

최종보고서

이화명나방 다발생 원인규명 및 방제적기 재설정

주관연구기관 : 한국농수산대학교

2024. 12. 11

군산시농업기술센터

연구 용역 최종 보고서

다음과 같이 연구용역 결과를 제출합니다.

- 제목 : 이화명나방 다발생 원인규명 및 방제 적기 재설정
- 참여자 :
연구책임자 박 창 규 (한국농수산대학교 부교수)
책임연구원 정 진 교 (한국농수산대학교 박사후 연구원)
- 연구기간 : 2024.08.12.~2024.12.11.

2024. 12. 11

연구책임자 박 창 규

군산시농업기술센터 귀중

목 차

보고서 요약 -----	3
가. 연구 배경 및 목적 -----	4
1. 연구 배경 -----	4
2. 연구 목적 -----	5
나. 군산지역 이화명나방 다발생 원인 규명 -----	6
1. 이화명나방의 생물적 특성 -----	6
2. 국내에서 이화명나방의 발생 양상 -----	7
3. 다발생 원인 1. 외부로부터 이화명나방 성충의 이입 -----	9
4. 다발생 원인 2. 군산지역 벼 재배 환경 변화 -----	10
5. 다발생 원인 3. 살충제 처리 결과의 변화 -----	17
6. 다발생 원인 4. 이화명나방 1화기 성충 발생일의 변화 -----	18
7. 다발생 원인 5. 이화명나방 월동 유충 생성기 및 발생 세대 변화 -----	18
8. 이화명나방 다발생 원인 추정 결과 요약 및 고찰 -----	23
다. 군산지역 방제적기 재설정 -----	27
1. 살충제 이용 방제에서 고려되어야 할 중요 요소들 -----	27
2. 1세대 갓 부화유충 발생 시기 추정 -----	30
3. 2세대를 포함한 후대 세대 유충 대상 방제 -----	38
4. 방제적기 재설정에 관한 종합 결론과 고찰 -----	39
라. 인용 및 참고문헌 -----	41
마. 보충자료 -----	44
[1990년 이후의 이화명나방 성충 밀도 변화] -----	44
[국내 맥류 재배면적] -----	44
[이화명나방 세대 진전 추정에 사용된 모델] -----	45
[이화명나방 성충 발생 조사 간격과 최대발생일을 규정하는 방법] -----	48
[월동유충으로부터 1화기 성충 발생일을 추정하는 모델] -----	50

[보고서 요약]

최근 2-3년간 전라북도 군산시 산북동 중심의 논 포장에서 이화명나방의 발생량이 급격하게 증가하여 상당한 벼 피해가 발생하였고, 향후 지속적 피해가 예상되어 이화명나방 피해 저감 방안 마련을 위해 1. 다발생 원인 규명 및 2. 방제 시기 재설정에 대한 분석작업이 요구되었음. 이에 본 연구에서는 최근 군산 개체군 밀도 변동 자료 분석과, 세대 진전 해석 및 기존 연구 정보 분석을 수행하였고, 아래와 같은 분석 결과를 도출하였음.

1. 다발생 원인 분석 결과

- 군산 특정 지역들은 2모작 비율이 높아 생육시기가 다른 벼들이 공존하며, 이는 이화명나방 1세대 및 후세대(2세대 혹은 3세대까지) 유충에게 양질의 먹이원이 계속 제공될 수 있는 환경임. 즉, 어떤 요인에 의해서 밀도가 쉽게 증가할 수 있는 잠재적 환경임.
- 2모작 논은 겨울철 경운 없이 운용되어 이화명나방 양질의 월동처를 제공함.
- 최근 이화명나방 개체군 밀도 증가와 관련되어 해외나 다른 기주식물 등 외부로부터의 이입은 없었던 것을 추정됨.
- 2모작 비율이 높은 지역에서 이앙일 앞당김은 1모작 논에 산란량이 집중되는 현상을 일으킬 수 있었고, 현재 밀도 증가의 객관적 원인의 하나로 판단됨.
- 현 문제가 발생하기 전 논에서 해충에 대한 방제체계는 2차 해