경로는 알 수 없으나 주요 출현지점 주변에 물류량이 많은 영동고속도로와 의왕ICD가 위치한 것으로 미루어봤을 때, 국내 역시 야채나 원예, 등 해외로부터 수입에 혼입하여 유입된 것으로 추정된다(그림 37).



그림 37. 야채 등을 섭취하는 범무늬뽕족민달팽이

다. 정작 가능성

1) 기후 적합성

범무늬뽕족민달팽이의 정착가능성을 분석하기 위해 MaxEnt software 3.4.4를 활용하여 MaxEnt 모형을 구축하였다. 국내외 범무늬뽕족민달팽이 발견 지점은 중복제거 되어 총 59,229개 중 22,577개가 모형 학습 및 테스트 데이터로 사용되었다. 구축된 모형의 AUC 값은 0.902 ± 0.002 로 나타났으며 이는 모형의 신뢰성이 매우 높음을 보여준다. 모형이 학습될 때 예측력에 기여를 많이 한 변수는 bio14, bio11, bio19 등의 순이었으며, 각각의 변수를 제외했을 때 모형의 정확도에 영향을 크게 미치는 중요한 변수는 bio11, bio19, bio12, bio14 등의 순이었다 (그림 38, 표 17).

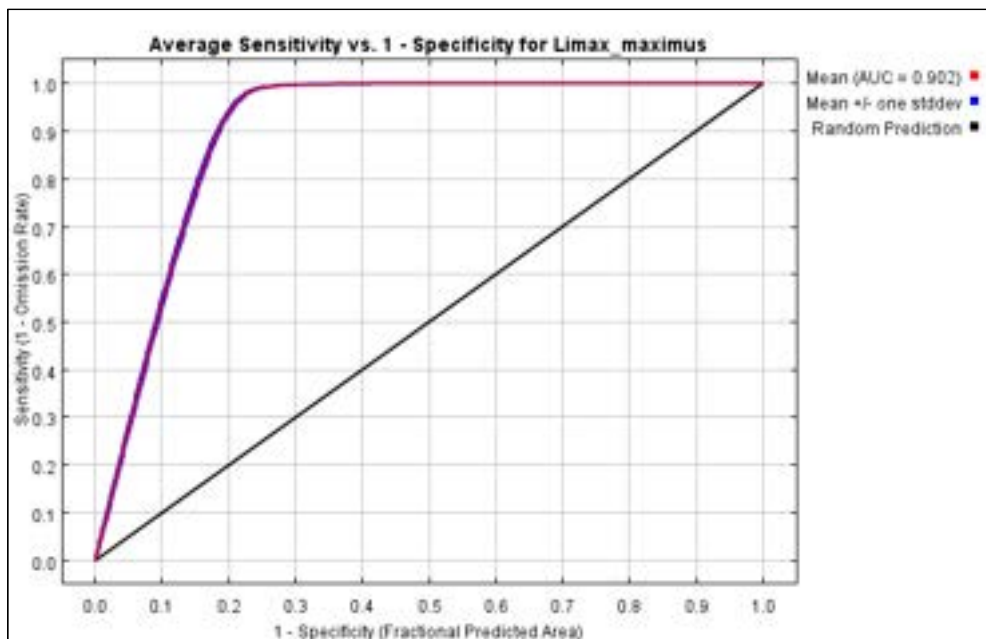


그림 38. 범무늬뽕족민달팽이 MaxEnt 모형의 ROC 커브.

표 17. 범무늬뽕족민달팽이 MaxEnt모델의 환경변수들에 대한 기여도, 중요도

환경변수		기여도	중요도
bio14	가장 건조한 달의 강수량	62.2	3.1
bio11	가장 추운 분기의 평균 기온	29.1	81.2
bio19	가장 추운 분기의 강수량	6.9	6.6
bio12	연간 강수량	0.9	5.2
bio2	평균 일주 범위	0.5	0.9
bio4	온도 계절성	0.3	0.4
bio15	강수 계절성	0.2	2.6

2) 범무늬뽕족민달팽이의 정착가능성에 영향을 미치는 환경요인

MaxEnt 모형의 변수기여도/중요도와 응답곡선에 따르면, 범무늬뽕족민달팽이는 가장 건조한 달의 강수량이 약 20~100mm로 낮고 가장 추운 분기의 평균 기온이 약 -5~8℃로 높고, 가장 추운 분기의 강수량이 약 100~600mm로 낮은 경우 정착할 가능성이 높다고 가정하였다(그림 39).



그림 39. 범무늬뽕족민달팽이 MaxEnt 모형의 응답곡선

3) 범무늬뽕족민달팽이의 잠재적인 정착 가능성

전세계 단위의 범무늬뽕족민달팽이 서식지 적합성 지수는 최소 0, 최대 0.64, 평균 0.04 ± 0.11 로 유럽, 미국 동부, 캐나다 서부, 칠레를 중심으로 높게 나타났다(그림 40).

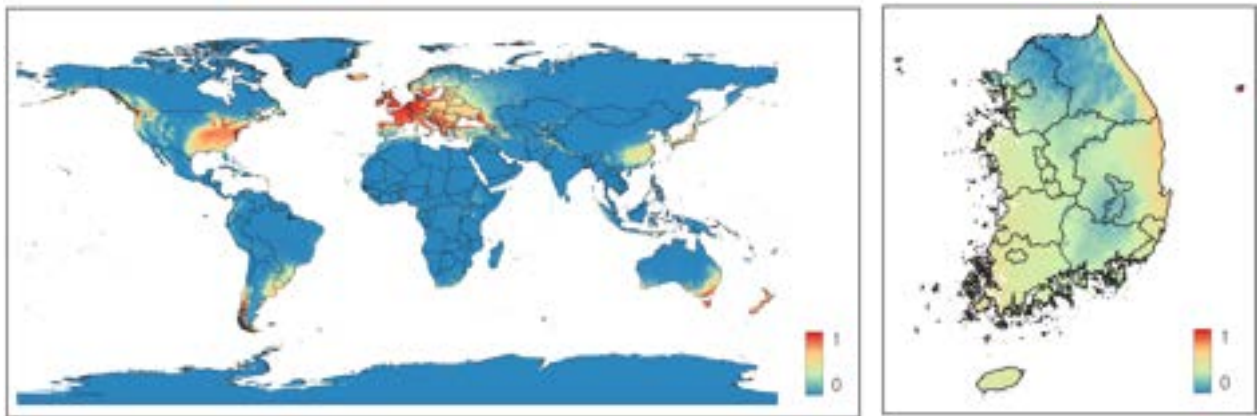


그림 40. 범무늬뽕족민달팽이의 잠재적인 정착 가능성(좌: 전세계, 우: 대한민국)

대한민국 단위의 범무늬뽕족민달팽이 서식지 적합성 지수는 최소 0.04, 최대 0.52, 평균 0.19 ± 0.06 로 나타났다. 17개 권역별 서식지 적합성 지수의 평균을 산출하여 정착 위험도를 평가한 결과, 울산광역시(평균 0.26 ± 0.02), 전라남도(0.24 ± 0.03), 부산광역시(0.24 ± 0.01), 제주특별자치도(0.24 ± 0.01) 등의 순으로 높게 나타났다.

라. 확산 가능성

1) 번식력

범무늬뽕족민달팽이(*Limax maximus*)는 자웅동체로, 다른 개체와 교미하여 다수의 알을 산란한다. 한 번에 많은 알을 낳으며, 유체 생존율도 높아 개체 수가 급격히 증가할 수 있다. 실제로, 암수 모두 적게는 10개에서 최대 200개의 투명한 알을 낳으며, 약 1개월 만에 부화한다(Cabi, 2015). 뉴질랜드에 침입한 범무늬뽕족민달팽이의 생애주기는 봄철에 정소가 확장되고 정자 생산이 시작되는 단계, 여름철에 여성 부속선이 성장하고 발달하는 단계, 가을철에 수정과 산란이 이루어지며, 이와 함께 생식선이 퇴화하는 단계, 총 3가지 단계로 이루어진다(Barker and McGhie, 1984). 이러한 번식 특성은 서식지 밀도가 높아질수록 더욱 두드러지며, 개체 수가 많아질수록 인근 지역으로 확산될 가능성도 커진다. 또한 범무늬뽕족민달팽이는 다양한 환경에 적응할 수 있어 새로운 서식지에서도 높은 번식력을 유지할 가능성이 크다. 이는 비의도적 확산이 발생할 경우에도 개체군이 쉽게 자리 잡을 수 있는 중요한 요인으로 작용한다.

2) 분산 능력

범무늬뽕족민달팽이는 비의도적 확산 가능성이 높은 종이다. 이들은 낮 동안 폐기물이나 쓰레기에 부착하여 휴면하고, 밤에 먹이를 찾기 위해 활동한다. 이러한 습성은 폐기물 처리 과정에서 다른 지역으로 이동할 위험을 증가시킨다. 또한, 다양한 환경에 적응할 수 있어 새로운 서식지에 쉽게 정착할 수 있다. 이로 인해 인간 활동에 따라 비의도적으로 장거리로 이동할 가능성이 크며, 이러한 특성을 고려할 때 폐기물 처리 단계에서의 세심한 관리와 점검이 필요하다.

3) 운송 수단과 화물 등에 혼입 부착되어 국내에서 분포가 확대될 가능성

민달팽이의 생태적 특성상 쉽게 서식 가능한 토양, 화분, 저장된 채소 및 기타 농산물, 나무 포장재(나무 상자, 펠릿) 등의 이동에 의해 확산될 가능성이 높다(Cabi, 2015). 따라서 범무늬뽕족민달팽이 역시 마찬가지로 운송 수단과 화물에 의해 비의도적으로 확산될 가능성을 배제할 수 없다. 실제로, 2012년 일본 홋카이도에서 확인된 범무늬뽕족민달팽이는 6년간 최초 발견지인 삿포로시 주변 지역에서 발견되었으며, 삿포로시에서 약 100km 떨어진 지역에서까지 발견되었다(Mori and Nakano, 2017) 국내에서 범무늬뽕족민달팽이의 분포가 확인된 지역은 의왕ICD와 영동고속도로 등 화물 운반이 잦고, 의왕ICD 제2컨테이너터미널과 인

접해 있어 컨테이너를 통한 비의도적 유입 가능성이 있다. 이 지역에서는 성체가 발견되었지만, 인근 민가에서는 살아 있는 개체가 확인되지 않았다. 이는 해당 지역의 밀도가 낮거나 적합한 환경이 부족했을 가능성을 시사한다. 그럼에도 불구하고 주변 환경이 유사한 농경지와 민가가 존재하여 향후 자연적인 확산할 수 있다. 따라서 범무늬뾰족민달팽이가 해당 지역에 확산하였을 때 화물 운송을 통해 전국으로 확산될 수 있으므로, 이에 대한 관리와 주의가 필요하다(그림 41).



그림 41. 인간활동으로 인해 비의도적 운반 가능성이 높은 범무늬뾰족민달팽이

마. 생태계 및 사회·경제·질병에 대한 영향

1) 초식, 포식, 기생, 독성 및 타감 작용의 영향

범무늬뾰족민달팽이는 국외에서는 은신처와 먹이와 같은 중요한 자원을 놓고 경쟁할 때 동종 및 다른 민달팽이 종에 대해 공격적인 것으로 알려져 있다 (Barker and McGhie, 1984; Rollo and Wellington, 1981). 생태계 내에서 공격성이 적은 민달팽이 종의 번식 성공을 감소시키고 사망률을 증가시킬 수 있다(Rollo, 1983). 침입종인 범무늬뾰족민달팽이와 *Arion ater*, 토착종인 *Ariolimax columbianus*의 생존력, 알의 수, 크기, 개수, 알 낳는 서식지 접근성에 대한 중간 경쟁 실험을 통해 범무늬뾰족민달팽이가 다른 종에 공격적이며 다른 두 종의 번식률을 감소시켰으며, 8월에 두 종의 사망률이 증가하였는데, 기온이 상승하면서 더욱 공격력이 증가하였다(Joe and Daehler, 2008).

2) 경쟁의 영향

범무늬뾰족민달팽이의 확산은 지역 생태계 내에서 다른 토착 민달팽이 및 기타 초식 생물들과의 경쟁을 유발할 수 있다. 조사 결과, 범무늬뾰족민달팽이가

발견된 지역에서는 다른 종류의 민달팽이는 거의 발견되지 않았으며, 주로 일반적인 달팽이만 관찰되었다. 반면, 인근 주거지와 화단 및 경작지의 농업 적재물 등에서는 민달팽이(*Meghimatium bilineatum*), 두줄민달팽이(*Ambigolimax valentianus*), 작은뿔족민달팽이(*Deroceras laeve*) 등이 발견되었지만, 범무늬뿔족민달팽이는 나타나지 않았다. 이러한 현상은 범무늬뿔족민달팽이가 특정 환경에 정착한 후 대량으로 발생하여, 토착 민달팽이와의 경쟁에서 상대적으로 강한 생존력을 보이는 것으로 유추할 수 있다.

범무늬뿔족민달팽이의 출현이 확인된 지역에서 기존 민달팽이의 다양성이 감소하는 경향이 있었고, 이는 생물 다양성의 감소를 초래할 수 있는 잠재적 위협 요소로 작용할 수 있다. 여러 생태적 요인에 따라 민달팽이 간의 경쟁 관계는 복잡하게 얽혀 있으며, 이로 인해 생태계 내에서의 경쟁이 미치는 영향은 다양한 양상으로 나타날 수 있다. 범무늬뿔족민달팽이가 지역 생태계에 미치는 경쟁적 영향은 다른 토착 민달팽이와 비교했을 때, 상대적으로 심각하지 않을 수 있지만, 지속적인 모니터링이 필요하며, 토착 생물에 대한 잠재적 위협으로 인식되어야 한다.

3) 병해충 전파의 영향

반추동물의 선충 기생충은 복족류를 중간 숙주로 이용하므로 감염된 범무늬뿔족민달팽이로 인한 양, 염소, 사슴 등의 발병이 가능하며 모피 무역에 이용되는 족제비과 동물을 감염시킨 보고가 있다. 또한, 심장사상충으로도 알려진 *Angiostrongylus vasorum*은 개 혈관선충증을 유발하며, 범무늬뿔족민달팽이는 이러한 기생충의 중간숙주로 알려져 있다(Ferdushy *et al.*, 2009).

4) 교잡의 영향

범무늬뿔족민달팽이와 근연종은 모두 유럽에서 유래한 외래 민달팽이류이므로, 국내에 서식하는 토착 민달팽이류와의 교잡 영향은 적을 것으로 추정된다.

5) 주요 생물다양성 보호구역에 대한 영향

국내 유입된 범무늬뿔족민달팽이는 현재까지 경기도 수원시 일대에서만 출현이 확인되고 있으나, 적절한 조치를 취하지 않을 경우 빠른 시일 내에 확산할 가능성이 농후한 생물이다. 현재까지 연구된 바로 산림보다는 초원형 서식지를 선호하는 것으로 확인되었으나, 서식 환경이 적절할 경우 국립공원이나 생물다양성 보호구역 내에 침입할 가능성을 염두해 두어야 한다.

실제로, 뉴질랜드의 Tongariro 국립공원과 Egmont 국립공원, 하와이 제도의 Hakalua Forest National Wildlife Refuge와 Haleakala 국립공원, 남아프리카의 Table Mountain 국립공원 등 다양한 국립공원 및 국제적으로 중요 야생 생물 서식 지역에 이입이 확인되었다(Cabi, 2015).

캐나다 브리티시 컬럼비아에 서식하는 멸종위기종인 *Allogona townsendiana*와 *Hemphillia dromedarius*의 회복 계획에서 범무늬뽕족민달팽이와의 경쟁과 포식이 고려되었다(Parks Canada Agency, 2009; Oregon Forestsnail Recovery Team, 2012). 또한, 하와이에서는 일부 멸종위기 식물의 묘목 생존율을 감소시켜 식물 멸종위기에 직접적인 영향을 준 사례가 보고되었다(Joe and Daehler, 2008).

6) 먹이그물, 천이, 수분, 산포 등 생태계 생물요소에 대한 영향

범무늬뽕족민달팽이는 잡식성으로, 살아있는 식물의 잎이나 줄기보다는 썩은 식물질, 곤충의 사체 및 동족의 분변 등을 섭취하는 경향이 있다. 이로 인해 범무늬뽕족민달팽이는 생태계의 먹이망에서 특정 역할을 할 수 있으며, 이러한 섭취 습성이 식물의 분해 및 영양 순환에 긍정적인 영향을 미칠 가능성이 있다. 그러나, 이 민달팽이가 다른 초식성 생물과의 경쟁을 유발할 수도 있어, 지역 식물군의 다양성에 부정적인 영향을 미칠 가능성도 배제할 수 없다. 실제로, 하와이에 침입한 범무늬뽕족민달팽이는 하와이 토착 식물의 묘목을 선택적으로 먹음으로써 식물의 다양성에 영향을 미치는 것으로 보고되었으며, 일본에서 식이물 연구 결과 *Brassica oleracea*를 가장 선호하였으며, *Lactuca indica*와 *Sambucus racemosa*가 뒤를 이었다(Cabi, 2015; Wataru and Ikuyo, 2022).

또한, 범무늬뽕족민달팽이가 서식하는 지역에서의 식물군 집단 변화는 수분 매개자인 곤충들에 간접적인 영향을 미칠 수 있다. 민달팽이가 식물의 잎을 과도하게 소비하는 경우, 해당 식물의 꽃 생산량이 감소하여 수분 활동에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 범무늬뽕족민달팽이는 천이 과정에도 일정 부분 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다. 이 민달팽이가 서식하는 지역에서 식물 군집이 변화하면, 생물 다양성에도 영향을 미칠 수 있으며, 장기적으로 생태계의 기능과 안정성에 부정적인 결과를 초래할 우려가 있다.

7) 영양염류 순환, 수질, 토양 침식 및 퇴적 등 생태계 비생물요소에 대한 영향

범무늬뽕족민달팽이로 인한 영양염류 순환, 토양침식, 퇴적 활동 등 비생물적 요소에 대해 미치는 영향은 미미할 것으로 추정된다.

8) 농림축수산업에 대한 영향

주요 해충 민달팽이는 아니지만, 정원, 배정지, 시립 정원, 상업용 꽃 및 채소 작물(온실의 보호 작물 포함), 재배 버섯, 저장된 채소 및 과일에서 경미한 해충으로 여겨진다. 하지만 하와이에서는 토종 식물 묘목을 섭식하여 고사시키거나 상품성을 하락시켜 상업적 재배에 문제를 일으킨다는 보고가 있었으며, 중국에서 중요한 농업 해충으로 성충과 유충 모두 가지과(Solanaceae), 십자화과(Cruciferae), 콩과(Leguminosae) 작물에 피해를 주고 잎, 과일, 줄기에 섭식 자국을 포함하여 기어다닌 점액 흔적 및 배설물은 농산물의 품질과 작물의 안전성에 큰 영향을 준 것이 보고되었다(Haojun *et al.*, 2024). 또한, 일본에 침입한 범무늬뽕족민달팽이는 오이, 고구마, 상추, 배추 등의 농산물을 섭취하여 피해를 주었다(Mori and Nakano 2017).

9) 사회기반시설(교통시설, 하천, 부두, 댐, 건물 등), 경관 및 문화적 가치 등에 대한 영향

범무늬뽕족민달팽이는 국내의 일반적인 민달팽이류와는 다른 생소한 외형을 지닌 대형 달팽이로, 눈에 띄는 화려한 무늬와 함께 주요 서식지에서 대량으로 발견된다. 이러한 특성은 사회기반시설, 특히 교통시설과 밀접하게 연관되어 있다. 범무늬뽕족민달팽이는 비의도적 확산 가능성이 높아, 폐기물이나 쓰레기에 부착하여 이동하며, 화물 운송 경로와 인접한 지역에서는 운송 수단을 통해 쉽게 퍼질 수 있다. 이로 인해, 범무늬뽕족민달팽이가 분포하는 지역은 생물 다양성과 생태계 서비스에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있으며, 이러한 변화는 지역의 경관과 문화적 가치에도 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 이 민달팽이의 확산에 대한 체계적인 관리와 주의가 필요하다.

10) 인체 건강에 대한 영향(독성, 알레르기성, 질병 및 기생충 전파, 상해 등)

호주 시드니에서 살아있는 범무늬뽕족민달팽이를 섭취한 사람이 호산구성 뇌막염에 감염된 사례로 인해, 범무늬뽕족민달팽이는 기생충(*A. cantonensis*) 중간숙주로 여겨진다. 범무늬뽕족민달팽이가 중간 숙주역할을 수행한 사례가 하와이 제도 와 남미에서도 보고되었다(Teixeira *et al.*, 1971; Senanayake *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2014). 따라서, 국내 유입된 범무늬민달팽이의 기생성 선충류 감염 여부를 확인하기 위해, 수원 밤밭청개구리공원에서 채집된 범무늬뽕족민달팽이 5개체를 대상으로 선충(Nematoda) 검출 실험을 수행한 결과 광동주현선충증을 유발할 수

있는 폐선충(*Angiostrongylus* spp.)은 확인되지 않았다. 더불어 인수공동점염병을 일으킬 수 있는 *Ancylostoma*, *Baylisascaris*, *Capillaria*, *Uncinaria*, *Strongyloides*, *Toxocara*, *Trichinella*속 또한 검출되지 않았으나, 곤충병원성을 띠는 기생형 선충류인 Rhabditidae과 선충류가 발견되었다(표 18). 해당 지역은 2022년 전국자연환경조사 결과 국가적색목록 2종(송장벌레, 회점팔랑나비) 및 한반도 고유종 3종(점보라맵시벌, 감둥이창나방, 줄우단풍뎅이)이 확인된 바 있어, 향후 질병피해 및 발견가능한 선충류에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 판단되었다(표 18).

표 18. 선충류(Nematoda) metabarcoding 결과 및 생태 특성

Family	species	특징
Cephalobidae	<i>Acrobeles</i> sp. MA-2012	육지에 서식하며 박테리아 섭취(과단위)
Chromadoridae	<i>Ptycholaimellus ocellatus</i>	자유생활형으로 해양선충류 계열(과단위)
Cyatholaimidae	<i>Paracyatholaimus oistospiculoides</i>	자유생활형으로 주로 해안 수역에서 보고되지만 일부 기수와 담수에서도 확인
Desmodoridae	<i>Catanema</i> sp. belize 1	자유생활형으로 해양선충류 계열(과단위)
	<i>Metachromadora</i> sp. M1	자유생활형으로 해양선충류 계열(속단위)
	<i>Onepunema enigmaticum</i>	자유생활형으로 해양선충류 계열(과단위)
Enoplidae	<i>Trischistoma pellucidum</i>	해양선충류 계열(과단위)
	<i>Trischistoma taiguensis</i>	해양선충류 계열(과단위)
Haliplectidae	<i>Haliplectus</i> sp. 4669-10	해양선충류 계열이나 일부 토양에서도 발견(과단위)
Oxystominidae	<i>Thalassoalaimus</i> sp. 2 TJP-2019	자유생활형으로 토양, 담수 계열(과단위)
Rhabditidae	<i>Caenorhabditis</i> sp.	토양과 담수 퇴적물에서 주로 발견되며 때때로 곤충병원성 형태의 동물 기생충으로 작용(속단위)
	<i>Caenorhabditis plicata</i>	토양과 담수 퇴적물에서 주로 발견되며 때때로 곤충병원성 형태의 동물 기생충으로 작용(속단위)
Selachinematidae	<i>Pseudocheironchus ingluvisus</i>	해양선충류 계열로 다른 선충류를 포식함(과단위)
Trefusiidae	<i>Trefusia</i> sp. LCL8	자유생활형으로 해양선충류 계열(과단위)
	<i>Tripylina gorganensis</i>	자유생활형으로 해양선충류 계열(과단위)
Xennellidae	<i>Xennella suecica</i>	자유생활형으로 해양선충류 계열(과단위)

11) 방제 난이도 및 비용

해외 침입, 방제 사례를 미루어봤을 때, 범무늬뿔족민달팽이는 침입 초기 단계를 제외하고는 정착하면 근절은 거의 불가능한 것으로 보고되었다(Cabi, 2015).

국내에 출현하는 범무늬뿔족민달팽이는 2.3km²의 좁은 면적에서 높은 밀도로 출현하는 것으로 미루어봤을 때, 외래생물의 도입 단계(Introduction Phase), 혹은

증식 단계(Expansion Phase)와 유사한 양상을 보이므로, 침입 초기단계라고 판단되었다(Elton, 1958). 따라서, 국내에 유입된 범무늬뽕족민달팽이의 개체군을 방제해야할 경우, 빠를수록 좋을 것으로 판단되며, 방제시 손으로 제거 가능하나 알, 어린 개체는 흙과 식물 잔해물 속에 있기 때문에 발견이 어려우며 개체수 조절을 하기에 적합한 방법은 아니다.

병원성 박테리아, 균류 및 바이러스, 기생성 원생동물, 섬모충류, 선충류, 흡충류 및 조충류, 들파리과(Sciomyzidae) 등이 기록된 천적으로 알려져 있으며, 육식성 복족류, 절지동물, 양서류, 파충류 등 육식성 척추동물을 통한 생물학적 방제가 가능하나 효과적이지 않다.

범무늬뽕족민달팽이의 생활사별 살충 활성 실험을 위해 *Ageratina adenophora* (국화과) 수용성 추출물을 사용하였으며, 모든 생활 단계에서 활동에 영향을 미치는 것으로 확인되어 방제에 효과적으로 활용될 수 있다(Haojun *et al.*, 2024).

3. 마블가재(*Procambarus virginalis*)

가. 기본정보

1) 분류

- 국명: 마블가재
- 학명: *Procambarus virginalis* (Lyko, 2017)
- 영명: Marbled crayfish
- 이명: *Procambarus fallax* f. *virginalis*
- 생물분류체계: 계(Kingdom) - Metazoa

문(Phylum) - Arthropoda

강(Class) - Malacostraca

목(Order) - Decapoda

과(Family) - Cambaridae

속(Genus) - *Procambarus*

종(Species) - *Procambarus virginalis*

2) 원산지

마블가재는 1990년대 중반 독일의 애완동물 거래 시장에서 처음 발견된 생물로, 애완동물로 사육되던 *Procambarus fallax* 암컷 중 하나가 돌연변이로 인해 단성생식이 가능해짐에 따라 단일종으로 인정받았다. 마블가재의 원종인 *P. fallax*는 미국의 플로리다주를 원산지로 알려진 바 있으나(Lyko, 2017; Gutekunst *et al.*, 2021), 마블가재의 정확한 원산지는 알려진 바 없다.

3) 침입지

마다가스카르, 일본, 오스트리아, 독일, 이탈리아, 네덜란드, 스웨덴, 영국, 미국 플로리다 등

4) 침입경로

마블가재(*P. virginalis*)는 1990년대 중반 독일의 애완동물 거래 중 종이 최초로 확인되었다. 현재 유럽의 생태계 내에서 확인된 마블가재는 모두 애완동물로 유통되던 마블가재가 무분별하게 방류되는 과정에서 발생하였으며(Soes and Eekelen, 2006; Grosset *et al.*, 2006; Chucholl and Pfeiffer, 2010), 이후, 국제 애완동물 거래로 인해 유럽에서 다른 대륙으로 확산되었다(Faulkes, 2010). 국내 유

입 시점 또한 1990년대 중반 이후 애완동물로 유입된 것으로 추정되고 있으며, 2019년 유입주의 생물로 지정되어 타 국가로부터의 수입은 불가능하나, 여전히 수족관, 인터넷 쇼핑, 네이버 카페 등에서 분양되고 있다(그림 42).

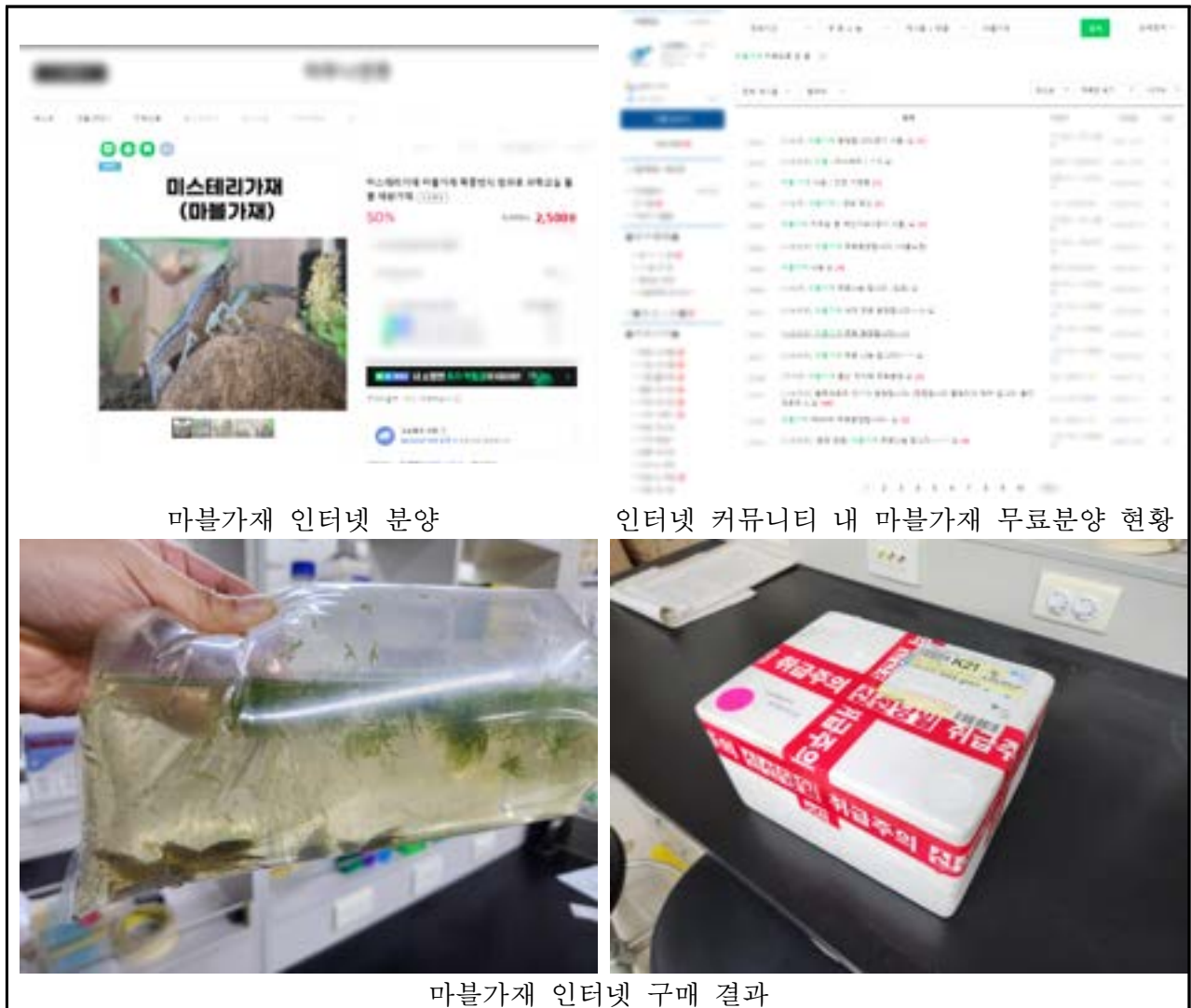


그림 42. 마블가재 인터넷 등 구매 가능 현황

5) 국내 분포지도

마블가재는 2021년 부산 평화공원에서 최초로 발견된 이후, 2022년 「외래생물 정밀조사」 대상종으로 선정, 조사되었고 2024년 「외래생물 정밀조사」 대상종으로 재선정되었다.

2022년 「외래생물 정밀조사」 결과 43개 대상지 중 3개 지점(남산 야외식물원, 용인 정평천, 부산 평화공원)에서 마블가재가 서식하는 것으로 확인되었다. 이후,

2023년 마블가재 서식지 2개소(이천 죽당천, 부산 시민공원)가 추가로 발견되어 총 5개 지점에 대한 현장조사를 실시하였다. 조사 결과 용인 정평천을 제외한 모든 기출현지에서 마블가재가 확인되었으며, 총 74개체가 포획되었다. 마블가재 서식지 주변에서 eDNA 조사를 실시한 결과 14개 지점 중 3개 지점(남산골 한옥마을, 장충단공원, 부산 성지곡수원지)에서 마블가재의 유전자가 검출되었다. 그 중 남산골 한옥마을과 장충단공원에서 육안조사 및 통발조사를 1회 실시하였으나, 실개체는 확인하지 못하였다(그림 43, 표 19, 20).

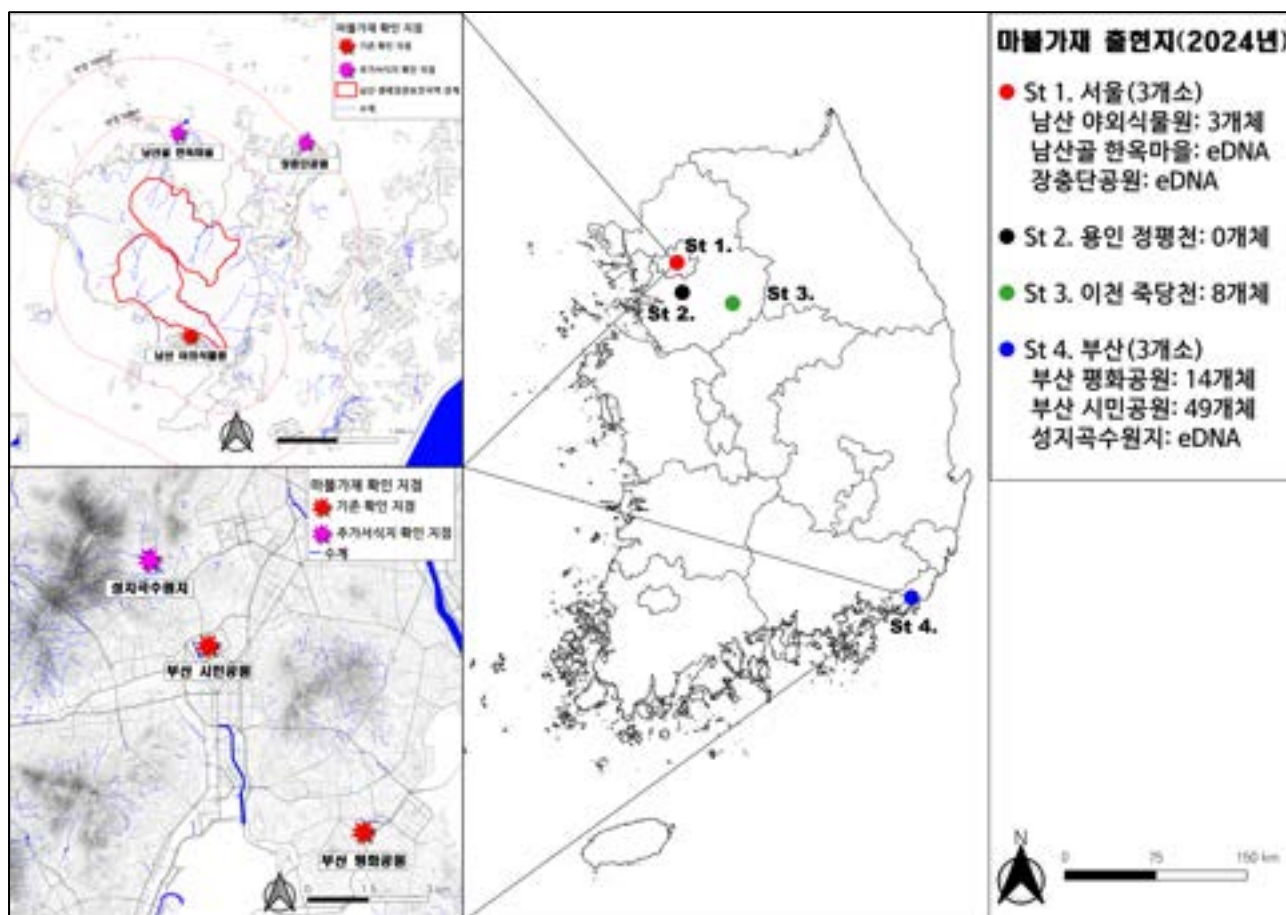


그림 43. 마블가재 국내 분포 지도

표 19. 2022년-2024년 마블가재 정밀조사 비교(현장조사)

구분	2022년 정밀조사			2024년 정밀조사		
조사 방법	직접 조사: 육안 조사, 뜯개 조사 등 현장 조사					
	통발 조사: 주간에 통발 설치, 다음날 통발 회수. 포획된 생물 동정, 계측					
조사 지점	총 43개소, 3개체 포획(21년 평화공원 포함)			총 7개소, 74개체 포획		
	서울(5개소)	남산 야외식물원	1	서울(3개소)	남산 야외식물원	3
		용산가족공원	-		남산골 한옥마을	0
		서울과학기술대학교	-		장충단공원	0
		서울시립대학교	-			
		발바닥공원	-			
	세종(1개소)	세종호수공원	-	부산(2개소)	부산 평화공원	14
	인천(1개소)	물빛공원	-		부산 시민공원	49
	부산(3개소)	부산 평화공원	1		경기(2개소)	이천 죽당천
		부산 시민공원	-	용인 정평천		0
		선경어린이집 앞 연못	-			
	울진(2개소)	선암호수공원	-			
		울산대공원	-			
	광주(2개소)	수완호수공원	-			
		풍암저수지	-			
	대구(1개소)	성당못	-			
	경기(21개소)	시각공원	-			
		은행식물원	-			
		수락리버시티공원	-			
		가람공원	-			
		솔내공원	-			
		도곡근린공원	-			
		옥구 공원	-			
		배움의 숲	-			
		홍덕2교 근처 경로당 앞	-			
		영덕레스피아	-			
		직동생태공원	-			
		도래울 의장대공원	-			
		정평천	1			
		역동저수지	-			
		한숲물빛공원	-			
		양춘지구공원	-			
		외삼미2저수지	-			
		갈전저수지	-			
		뒤방죽	-			
		갑골저수지	-			
		북산재	-			
	경남(2개소)	달개늪	-			
		한국도로공사 본사(용전지)	-			
	전북(1개소)	생강골공원	-			
	전남(1개소)	생태연못	-			
	충남(3개소)	유량방죽	-			
		징검다리 연못	-			
		광시한우테마공원	-			

표 20. 2022년-2024년 마블가재 정밀조사 비교(eDNA 조사)

구분	2022년 정밀조사			2024년 정밀조사		
조사 방법	eDNA 조사 : 마블가재 서식 예상 지역 채수(물뜨기), 물속 잔존 DNA 검출					
조사 지점	총 20개소, 0개소 확인			총 14개소, 3개소 확인		
	서울(5개소)	남산 야외식물원	-	서울(6개소)	남산골 한옥마을	0
		용산가족공원	-		장충단공원	0
		서울과학기술대학교	-		서울숲	-
		서울시립대학교	-		용산가족공원	-
	인천(1개소)	발바닥공원	-		청계천	-
		물빛공원	-		효창공원	-
	부산(3개소)	부산 평화공원	-	부산(4개소)	성지곡수원지	0
		부산 시민공원	-		동의대학교	-
	울산(2개소)	선경어린이집 앞 연못	-		오륙도 해맞이공원	-
		선암호수공원	-		온천천	-
	광주(2개소)	울산대공원	-		경기(4개소)	설봉저수지
	대구(1개소)	수완호수공원	-	안흥지		-
풍암저수지		-	환경테마공원(이천)	-		
경기(6개소)	성당못	-	북하천	-		
	시각공원	-				
	수락리버시티공원	-				
	옥구 공원	-				
	직동생태공원	-				
	정평천	-				
	한국도로공사 본사(용전지)	-				

가) 현장 조사 결과 대상지별 마블가재 포획 현황

남산야외식물원은 남산 생태경관보전지역과 불과 약 10미터 이격된 식물원으로, 주변 시민들의 접근성이 높은 지역이다. 본 연구에서는 남산야외식물원 내 연못에서 두 차례 조사를 실시하였다. 5월 조사에서 3개체의 마블가재 출현이 확인되었으며, 8월 조사에서는 남산야외식물원 내 인공하천을 조사하였으나 마블가재의 서식은 확인되지 않았다. 본 지점에서 마블가재의 자연적인 유입은 불가능하다고 판단되며, 애완동물로 키우던 개체가 인위적으로 방생되어 서식하는 것으로 보인다.

죽당천은 이천시 부발읍에 위치한 평지형 하천으로, 하천을 따라서 논과 밭이 형성되어 있다. 죽당천은 상류에서 방류되는 온배수를 수원으로 하고 있어 1년 내내 안정적으로 높은 수온을 유지하고 있다. 이로 인해, 애완목적으로 사육되다 방류된 열대성 외래 어류들의 월동이 가능하여 ‘구피천’이라고 불린다. 또한, 죽당천 상류 주변에 민물 열대어를 취급하는 수족관이 있어 유출수 등 확인이 필요한 지역이다. 본 연구에서는 죽당천의 상류 3회, 중류 1회를 조사하였으며, 상류 조사에서 8개체의 마블가재 출현이 확인되었다. 2월 조사에서 총 5개체가

채집되었고, 그중 포란된 1개체가 확인되었다. 3월 조사에서는 1개체가 포획되었으며, 5월 조사에서 2개체가 추가로 포획되었다.

부산 평화공원은 부산 남구 대연동에 위치한 공원으로, UN 기념공원 인근에 있어 주변 시민들의 산책에 이용되고 있다. 본 연구에서는 평화공원 내 인공하천에서 3회, 연못에서 1회의 조사를 진행하였으며, 총 4회의 조사에서 인공하천에서 13개체, 연못에서 1개체로 총 14개체의 마블가재가 확인되었다.

부산시민공원은 부산 진구 범전동에 위치한 공원으로, 공원 조성 면적은 473,911m²에 이르며, 공원에 조성된 연못과 인공하천을 포함한 면적은 22,374m²로 규모가 다른 대상지에 비해 큰 공원이다. 본 연구에서는 시민공원 내 3곳의 연못과 인공하천에서 4회의 조사를 진행하였다. 마블가재는 서측 연못에서는 출현하지 않았으며, 동측 인공하천에서는 4회 모두 출현하였다. 총 49개체가 확인되어 조사 지점 중 가장 많은 마블가재가 확인되었다. 이는 인공하천이 지속적으로 충분한 유량과 더불어 다양한 먹이원이 공급되고 있으며, 지리적으로 남쪽에 위치하여 수온 또한 높게 유지되는 등 마블가재가 서식하는데 적합한 지역으로 판단된다. 야간 조사에서는 육안으로 100개체 이상이 확인되었고, 5cm 이하의 치가재들 또한 상당수 존재하였으므로, 지속적으로 세대 교체가 이루어지고 있음을 확인하였다.

나) eDNA 조사 결과 마블가재 유전자 검출 현황

서울, 부산 경기 총 14개 지점에서 시료를 채수하였으며, 서울 2개 지점 및 부산 1개 지점에서 마블가재의 DNA가 검출되었다(표 21). 서울에서 마블가재가 검출된 지점은 남산골 한옥마을과 장충단공원으로 2022년 마블가재가 확인되었던 남산 야외식물원 반경 2km이내에 위치하고 있다. 남산골 한옥마을은 연간 150만 명의 내외국인이 방문하는 것으로 알려져 있으며, 장충단공원 도심형 공원으로 인근에 대학교와 교통시설이 밀집되어 있어, 유동인구가 많은 지점이다. 부산 성지곡수원지 역시 부산대공원 옆에 위치하고 있으며, 연간 400만명이 찾는 부산의 인기명소이다. 특히, 남산골 한옥마을과 장충단공원은 수심이 낮으며, 물가까지의 접근이 매우 용이하고, 청계천과 매우 근접해 있어, 향후 인근지역으로 확산할 가능성이 높을 것으로 판단된다(표 21).

표 21. 마블가재 채수지점 및 분석 결과

지역	채수지점	주소	채수일	실험 결과
서울	남산골 한옥마을	서울시 중구 퇴계로 필동2가 84-1	24.7.23.	검출
	장충단공원	서울시 중구 장충동2가 197	24.7.23.	검출
	서울숲	서울시 성동구 성수동1가 685-20	24.9.11.	
	용산가족공원	서울시 용산구 용산동6가 168-6	24.9.11.	
	청계천	서울시 종로구 창신동	24.9.11.	
	효창공원	서울시 용산구 효창동	24.9.11.	
부산	성지곡수원지	부산시 부산진구 초읍동	24.8.27.	검출
	동의대학교	부산시 부산진구 엄광로 176	24.8.27.	
	오륙도 해맞이공원	부산시 남구 용호동 950-1	24.8.27.	
	온천천	부산시 금정구, 동래구, 연제구	24.8.27.	
경기	이천 설봉저수지	경기도 이천시 관고동	24.9.10.	
	이천 안흥지	경기도 이천시 안흥동 404-3	24.9.10.	
	이천 환경테마공원	경기도 이천시 갈산동	24.9.10.	
	이천 복하천	경기도 이천시 진리동	24.9.10.	

다) 분자유전학적 연구를 통한 계통 확인

2024년 수족관에서 구입한 마블가재 17개체와 죽당천 및 부산시민공원에서 채집된 8개체는 모두 마블가재로 확인되었다. 총 25개체에서 획득한 CO I 염기서열 559bp를 NCBI에서 획득한 77개의 *P. fallax*와 *P. virginalis*와 함께 유전적 다양성을 확인한 결과 3개의 단상형(haplotype)을 확인하였으며, 다양성값은 0.187로 확인되었다. 또한 nucleotide diversity는 0.00113로 나타났다(그림 44). 전 세계에 분포하는 마블가재는 동일한 유전자형을 갖으며, 국내에서 수집된 25개체의 또한 유전적 다양성은 없었으며, *P. fallax*와 *P. virginalis*와 같은 것으로 나타났다. 마블가재는 단성생식을 하는 종으로 단성생식 중에서도 2배체 단성생식-무포자생식(apomixis)을 하기 때문에 자손이 부모의 완전한 클론이 된다.

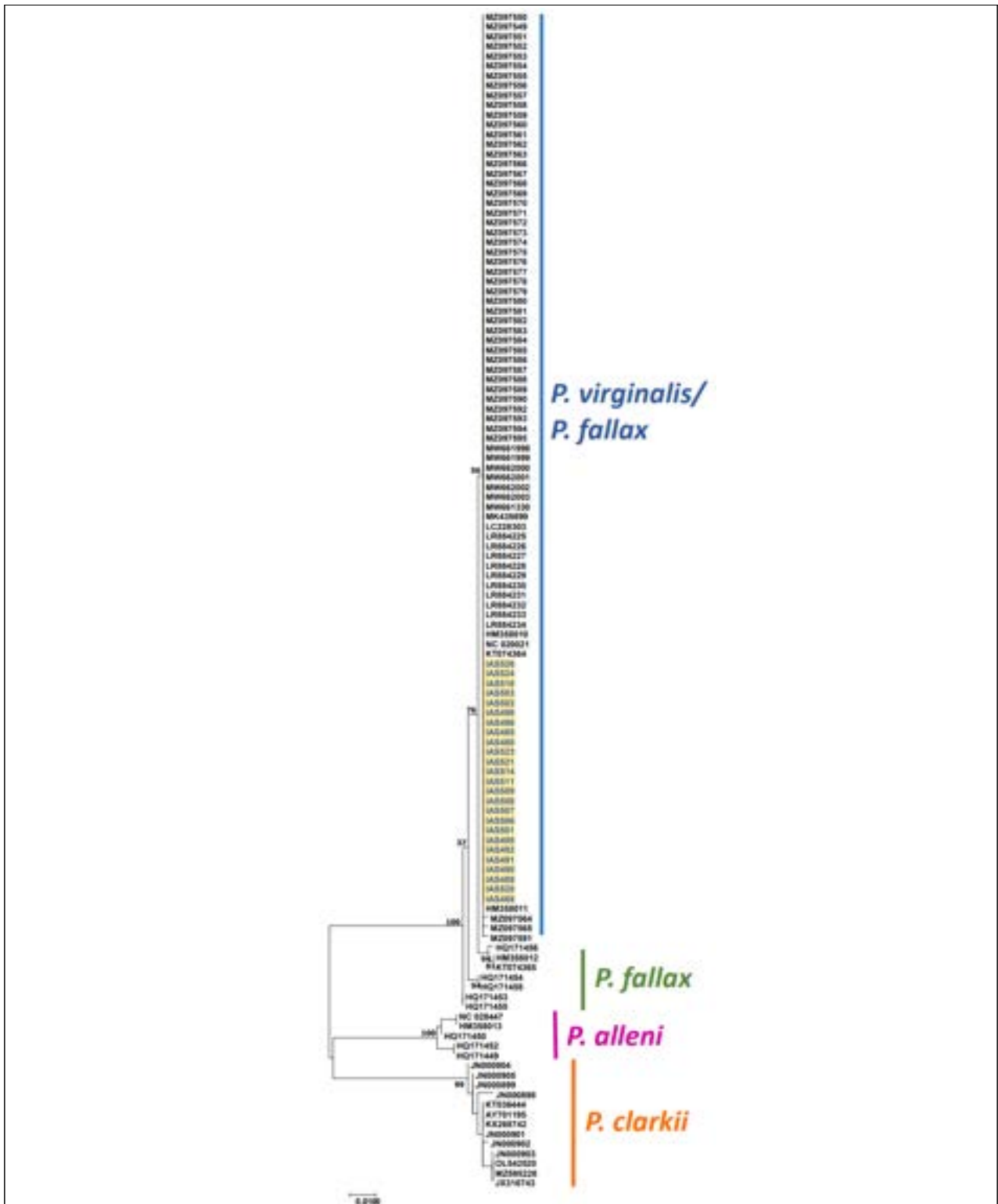


그림 44. 죽당천 및 부산 시민공원에서 채집한 마블가재 25개체와 *Procambarus* spp. 4종 95개체 CO I 유전자 559bp를 이용하여 작성한 ML tree.

6) 국외 분포지도

마다가스카르, 일본, 오스트리아, 독일, 이탈리아, 네덜란드, 스웨덴, 영국, 미국 플로리다 등(그림 45)



그림 45. 마블가재와 원종(*Procambarus fallax*) 전 세계 분포 및 발견시기

7) 서식 환경

마블가재의 원종으로 알려진 *P. fallax*는 미국 플로리다주 에버글레이즈 습지에서 서식하는 민물가재로, 잡식성으로 알려져 있다. 주로 수생 식물, 부유성 조류, 유기물, 작은 저서성무척추동물 등을 먹이로 한다. 서식지의 연간 수온은 15~28℃로 온화한 편이며, pH 6.5~7.5범위의 물을 선호한다. *P. fallax*는 기 수침기와 지속적인 침수 환경을 특징으로 하는 지역에서 높은 상대적 풍부도를 보여, 물이 마르지 않는 서식지를 선호한다(VanArman, 2011).

마블가재가 지속적으로 출현하는 대상지인 서울 남산 야외식물원, 이천 죽당천, 부산 평화공원과 부산 시민공원의 서식환경을 조사한 결과 수온은 서울 16.8~31.8℃, 이천 24.3~30.9℃, 부산 19.3~29.4℃의 분포를 확인하였다. 이는 15~28℃에 서식하는 마블가재의 서식 온도에 부합하는 것으로 조사되었다. 하지만 겨울 조사가 수행된 바 없어, 저온의 내성에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 수소이온농도 조사 결과 평균 pH는 7.8로 측정되었다. 지점에 따라 중성에서 약알카리(약 pH 7.3~8.6)에 수소이온농도를 나타냈다. 조사지 평균 용존산소량은 8.3 mg/L였으나 남산야외식물원은 2차 조사에서 평균 1.5 mg/L 매우 낮은 용존산소가 측정되었다. 이렇게 낮은 용존산소에서도 조사 기간 중에 확인된 마블가재

중에서 가장 크고 무거운 개체의 서식이 확인되어 용존산소량이 적은 환경에도 내성이 강한 것으로 판단된다. 용존산소량의 내성이 강한 만큼, 느린 유속을 선호하는 것으로 판단된다. 유속이 상대적으로 빨랐던 죽당천 중·하류, 복하천, 정평천 상류 등에서는 마블가재가 발견되지 않은 반면 유속이 거의 없는 호수나 연못, 인공하천 등에서 마블가재가 지속적으로 발견되었다(그림 46).

마블가재가 선호하는 하상구조는 주로 토사와 모래가 혼재되어 있으며, 자갈과 같은 조립질이 적절히 섞여 있어 은신할 수 있는 공간이 마련된 장소로 확인되었다. 또한, 수초가 넓게 분포하는 지역은 추가적인 은신처와 먹이 자원을 제공할 수 있으며, 동서 출현종인 새뱅이, 하루살이, 기타 저서성 대형무척추동물은 마블가재의 먹이원으로 작용할 가능성이 높을 것으로 판단하였다.

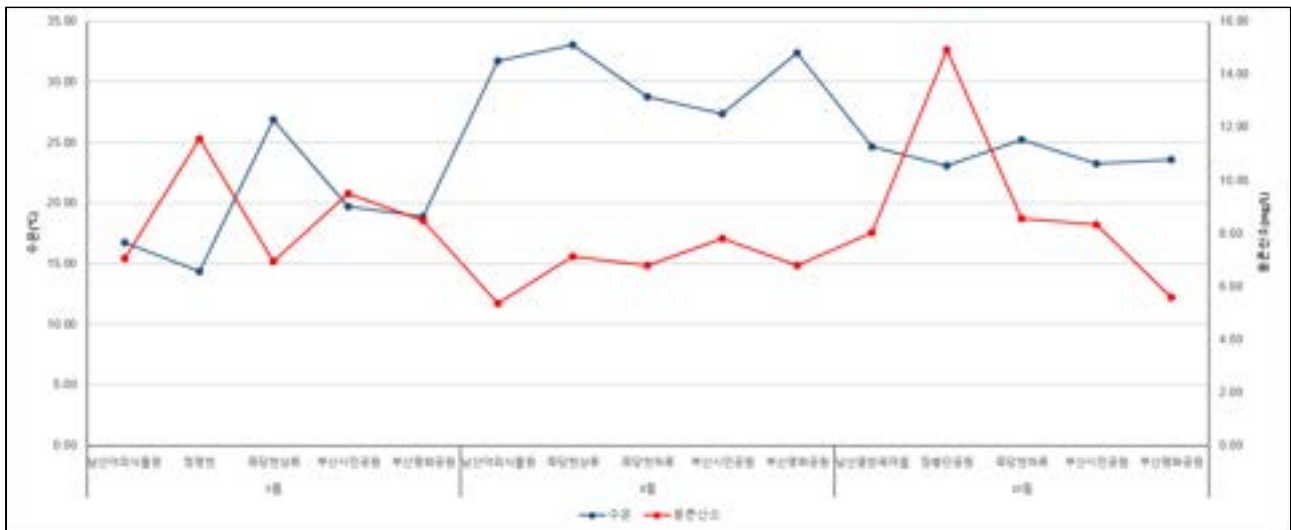


그림 46. 마블가재 계절별 서식처 내 수온·용존산소량 비교

8) 용도

마블가재는 주로 애완동물로 이용되며, 수족관, 온라인 매장 등에서 쉽게 구매, 사육할 수 있다.

9) 국내 규제 현황

마블가재는 2015년부터 위해우려종으로 지정·관리되고 있었으며, 2019년 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」의 개정에 따라, 제2조제6호의2에 의거 국내에 유입될 경우 생태계에 위해를 미칠 우려가 있는 유입주의 생물로 지정되었다.

10) 국외 규제 현황

마블가재는 유럽연합(EU), 일본, 호주 등 다양한 국가에서 규제 생물로 지정되었다. 유럽연합(EU)에서는 침입외래종의 도입 및 확산 방지와 관리에 관한 규정(Regulation on the prevention and management of the introduction and spread of invasive alien species)에 따라 EU 침입외래종 목록(Union List of Invasive Alien Species)에 마블가재를 포함시켰으며, 본 목록에 포함된 종은 수입, 판매, 번식, 방출, 운송 등을 금지한다.

일본에서는 환경청에서 특정 외래생물 피해 방지법에 따라 마블가재를 특정 외래생물(特定外來生物)로 지정하여 수입, 사육, 운반 등을 제한하고 있다.

호주에서는 Biosecurity Act 2015에 의거, 마블가재를 금지 대상 외래종(prohibited invasive species)으로 지정, 호주 농업수자원부(Department of Agriculture, Water and the Environment)에서 관리하고 있다(그림 47).

11) 형태 특성



그림 47. 마블가재 형태적 특성

마블가재는 이름처럼 대리석 색상의 패턴을 지니고 있으며, 가슴에서 꼬리까지 이어지는 등면에는 한 쌍의 검은 줄무늬가 존재한다. 이들의 체색은 황갈색에서 녹색으로 다양하게 나타나며, 이는 서식 환경 및 먹이의 pH에 따라 적절히 변화한다. 몸체 표면에는 작은 얼룩이나 점들이 분포하고 있으며, 이들은 주로 색상과 대조를 이루는 밝은 색조로 형성되어 가재의 몸통과 집게발에 퍼져 있다.

주둥이는 적당히 융기되어 있으며, 가장자리는 약간 두꺼워지고 삼각형 예각으

로 갈수록 점차 가늘어지며 중앙에는 융기선이 없다. 집게발은 갑각 길이의 약 2배 정도로 상대적으로 작으며, 길쭉한 형태를 띠고 있다. 가동지(움직이는 집게발)는 집게의 내측 가장자리보다 약간 길어, 집게의 등면은 미세하게 과립화되어 있다. 표면은 약간 거칠며, 미세한 돌기가 있어 가재가 먹이를 잡거나 방어하는 데 유리한 역할을 한다. 이러한 무늬와 색상은 마블가재가 다양한 서식 환경에서 효과적으로 위장하고 생존할 수 있도록 돕는다.

12) 생태 특성

마블가재는 원종인 *P. fallax*와 생태 특성을 공유하고 있다. *P. fallax*는 물이 마르지 않는 서식지를 선호하며, 물살이 느린 곳에서 주로 발견된다. 미국가재와는 다르게 굴은 거의 파지 않는 것으로 알려져 있으며, 물이 마르는 극한의 상황일 때만 굴을 판다. 잡식성으로 알려져 있어 주로 수생 식물, 부유성 조류, 유기물, 작은 저서성무척추동물 등을 먹이로 한다. 서식지의 연간 수온은 15~28℃로 온화한 편이며, pH 6.5~7.5범위의 물을 선호한다(VanArman, 2011).

다만, 마다가스카르에서 식용을 목적으로 포획·판매하는 사람으로부터 물이 전혀 없이 3일간 살아있는 채로 마블가재를 보관하였다는 청문 결과가 있었으며, 표면에 물이 전혀 없는 진흙 속에 깊이 묻혀있는 마블가재를 발견하기도 하는 등, 건조에 대한 내성이 알려진 것에 비해 강할 가능성도 배제할 수 없다(Jone *et al.*, 2009).

나. 유입 가능성

1) 국내 이용을 위하여 수입·반입될 가능성

마블가재는 2019년 유입주의 생물로 지정·관리되고 있어 사육, 이용 등의 목적으로 국내 수입·반입할 경우 환경부장관의 승인을 받아야 한다. 마블가재는 국내 시장도 이미 널리 퍼져있으므로, 국내 이용을 위해 상기 절차를 준용하여 추가적으로 수입하거나 반입할 가능성은 낮은 것으로 판단되었다.

2) 운송 수단과 화물 등에 혼입·부착되어 국내로 유입될 가능성

운송 수단과 화물 등에 혼입·부착되어 국내에 유입될 가능성은 낮은 것으로 판단되었다.

다. 정작 가능성

1) 기후 적합성

가) MaxEnt 분석

마블가재의 MaxEnt 모형 구축을 위해서 MaxEnt software 3.4.4를 활용하였다. 총 39개의 국내 자연생태계 마블가재 발견 지점 중 31개가 모형 학습 및 테스트 데이터로 사용되었다. 구축된 모형의 AUC 값은 0.990 ± 0.002 로 나타났으며 이는 모형의 신뢰성이 매우 높음을 보여준다. 모형이 학습될 때 예측력에 기여를 많이 한 변수는 HII, D.W, bio3 등의 순이었으며, 각각의 변수를 제외했을 때 모형의 정확도에 영향을 크게 미치는 중요한 변수는 HII, bio14, W.T 등의 순이었다. 기여도와 중요도 모두 높게 나온 환경인자는 인간영향지수(HII)였다(그림 48, 표 22).

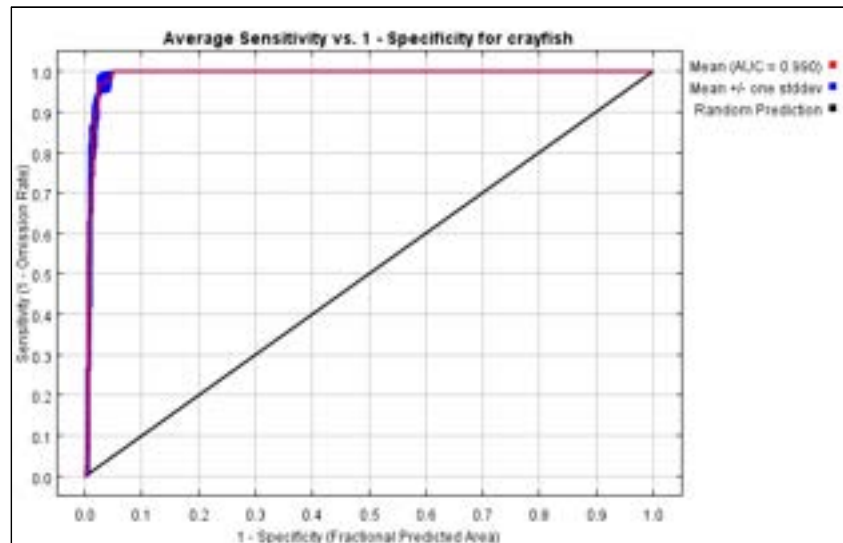


그림 48. 마블가재 MaxEnt 모형의 ROC 커브

표 22. 마블가재 MaxEnt 모형의 환경변수들에 대한 기여도 및 중요도

환경변수		기여도	중요도
HII	인간영향지수	69.3	47.2
D.W	수계로부터 거리	10.2	1.2
bio3	등온성	9.8	1.5
W.T	최한월의 수온	4.7	7.1
bio14	가장 건조한 달의 강수량	2.5	33.4
bio13	가장 습한 달의 강수량	2.3	4.2
bio12	연간 강수량	0.7	4.3
bio4	온도 계절성	0.4	1
bio1	연평균 기온	0	0.1

나) 마블가재의 유입 및 정착에 영향을 미치는 환경요인

MaxEnt 모형의 변수기여도/중요도와 응답곡선에 따르면, 마블가재는 인위적 요인 및 환경요인으로 인구밀도와 접근성이 높고 수계로부터 거리가 가까울수록 유입 및 정착할 가능성이 높다고 가정하였다. 생물기후 및 환경요인으로서는 일교차가 크지 않고 최한월의 수온이 약 5.4°C 이상인 지역에서 유입 및 정착할 가능성이 높다고 가정하였다(그림 49).

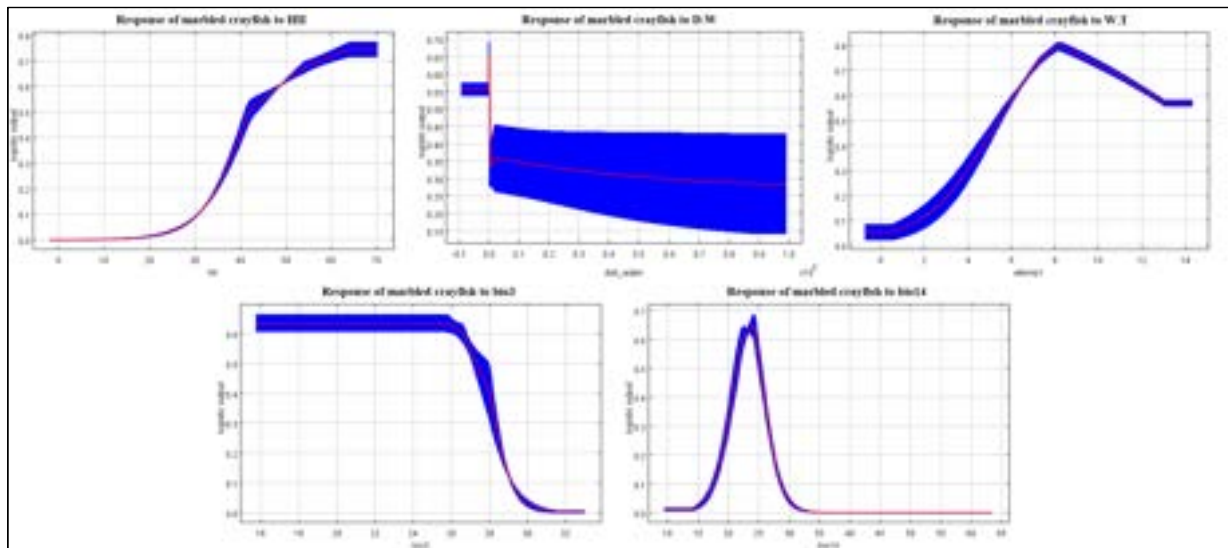


그림 49. 마블가재 MaxEnt 모형의 응답곡선(HII, D.W, W.T, bio3, bio14)

다) 마블가재 잠재적인 유입 및 정착 가능성

현재 대한민국의 마블가재 서식지 적합성 지수는 최소 0.001, 최대 0.925, 평균 0.100 ± 0.16 로 북부권(서울/경기도)과 남부권(부산/여수 등)을 중심으로 높게 나타났다. 서식지 적합성 지수는 4등급(0.75~1 1등급, 0.5~0.75 2등급, 0.25~0.5 3등급, 0~0.25 4등급)으로 분류하였으며, 2등급 이상(0.5 이상)을 유입 및 정착 가능성이 높은 지역으로 평가하였다. 유입 및 정착 가능성이 높은 지역의 면적은 총 4,650 km²로 산출되었다(그림 50).

대한민국의 17개 시도 지역별 유입 및 정착 가능성이 높은 지역의 면적을 산출하여 비교하였다. 경기도(1등급 473km², 2등급 1,580.7km²), 경상남도(1등급 34.2km², 2등급 638.6km²), 서울(1등급 125.3km², 2등급 404.5km²), 전라남도(1등급 113.3km², 2등급 338km²), 부산(1등급 174.4km², 2등급 264.9km²) 등의 순으로 면적이 넓게 분포하였다(그림 51).

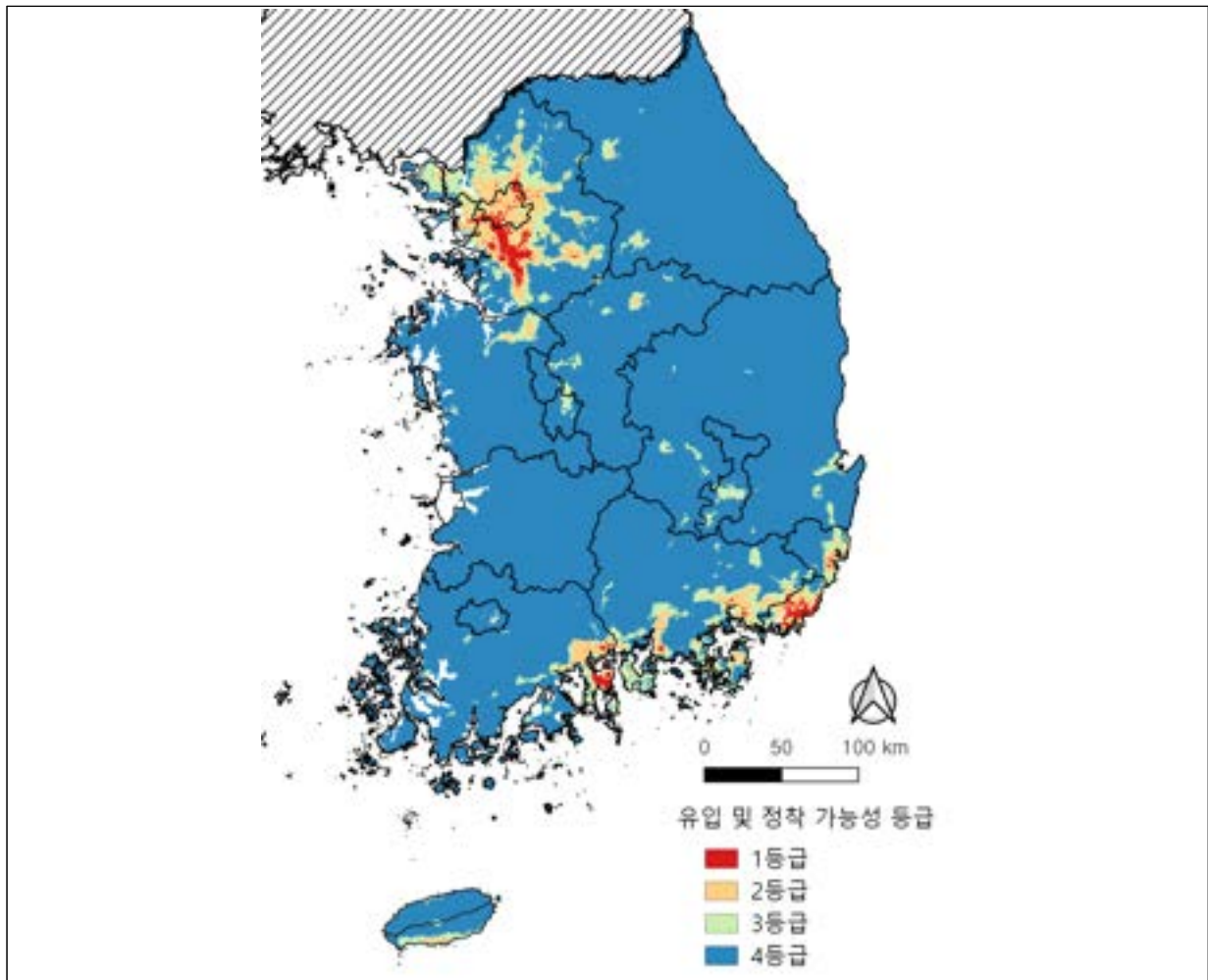


그림 50. MaxEnt를 활용한 마블가재의 잠재적인 유입 및 정착 가능성 예측



그림 51. 행정구역별 마블가재의 유입 및 정착 가능성이 높은 지역의 면적

라. 확산 가능성

1) 번식력

마블가재는 전 세계 갑각류 중 유일하게 단위생식이 가능한 생물로, 생태계 내에 정착이 가능할 경우, 단 한 마리만 유입되어도 번식이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 매력적인 외형으로 인해, 가재를 사육하고자 하는 사람들에게 쉽게 입문할 수 있는 생물이지만, 수컷, 짝짓기 등 일련의 과정 없이 산란하므로, 마블가재를 사육하는 사람들은 늘어나는 마블가재 치가재를 처리할 방안을 찾게 되며, 그로 인해 강이나 호수, 하천 등에 방류할 가능성이 높아진다(Souty-Grosset *et al.*, 2006)

마블가재는 수온이 15~26°C 내외에서 산란, 번식한다. 여러 연구에서 수온과 성장속도, 산란 등이 밀접하게 연관되어 있음이 밝혀졌으며, 25°C에서 사육될 경우 141일~255일 내에 성숙한다. 마블가재는 산란시 최대 525개의 알을 생산할 수 있다. 부화기간 또한 22일에서 42일까지 범주가 다양했다(Seitz *et al.*, 2005; Jones *et al.*, 2009; Chicholl and Pfeiffer, 2010). 2022년 외래생물 정밀조사 결과에서도 마찬가지로 수온 22~24°C에서 사육하고 있던 마블가재가 포란, 191개체가 부화한 것을 확인하였으며, 본 연구에서도 2023년 12월 죽당천에서 포획한 마블가재를 사육하던 중 수온 17°C에 포란하였고('24.2.14.), 수온 범위 17~20°C 사이에서 58일 후 치가재가 부화('24.4.12.)하는 것을 확인하였다.

사육 환경 뿐만 아니라, 자연생태계에서 역시 마찬가지로 포란중인 마블가재를 포획하였다. 이천 죽당천 2월 조사 과정에서 총 5개체가 포획되었는데, 그중 1개체가 포란한 것이 확인하였다. 다만, 포획 과정에서 마블가재가 위협을 느껴 알, 치가재 등을 방사하여 20개체 미만의 유체만이 채집되었다. 또한, 부산 시민공원 조사에서 치가재부터 성체 가재까지 모든 생애 주기의 마블가재를 확인할 수 있었는데, 이를 통해 마블가재가 인위적인 방사로 인해 개체군이 유지되는 것이 아닌 번식과 성장하는 등 국내 생태계에 정착했음을 알 수 있다(그림 52).



그림 52. 자연생태계에서 포란 중인 마블가재(좌) 및 생애주기별로 포획된 마블가재(치가재-성체)(우)

2) 분산 능력

마블가재의 분산 능력은 수계를 통해 자연적으로 확산되는 것 이외에는 다소 제한적일 것으로 추정된다. 하지만 Privenau (2010)에 따르면 독일의 한 호수에서 육지로 이동하는 것을 확인하였으므로, 육로를 통해 확산할 가능성도 염두할 필요성이 있다. 또한, 동속(Genus)의 유사종인 미국가재(*P. clarkii*)의 경우 수조류를 매개로 확산할 가능성이 있다는 연구가 알려져 있다(Ferreira *et al.*, 2010). 마블가재의 경우 생태특성이 유사하고, 미국가재와 달리 단성생식이 가능한 생물이므로 수조류 매개 확산 가능성은 미국가재보다 높을 것으로 판단된다.

국내에서 마블가재의 출현이 확인된 지점 중 죽당천은 상류부에서만 발견되었으나, 하류부에 복하천으로 유입되며, 이는 추후 한강으로 연결되어 있다. 죽당천 중류, 하류, 복하천과 연결부에서 통발 조사, 현장 조사를 병행하였으나, 마블가재는 발견되지 않았다. 다만, 죽당천 상류부에서 마블가재가 지속적으로 발견되므로, 추후 자연확산될 가능성이 높으며 보와 같은 물리적 제약이 없을 경우 상류에서 하류까지 원활하게 이동할 수 있을 것으로 판단된다.

마블가재는 영역성을 가지고 있으므로, 새롭게 태어난 가재들은 기존 영역에서 밀려나 자연스럽게 새로운 서식처로 이동할 수 밖에 없다. 이러한 생태적 특성은 부산 시민공원, 평화공원 등 닫힌 수계에서는 문제되지 않을 수 있지만, 죽당천, 정평천 등 열린 수계에서 서식하고 있는 마블가재의 경우 향후 다른 지역으로 확산할 수 있는 가능성을 염두해야 한다.

3) 사육·재배 환경으로부터 탈출·일출하거나, 사육·재배 환경 밖에 유기될 가능성
마블가재의 매력적인 외형으로 인해 가재를 사육하고자 하는 사람들에게 쉽게
입문할 수 있는 생물이다. 마블가재는 지구상 유일한 단성생식으로 세대를 지속
하는 갑각류로, 수컷, 짝짓기 등 일련의 과정 없이 산란이 가능하여 사육 조건만
적절히 갖추고 관리한다면 마블가재의 개체수 증가를 막을 수 없다. 이로 인해,
마블가재를 사육하는 사람들은 늘어나는 마블가재 치가재를 처리할 방안을 찾게
되며, 그 방법 중 하나로 하수도를 통해 배출하거나, 강이나 호수, 하천 등에 방
류할 가능성이 높아진다(Souty-Grosset *et al.*, 2006)

현재까지 국내 생태계에서 포획되는 마블가재는 모두 상기 설명한대로 비슷한
과정으로 유입되었을 것으로 추정되며, 실제로 마블가재가 발견되는 장소는 대
부분 사람의 이용이 매우 높다는 입지적 특성을 갖추고 있다. 분포모델링 환경
변수 중요도 역시 사람영향지수(HI)가 가장 높게 나오는 것을 미루어 봤을 때,
사육·재배 환경으로부터 탈출·일출하거나, 사육·재배 환경 밖에 유기될 가능성은 높
을 것으로 판단되었다.

4) 운송 수단과 화물 등에 혼입 부착되어 국내에서 분포가 확대될 가능성
운송 수단과 화물 등에 혼입 부착되어 국내에서 분포가 확대될 가능성은 낮다.

마. 생태계 및 사회·경제·질병에 대한 영향

1) 초식, 포식, 기생, 독성 및 타감 작용의 영향

마블가재는 잡식성 생물로서 수생 식물, 부유성 조류, 작은 치어, 저서성 대형 무
척추동물 등 다양한 먹이원을 섭취하여 먹이사슬 중간 단계에 위치하는 생태적 지
위를 가지고 있다. 마다가스카르 내 하천에서 채집한 마블가재의 식물 분석 결과
마블가재는 주로 식물성 물질을 섭취하는 것으로 확인되었다(Kawai *et al.*, 2009).

2) 경쟁의 영향

부산시민공원의 높은 밀도로 미루어 봤을 때, 마블가재의 개체수가 증가하면 먹이
와 서식지를 두고 토착종과 경쟁할 가능성이 높으며, 강한 번식력과 적응력으로 인
해 국내 생물의 서식지를 잠식하거나 먹이 자원을 독점할 위험성을 가지고 있다.

마블가재가 발견된 지점에는 마블가재를 포식할 수 있는 중형 이상의 육식 어
류, 자라, 거북류, 조류 등이 존재하지만, 마블가재보다 더 쉬운 먹잇감을 선호할
가능성이 높다. 그러므로 국내 포식자들이 마블가재의 개체 수 조절에 미치는

영향은 불확실하다. 특히, 마블가재가 국내 환경에 적응하여 경쟁력을 가지게 될 경우, 토착 생물들의 생존에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

이러한 경쟁과 포식 관계는 생태계의 복잡성을 더하며, 마블가재가 기존 생태계 내에서 어떤 영향을 미칠 것인지에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다. 따라서, 마블가재의 생태적 역할과 경쟁적 지위를 파악하기 위해 다양한 연구와 조사가 요구된다. 또한, 마블가재가 생태계 미치는 영향력을 파악하기 위해서 장기 모니터링이 필요하다(그림 53, 54).

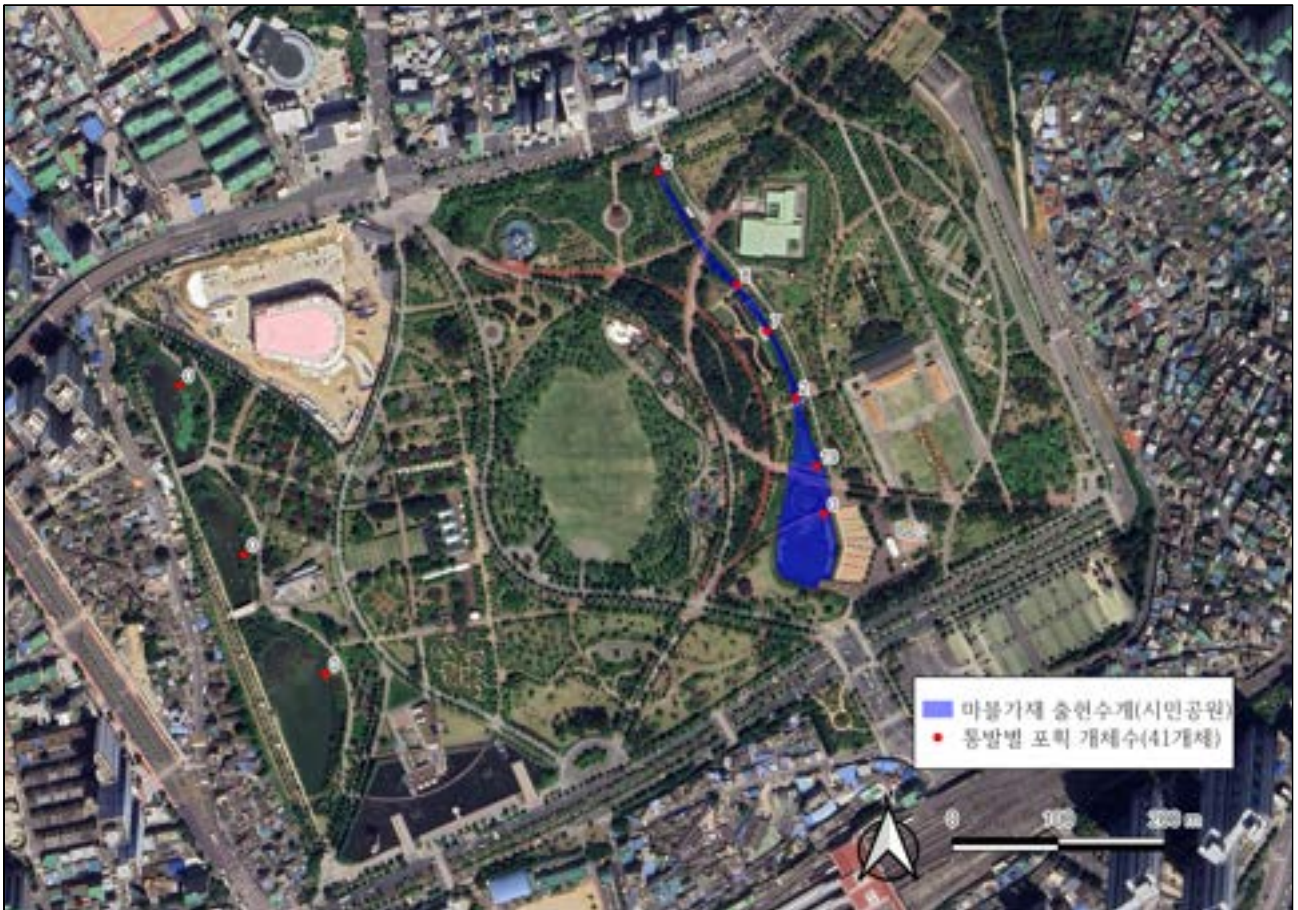


그림 53. 부산 시민공원 내 통발 위치별 마블가재 포획 현황



그림 54. 높은 밀도와 개체수로 출현하는 마블가재(부산 시민공원)

3) 병해충 전파의 영향

표 23. *Aphanomyces astaci*와 Distoma 검출을 위해 사용된 샘플정보

채집지역	<i>A. astaci</i>		Distoma	
	개체수	결과	개체수	결과
(수족관)조이하우스_서울시 강남구 개포동 개포로7	2	x	2	x
(수족관)니모수족관_경상북도 경산시 백암로 35번길 13	2	x	2	x
(수족관)365수족관_인천시 남동구 간석동 389-19	2	x	-	-
(수족관)하뚜니연못_강원도 원주시 판부면 오성마을길 63-25	2	x	2	x
(현장)부산 평화공원_부산시 남구 대연동 707	2	x	-	-
(현장)부산 시민공원_부산시 남구 대연동	2	x	2	IAS521 <i>Vejdovskyella comata</i>

가) 가재곰팡이병(*Aphanomyces astaci*) 감염 여부 확인

가재곰팡이병 감염여부를 확인하기 위해, 수족관 4곳과 자연서식지 2지점, 총 12개체를 대상으로 실험을 수행하였으며, 확인 결과 가재곰팡이병은 검출되지 않았다(표 23).

나) 간 디스토마 감염 여부 확인



그림 55. *Vejdovskyella comata*의 형태 및 분포 현황

(출처: <https://www.gbif.org/species/2308031>)

마블가재에서 Distoma를 검출하기 위해, 수족관 3곳과 자연서식지 1지점에서 총 8개체를 대상으로 실험을 수행하였으며, 확인 결과 부산 시민공원에서 채집된 1개체에서 *Vejdovskyella comata*가 검출되었으며, 간디스토마를 유발할 수 있는 *Clonorchis sinensis*는 확인되지 않았다(표 23, 그림 55). *Vejdovskyella comata*는 naididae에 속하는 환형동물이다. Naididae는 전 세계에서 흔히 볼 수 있는 작고 섬세하며 거의 투명한 환형동물문으로, 민물에 서식하지만 일부 종은 기수 서식지에 적응하기도 한다. *Vejdovskyella comata*는 퇴적물 입자와 저서성 규조류를 섭식하는 것으로 알려져 있으며, 주로 유럽에서 발견되며, 국내에는 아직 보고된 바 없다.

본 연구에서 업체 및 자연생태계에서 채집된 마블가재를 대상으로 가재곰팡

이병 및 Distoma를 검출한 결과 인간 및 동소종에 영향을 미칠 수 있는 병원성 질병은 확인하지 못하였으나, 부산 시민공원 및 평화공원은 새뱅이, 줄새우 등 저서성대형무척추동물이 다수 서식하고 있는 지점으로 향후 지속적인 질병 모니터링이 필요할 것으로 판단된다(표 24).

표 24. 부산 시민공원 및 평화공원의 저서성대형무척추동물 동소종 목록

국명	학명	부산 시민공원	부산 평화공원
왕우렁이	<i>Pomacea canaliculata</i>	2	0
다슬기	<i>Semisulcospira libertina</i>	0	3
주름다슬기	<i>Semisulcospira forticosta</i>	0	1
실지렁이	<i>Limnodrilus gotoi</i>	0	4
새뱅이	<i>Neocaridina denticulata denticulata</i>	146	47
줄새우	<i>Palaemon paucidens</i>	600	276
개똥하루살이	<i>Baetis fuscatus</i>	0	2
연못하루살이	<i>Cloeon dipterum</i>	19	38
등검은실잠자리	<i>Paracercion calamorum</i>	0	13
아시아실잠자리	<i>Ischnura asiatica</i>	0	8
갈따구류 sp.	Chironomidae sp.	5	13
갈따구류 sp. A	Chironomidae sp. A	0	4

4) 교잡의 영향

마블가재는 단성생식 갑각류로 국내 출현한 마블가재 역시 유전자는 모두 동일하였으며 암컷만 존재하였다. 따라서, 국내 가재와 교잡될 가능성은 매우 낮아 교잡의 영향은 없는 것으로 판단된다.

5) 주요 생물다양성 보호구역에 대한 영향

2024년 정밀조사 결과 확인된 마블가재 주요 서식지 중 남산 야외식물원은 남산 생태경관보전지역과 불과 10m 내외로 이격된 장소이다. 또한, 남산 생태경관보전지역에서 유래한 계곡이 마블가재가 서식하고 있는 연못의 수원으로 확인되었으므로, 온도와 환경조건이 마블가재의 생존과 적합하다면, 수계를 통해 확산할 수 있다. 본 대상지에는 마블가재 뿐만 아니라 토종 가재류도 공존하므로, 마

불가재 유래 전염병으로 알려진 가재곰팡이병 등을 매개한 가재가 유입될 경우 남산 생태경관지역 내 가재류에게 상당한 피해를 유발할 수 있다. 또한, 남산 생태경관보전지역 반경 500m 이내에 위치한 남산골 한옥마을, 1,000m 이내에 위치한 장충단 공원 내 수계에서도 마블가재의 DNA가 추출되어, 이에 대한 조사가 필요한 상황이다(그림 56).

남산이 생태경관보전지역으로 지정된 사유에 수리적 가치가 있지 않아 마블가재로 인해 생태경관보전지역에서 해지될 가능성은 매우 낮다. 하지만, 서울에서 지정된 다른 생태경관보전지역, 북한산 국립공원과 같이 역시 시민들의 이용률이 매우 높은 입지적 특성을 지닌 생물다양성 보호구역 역시 남산 생태경관보전지역의 사례와 마찬가지로 마블가재가 침입할 가능성이 높아 주의가 필요하다.

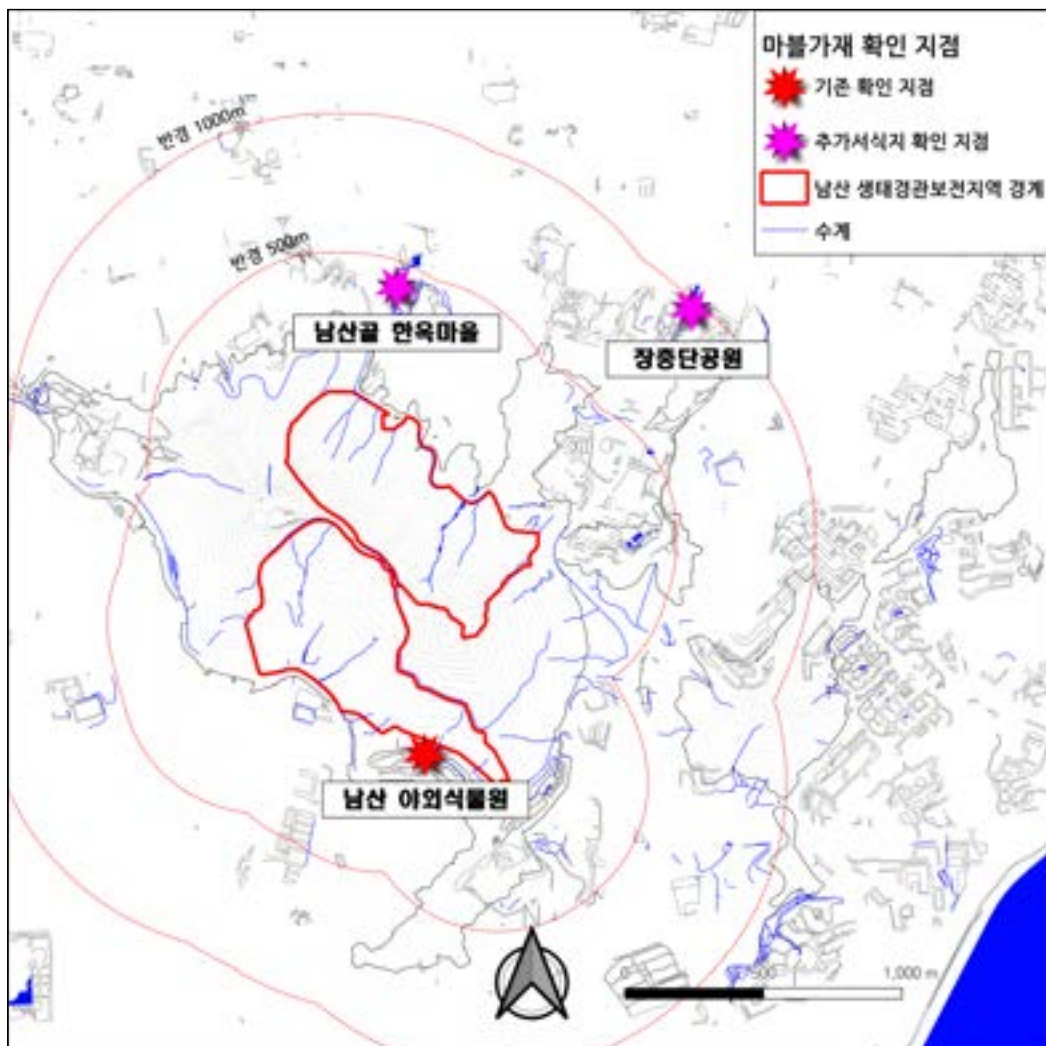


그림 56. 남산 생태경관보전지역 주변 마블가재 서식지(직접조사, eDNA 조사)

6) 먹이그물, 천이, 수분, 산포 등 생태계 생물요소에 대한 영향

마블가재는 단위생식을 통해 서식환경이 적합할 경우 빠르게 번식이 가능하다. 마블가재는 대개 식물성 먹이원을 섭취한다고 알려져 있지만, 소형 저서무척추동물, 어류의 알 등 육식성 먹이원 또한 섭취가 가능하므로 토착 수생 생물들과 먹이 경쟁이 발생할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 확인된 바 없으나, 해외에서는 가재곰팡이병을 매개할 수 있다고 알려져 있다. 국내 생태계에 가재곰팡이병이 감염된 마블가재가 유입될 경우, 국내 갑각류들에게 치명적인 영향을 끼칠 수 있다.

7) 영양염류 순환, 수질, 토양 침식 및 퇴적 등 생태계 비생물요소에 대한 영향

마블가재로 인한 영양염류 순환, 토양침식, 퇴적 활동 등 비생물적요소에 대해 미치는 영향은 미미할 것으로 추정된다. 마블가재는 농지의 관개 시스템에 피해를 주는 해충으로 인식하고 있으며 농지의 토양 침식을 일으킬 수 있다.

8) 농림축수산업에 대한 영향

마다가스카르 연구 결과 마블가재는 주로 식물성 먹이를 선호하는 것으로 알려져 있다. 또한, 마블가재와 근연종(*Procambarus* 속 가재류)는 어린 벼와 관개 시스템에 피해를 끼쳐 다른 국가에서는 마블가재를 농업 해충으로 관리되고 있다.(Anastacio *et al.*, 1995; Souty-Grosset *et al.*, 2006). 따라서, 마블가재가 확산될 경우 국내 벼 생산에 부정적 영향을 미칠 가능성이 있다.

9) 사회기반시설(교통시설, 하천, 부두, 댐, 건물 등), 경관 및 문화적 가치 등에 대한 영향

마블가재 역시 미국가재와 마찬가지로 굴을 파는 습성이 있어, 논둑이나 제방에 손상을 일으켜 홍수시 붕괴할 위험성이 높다. 영양염류 순환, 토양침식, 퇴적 활동 등 비생물적요소에 대해 미치는 영향은 미미할 것으로 추정된다.

10) 인체 건강에 대한 영향(독성, 알레르기성, 질병 및 기생충 전파, 상해 등)

민물 갑각류를 날것으로 섭취할 경우 간 디스토마(폐흡충)에 걸릴 수 있으며, 마블가재 또한 예외가 아니다. 본 연구에서는 마블가재의 간디스토마 기생 여부를 확인하였으나, 탐지되지 않았다. 다만, 일반적으로 가재는 폐흡충의 중간숙주로 작용할 수 있으므로, 마블가재 역시 중간숙주로 작용할 가능성이 있다.

IV. 결론 및 제언

1. 노랑알락하늘소

노랑알락하늘소는 중국 남부, 베트남, 라오스, 대만 등 동아시아 아열대 지역을 원산으로 하는 알락하늘소(*Anoplophora*)속 하늘소이다. 국내에는 2019년부터 발견 기록이 확인되고 있으며, 최소 2015년 이전에 유입된 것으로 추정된다. 노랑알락하늘소는 현재까지 제주도 제주시 용연계곡 반경 4km 이내에서만 발견되고 있으며 주로 팽나무를 가해하는 것으로 알려져 있다. 연구 결과 2023년에는 용연계곡으로부터 2.2km 거리의 해태동산까지 팽나무 탈출공이 발견되었으며, 2024년에는 용연계곡으로부터 4.0km 거리의 제주서중학교에서 발견되어 1년 사이에 최대 1.8km의 분포 범위가 확장되었다.

노랑알락하늘소의 밀도가 가장 높은 용연계곡 하류부를 거점출현지로 선정, 노랑알락하늘소의 선호 서식지 조사 결과 생태계유형보다는 기주식물인 팽나무의 분포 여부가 노랑알락하늘소의 서식지 적합도에서 더욱 중요한 요인이었으며, 팽나무 외, 천선과나무, 좁은잎천선과나무에서 각각 1개씩 발견되었다. 식이물 분석 결과 총 11속의 식물을 섭취하는 것으로 확인되었으며, 그중 높은 비율로 천선과나무와 좁은잎천선과나무에 해당하는 무화과나무속이 확인되었다.

노랑알락하늘소의 주요 기주식물인 팽나무는 제주도 내 보호수로 99그루가 등록·관리되고 있으며, 천연보호구역인 제주 성읍리 느티나무 및 팽나무 군락, 기타 산림보호구역 등에서 가치를 인정받아 보존, 관리되고 있다. 따라서, 노랑알락하늘소가 제주도 전역으로 확산할 경우, 이에 대한 피해가 우려된다. 이뿐만 아니라, 해외 문헌에서 팽나무 외 굴나무, 차나무 등 다양한 목본류를 가해할 수 있다고 알려져 있으므로, 국내 차 생산의 40%를 담당하며 매년 40만톤 내외의 감귤을 생산하고 있는 제주도에 확산할 경우 국내 농가에 피해를 끼칠 가능성이 높다.

노랑알락하늘소는 외형이 독특하고 아름다워, 곤충 애호가들 사이에서 관심이 높으며, 실제로 표본의 형태로 인터넷상에서 거래, 교환되고 있다. 이는 노랑알락하늘소가 내륙으로 유입될 가능성을 제공할 수 있으며, 노랑알락하늘소의 서식지가 제주항과 인접하여 컨테이너 등 이동 과정에서 비의도적으로 내륙에 진입할 수 있는 등, 내륙으로의 확산 또한 우려스러운 상황이다. 노랑알락하늘소와 유사종인 유리알락하늘소는 세계 100대 외래생물로 지정되어 전 세계적으로 관리되고 있으며, 기주식물을 별채하는 방법만이 유일한 근절 방법이었다. 따라서, 노랑알락하늘소의 방제가 필요시, 확산 범위가 한정적인 초기 유입단계에서 근절할 필요가 있다고 판단된다

2. 범무늬뽕족민달팽이

범무늬뽕족민달팽이는 영국, 프랑스, 독일, 노르웨이 등 유럽 지역을 원산으로 한 민달팽이로, 1870년대 이후 뉴질랜드 등 세계 여러 지역으로 농작물과 원예작물, 토양 등에 혼입되어 침입한 외래생물이다. 일본의 경우 2006년 삿포로에서 첫 발견 이후 2012년에는 100km 떨어진 곳에서 발견될 만큼 농산물 등의 혼입으로 빠르게 확산할 가능성이 높은 종이다. 국내에서 범무늬뽕족민달팽이는 수원 밤발청개구리공원과 안안골 인근 지역 반경 1km 이내에서만 확인되고 있으며, 밤발청개구리공원 내에서 1,000개체 이상 확인될 정도로 높은 밀도로 출현하고 있다. 선호하는 서식지는 산림 보다는 인간의 생활반경 내 위치한 농가, 공원 주변 폐기물 적재지로, 향후 인간활동으로 인해 비의도적으로 확산될 가능성이 높다. 범무늬뽕족민달팽이는 주로 균류, 떨어진 꽃잎, 과일, 동물의 배설물 등 생물의 사체나 유기물을 섭식하는 분해자로 알려져 있으나, 과실수, 밭작물 등에도 가해가 가능하여 일부 국가에서는 농업해충으로 분류하였다.

범무늬뽕족민달팽이를 비롯한 병안류(달팽이목)의 기생성 선충류는 전 세계적으로 보고되고 있으며, 호주에서는 범무늬뽕족민달팽이를 생식하여 뇌수막염에 감염되는 등 사례가 보고된 바 있다. 본 연구에서 선충류 조사 결과 뇌수막염을 일으키는 선충류는 발견되지 않았다.

범무늬뽕족민달팽이는 초기 방제를 제외하고는 방제가 거의 불가능하다고 알려진 생물이다. 현재까지 범무늬뽕족민달팽이의 분포 양상을 미루어 봤을 때, 현재는 도입 혹은 증식 단계로 보여진다. 따라서, 방제를 실시하고자 한다면 현재가 적기라고 판단되며, 지속적인 모니터링을 통해 확산 여부를 추적할 필요가 있을 것으로 사료된다.

3. 마블가재

마블가재는 독일의 애완동물 시장에서 확인된 단성생식 민물 가재로, 원 서식지는 알려진 바 없으나, 원종인 *Procambarus fallax*는 플로리다를 원 서식지로 하고 있다. 마블가재는 주로 식물성 먹이를 선호하나 동물성 먹이도 섭취가 가능하며, 단성생식으로 번식하는 생리적 특성으로 인해 환경이 적합하다면 단 1개체 만으로도 생태계 내 침입이 가능한 생물이다. 마다가스카르에서는 마블가재의 개체수가 너무나 증가한 탓에, 하천 내 먹이원을 독점하였고, 중국에는 하천 내 종 다양도에 영향을 준 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 국내에서는 마블가재를 2019년부터 유입주의 생물로 지정·관리되고 있으며 추가적인 수입이 발생할 가능성이 낮다. 하지만, 1990년대 중반부터 애완

동물 명목으로 수입·사육되어 현재까지 애완 가재로 유통되고 있으며, 번식 난이도가 낮은 탓에 국내에서는 이미 많은 개체수가 사육되고 있는 실정이다.

국내 생태계에서 마블가재가 발견되기 시작한 시점은 2021년으로, 부산 평화공원에서 1개체가 발견되었다. 유입주의 생물이 자연생태계에서 발견된 사례였으므로, 2022년 정밀조사를 실시하였으나 당시 발견된 장소는 오직 3개소 뿐이었다. 하지만 2024년 정밀조사 결과 마블가재는 총 7개소(4개소: 실개체 확인, 3개소: 유전자 확인)에서 발견되어 출몰지가 2022년 대비 2배 이상 확대되었다. 특히, 부산 시민공원에서는 높은 밀도로 출현하는 것이 확인되었으며 남산 생태경관보전지역과 불과 10여 미터 떨어진 남산 야외식물원 내 연못에서도 발견되어 생태경관보전지역 내 유입이 우려되는 상황이다.

마블가재의 질병 분석 결과 가재곰팡이병과 간 디스토마 모두 검출되지 않았으나, 수족관에서 주로 발견되는 환형동물류가 확인되어 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 이효혜미 외 25. (2021). 2021년 외래생물 전국 서식실태 조사 지침서. 국립생태원 외래생물연구팀. p. 8.
- 임종옥, 정수영, 임종수, 장진, 김경미, 이유미 and 이봉우. (2014). A Review of Host Plants of Cerambycidae (Coleoptera: Chrysomeloidea) with new Host Records for Fourteen Cerambycids, Including the Asian Longhorn Beetle (*Anoplophora glabripennis* Motschulsky), in Korea. 한국응용곤충학회지, 53(2), 111-133.
- 장현규, 이승현, 최웅. (2015). 하늘소 생태도감 한반도의 산과 들에서 찾아낸 하늘소 357종, 지오북, ISBN: 9788994242347
- 환경부. (2019). 외래생물 중장기 관리 계획 및 세부 이행방안 마련을 위한 연구. 세종: 환경부. pp. 323.
- 환경부. (2020). 야생동물 판매·개인소유 관리방안 마련 연구. 세종시. 대한민국
- 황상환. (2015). 한국의 하늘소(Long-horned beetles in Korea), 자연과생태, ISBN: 9788997429516
- Ali Turan and Veli Erdogan. (2022). Spread and Damage of Citrus Longhorned Beetle [*Anoplophora chinensis* (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae)] to Hazelnut Orchards in Turkey. Turkish Journal of Agriculture. 10(4):531-535.1)
- Barker, G. M. and McGhie, R. A.(1984) The biology of introduced slugs (Pulmonata) in New Zealand 1. Introduction and notes on *Limax maximus*. New Zealand Entomologist, 8(1), 106-111. <https://doi.org/10.1080/00779962.1984.9722482>
- Barševskis A, Cabras AA, Medina MN, Odango J, Susulan T, Rifqi DM, Hanifuddin AS, Kurnitami GT, Barševska Z, Lecka K. New data on the distribution of the genus *Anoplophora* Hope, 1839 (Coleoptera: Cerambycidae). (2022) Baltic J Coleopterol. 22:149-173.
- CABI Compendium 2022 DOI: 10.1079/cabicompendium.5557
- cabi, (2015), <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.1079/cabicompendium.30825>
- Chucholl C; Pfeiffer M. (2010). First evidence for an established Marmorkrebs (Decapoda, Astacida, Cambaridae) population in Southwestern Germany, in syntopic occurrence with *Orconectes limosus* (Rafinesque, 1817). Aquatic Invasions, 5(4):405-412. http://www.aquaticinvasions.net/2010/AI_2010_5_4_Chucholl_Pfeiffer.pdf
- Cowie, R.H. and Robinson, D.G.(2003) Pathways of introductions of nonindigenous land and freshwater snails and slugs. In: G.M. Ruiz & J.T. Carlton (eds), Invasive species: vectors and management strategies: 93-112. Island Press, Washington.
- Dominic Eyre and Jane Barbrook. (2021). The eradication of Asian longhorned beetle at Paddock Wood, UK. CABI Agriculture and Bioscience. 2(12).

- Dong-Soon Kim (2023) Invasive Pests and the Establishment in Jeju Area: *Anoplophora horsfieldi* true, *Bactrocera dorsalis* false. The Korean Society of Applied Entomology, 62(3): 213-214. DOI: <https://doi.org/10.5656/KSAE.2023.08.0.038>
- Elliott WT, (1922). Some observations on the mycophagous propensities of slugs. Transactions of the British Mycological Society, 8(1-2):84-90.
- Elton, C. S.(1958). The ecology of invasions by animals and plants. Methuen.
- EPPO (2024) EPPO Global Database. https://www.eppo.int/ACTIVITIES/plant_quarantine/alert_list_insects/anoplophora_horsfieldii [EPPO RS 2023/228]
- Esfa. 2021. *Anoplophora chinensis*. <https://storymaps.arcgis.com/stories/c2d0d8458061414583f26d8c3ddf52ac> (2024.11.08.)
- Faulkes, Z. (2010). The spread of the parthenogenetic marbled crayfish, *Marmorkrebs* (*Procambarus* sp.), in the North American pet trade. Aquatic Invasions, 5(4):447-450. http://www.aquaticinvasions.net/2010/AI_2010_5_4_Faulkes.pdf
- Ferdushy T, Kapel CMO, Webster P, Al-Sabi MNS, Grønvald J, (2009). The occurrence of *Angiostrongylus vasorum* in terrestrial slugs from forests and parks in the Copenhagen area, Denmark. Journal of Helminthology, 83(4):379-383.
- Ferreira MP, Capinha C, Banha F, Rabaca JE, Anastacio PM, 2010. Interactions between indigenous and non indigenous species: Waterbird-mediated crayfish *Procambarus clarkii* dispersal. In: Abstracts of the European crayfish, food, flagship & ecosystem services conference, Poitiers, France
- Gosse J, Hermanutz L, McLaren B, Deering P, Knight T, (2011). Degradation of boreal forests by nonnative herbivores in Newfoundland's National Parks: recommendations for ecosystem restoration. Natural Areas Journal, 31(4):331-339.
- Government of Canada. (2011). D-11-01: Phytosanitary Requirements for Plants for Planting and Fresh Branches to Prevent the Entry and Spread of *Anoplophora* spp. url: <https://inspection.canada.ca/en/plant-health/invasive-species/directives/forest-products/11-01>. (2024.11.07.)
- Gutekunst, J., Maiakovska, O., Hanna, K. *et al.* Phylogeographic reconstruction of the marbled crayfish origin. Commun Biol 4, 1096 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02609-w>
- Haack RA, Herard F, Sun JH and Turgeon JJ, (2010) Managing invasive populations of Asian longhorned beetle and citrus longhorned beetle: a worldwide perspective. Annu Rev Entomol 55: 521-546.
- Halbwachs H, Bassler C, (2015). Gone with the wind - a review on basidiospores of lamellate agarics. Mycosphere, 6(1):78-112.
- Haojun Li, Runa Zhao, Yingna Pan, Hui Tian and Wenlong Chen. (2024). Insecticidal activity of

Ageratina adenophora (Asteraceae) extract against *Limax maximus* (Mollusca, Limacidae) at different developmental stages and its chemical constituent analysis. PLoS One. 16;19(4):e0298668.

Hess SD, Prior DJ, 1985. Locomotor activity of the terrestrial slug, *Limax maximus*: response to progressive dehydration. Journal of Experimental Biology, 116:323-330.

<https://tsusinvasives.org/home/database/limax-maximus> (2024.11.9.)

<https://www.gwct.org.uk/wildlife/species-of-the-month/2016/february/>

<https://www.invasive.org/species/list.cfm?id=185> (2024.11.9.)

Hu J, Angeli S, Schuetz S, Luo YouQing, Hajek AE (2009) Ecology and management of exotic and endemic Asian longhorned beetle *Anoplophora glabripennis*. Agricultural and Forest Entomology, 11(4):359-375.

Javal M, Roux G, Roques A, Sauvard D. (2018). Asian Longhorned Beetle dispersal potential assessed in computer-linked flight-mills. Journal of Applied Entomology, 142:282-286.

Joe SM, (2006). Impact of alien slugs on native plant seedlings in a diverse mesic forest, O'ahu, Hawai'i, and a study of slug food plant preferences., USA: University of Hawaii, 87 pp. [MSc thesis.]

Joe SM, Daehler CC, (2008). Invasive slugs as under-appreciated obstacles to rare plant restoration: evidence from the Hawaiian Islands. Biological Invasions, 10(2):245-255. <http://www.springerlink.com/link.asp?id=103794>

Johan Watz, Daniel Nyqvist (2022) Interspecific competition among terrestrial slugs. Journal of Molluscan Studies, 88(2), eyac007, <https://doi.org/10.1093/mollus/eyac007>

Jones, J.P.G., Rasamy, J.R., Harvey, A. *et al.* The perfect invader: a parthenogenic crayfish poses a new threat to Madagascar's freshwater biodiversity. Biol Invasions 11, 1475-1482 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10530-008-9334-y>

Taehwa Kang, Nam Hee Kim, Sang Woong Kim, Deuk-Soo Choi. (2023). Alien hitchhiker insect species detected from the international vessels entering into Korea in 2021. Journal of Species Research, 12(2), 189-196.

Keller HW, Snell KL, (2002). Feeding activities of slugs on Myxomycetes and macrofungi. Mycologia, 94(5):757-760.

Kim JR, Hayes KA, Yeung NW, Cowie RH, (2014). Diverse gastropod hosts of *Angiostrongylus cantonensis*, the rat lungworm, globally and with a focus on the Hawaiian Islands. PLoS ONE, 9(5):e94969.

Kim, H. G. Park, K., Park, Y., & Cho, Y. (2024). Identifying Potential Food Source through DNA Barcoding Analysis of Feces from Invasive Slug, *Limax maximus* (Linnaeus 1758) (Gastro

- poda: Pulmonata), in Republic of Korea. Proceedings of the National Institute of Ecology of the Republic of Korea, 5(3), 86–93, <https://doi.org/10.22920/PNIE.2024.5.3.86>
- Lopez, V. M., Hoddle, M. S., Francese, J. A., Lance, D. R., Ray, A. M., (2017). Assessing flight potential of the invasive Asian longhorned beetle (Coleoptera: Cerambycidae) with computerized flight mills. *Journal of Economic Entomology*, 110(3) 1070–1077.
- Lyko F. The marbled crayfish (Decapoda: Cambaridae) represents an independent new species. *Zootaxa*. 2017 Dec 12;4363(4):544–552. doi: 10.11646/zootaxa.4363.4.6. PMID: 29245391.
- M. A. Keena, (2002). *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) Fecundity and Longevity Under Laboratory Conditions: Comparison of Populations from New York and Illinois on *Acer saccharum*, *Environmental Entomology*, Volume 31, Issue 3, Pages 490–498, <https://doi.org/10.1603/0046-225X-31.3.490>
- Matteo Marchioro and Massimo Faccoli. (2021). Successful Eradication of the Asian Longhorn Beetle, *Anoplophora glabripennis*, from North-Eastern Italy: Protocol, Techniques and Results. *Insects*. 28;12(10);877.
- Melody A. Keena. (2018). Factors That Influence Flight Propensity in *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Environmental Entomology*. 47(5). 1233–1241.
- Mori, Y., & Nakano, T. (2017). Citizen science reveals the present range and a potential native predator of the invasive slug *Limax maximus* Linnæus, 1758 in Hokkaido, Japan. *Bioinvasions records*, 6(3), 181–186.
- Nemaplex.UCDavis.edu; <http://nemaplex.ucdavis.edu/Uppermnus/topmnu.htm>
- Nowak DJ, Pasek JE, Sequeira RA, Crane DE, Mastro VC. (2001). Potential effect of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) on urban trees in the United States. *Journal of Economic Entomology*, 94(1):116–122; 23 ref.
- Oregon Forestsnail Recovery Team, (2012). Recovery plan for Oregon Forestsnail (*Allogona townsendiana*) in British Columbia. Victoria, BC., Canada: B. C. Ministry of Environment, 50 pp.
- P. S. Meng, K. Hoover, M. A. Keena (2015), Asian Longhorned Beetle (Coleoptera: Cerambycidae), an Introduced Pest of Maple and Other Hardwood Trees in North America and Europe, *Journal of Integrated Pest Management*, Volume 6, Issue 1, <https://doi.org/10.1093/jipm/pmv003>
- Park, K. Kim, J., Park, S., Mun, C., Kim, S., Cho, Y., & Park, Y. (2024). First Report of the Leopard Slug (*Limax maximus*), a New Alien Species in Republic of Korea. Proceedings of the National Institute of Ecology of the Republic of Korea, 5(2), 50–54, <https://doi.org/10.22920/PNIE.2024.5.2.50>
- Parks Canada Agency, (2009). Recovery Strategy for Dromedary Jumping-slug (*Hemphillia dromedarius*) in Canada [Proposed]. Ottawa, Canada: Parks Canada Agency, 8 + 39 pp. [Species

at Risk Act Recovery Strategy Series.]

- Pedlar, J. H., McKenney, S. D. W., Yemshanov, D., Hope, E. S. (2020). Potential economic impacts of the Asian longhorned beetle (Coleoptera: Cerambycidae) in eastern Canada. *Journal of Economic Entomology*, 113(2) 839–850.
- Privenau K, 2010. [English title not available]. (Marmorkrebs bringt Pest.) *Mitteldeutsche Zeitung* news story. <http://www.mz-web.de/servlet/ContentServer?pagename=ksta/page&atype=ksArtikel&aid=1286541132341&calledPageId=987490165154>
- Qin, H., Xu, H., Capron, A., Porth, I., Cui, M., Keena, M.A., Deng, X., Shi, J. and Hamelin, R.C. (2024), Is there hybridization between 2 species of the same genus in sympatry?—The genetic relationships between *Anoplophora glabripennis*, *Anoplophora chinensis*, and putative hybrids. *Insect Science*, 31: 633–645. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.13256>
- Robinson DG, 1999. Alien invasions: the effects of the global economy on non-marine gastropod introductions into the United States. In: *Malacologia*, 41(2) [ed. by Davis GM]. 413–438.
- Rollo CD, Wellington WG, (1981). Environmental orientation by terrestrial Mollusca with particular reference to homing behaviour. *Canadian Journal of Zoology*, 59:225–239.
- Rollo DC, (1983). Consequences of competition on the reproduction and mortality of three species of terrestrial slugs. *Researches on Population Ecology*, 25:20–43.
- Rollo DC, (1983). Consequences of competition on the time budgets, growth and distributions of three species of terrestrial slugs. *Researches on Population Ecology*, 25:44–68.
- Sabbatini Peverieri, G., Roversi, P.F. (2010). Feeding and oviposition of *Anoplophora chinensis* on ornamental and forest trees. *Phytoparasitica* 38, 421–428, <https://doi.org/10.1007/s12600-010-0118-4>
- Sawyer, A., W. S. Panagakos, A. E. Horner, and K. J. Freeman. (2011). Asian longhorned beetle, over the river and through the woods: habitat-dependent population spread, pp. 52–211;54. In K. A. McManus and K. W. Gottschalk (eds.), *Proceedings, 21st U.S. Department of Agriculture Interagency Research Forum on Invasive Species 2010*, 12–15 January 2010, Annapolis, MD. Gen. Tech. Rep. NRS-P-75. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA.
- Senanayake SN, Pryor DS, Walker J, Konecny P, (2003). First report of human angiostrongyliasis acquired in Sydney. *Medical Journal of Australia*, 179(8):430–431.
- Seunghyun Lee, Gyeonghun Ko, Yeong-Don Lee, Sun Keun Lee, Min-Jung Kim, Minhoo Lee, Kyung-Don Kang, Bai Ming, Dong-Soon Kim, Seunghwan Lee (2024) The third invasive *Anoplophora*: Citizen science facilitates uncovering massive abundance of non-native *A. horsfieldii* (Coleoptera: Cerambycidae) in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology* Volume 27,

- Seunghyun Lee, Junhyeong Choi, Hyunkyu Jang, Woong Choi, Woonchan Kwon, Doyoon Kim, Jaedong Gim, Jonghyun Park, Sangwook Park, Sangil Kim, Seunggwon Shin, Seunghwan Lee, Establishment of non-native *Anoplophora horsfieldii* (Coleoptera: Cerambycidae) in South Korea, Journal of Integrated Pest Management, Volume 14, Issue 1, 2023, 9, <https://doi.org/10.1093/jipm/pmad008>
- Sjöman H, Östberg J, Nilsson J.(2014). Review of host trees for wood-boring pests *Anoplophora glabripennis* and *Anoplophora chinensis*: An urban forest perspective. Arboric Urban For. 40:143–164.
- Smith, M. T., J. Bancroft, G. H. Li, R. Gao, and S. Teale. (2001). Dispersal of *Anoplophora glabripennis* (Cerambycidae). Environ. Entomol. 30: 1036–1040.
- Soes, M., & Eekelen, R. (2006). [English title not available]. (Rivierkreeften, een oprukkend probleem?.) De Levende Natuur, 107(2):56–59.
- Souty-Grosset, C., Holdich, D.M., Noel, P.Y., Reynolds, J.D., & Haffner, P. (2006). Atlas of crayfish in Europe. Paris, France: Museum national d'Histoire naturelle, 187 pp.
- Straw, N. A., Fielding, N. J., Tilbury, C., Williams, D. T., & Cull, T. (2016). History and development of an isolated outbreak of Asian longhorn beetle *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in southern England. Agricultural and Forest Entomology, 18(3), 280–293.
- Tadashi Kawai, Gerhard Scholtz, Shinsuke Morioka, Fihaonantsoa Ramanamandimby, Chris Lukhup, Yukio Hanamura, Parthenogenetic Alien Crayfish (Decapoda: Cambaridae) Spreading in Madagascar, Journal of Crustacean Biology, Volume 29, Issue 4, 1 October 2009, Pages 562–567, <https://doi.org/10.1651/08-3125.1>
- Teixeira CG, Thiengo SC, Thome JW, Medeiros AB, Camillo-Coura L, Agostini AA, (1971). On the diversity of mollusc intermediate hosts of *Angiostrongylus costaricensis* Morera & Céspedes, in Southern Brazil. Mem Inst Oswaldo Cruz 1993; 88(3): 487–489.
- Turgeon, J. J., M. Orr, C. Grant, Y. Wu, and B. Gasman. (2015). Decade-old satellite infestation of *Anoplophora glabripennis* Motschulsky (Coleoptera: Cerambycidae) found in Ontario, Canada outside regulated area of founder population. Coleopts. Bull. 69: 674–678.
- VanArman, P. G. (2011). ROLE OF NATIVE CRAYFISH, *PROCAMBARUS ALLENI* (FAXON) AND *PROCAMBARUS FALLAX* (HAGEN), IN EVERGLADES FOOD WEBS: A LITERATURE REVIEW AND CONCEPTUAL MODEL. Florida Scientist, 74(2), 100–125. <http://www.jstor.org/stable/24321812>
- Wang X, Keena MA. Hybridization Potential of Two Invasive Asian Longhorn Beetles. Insects. 2021 Dec 20;12(12):1139. doi: 10.3390/insects12121139. PMID: 34940227; PMCID: PMC8706446.

- Wataru Komatsu and Ikuyo Saeki (2022) Feeding habits of the exotic invasive slug *Limax maximus*: a basis for risk assessment of herbivory on forest and agricultural ecosystems. *Management of Biological Invasions*, 13(in press)
- Wen, J., Y. Li, N. Xia, and Y. Luo. (1998). Dispersal pattern of adult *Anoplophora glabripennis* on poplars. *Acta Ecol. Sin.* 18: 269–277.



ISBN 979-11-6698-528-7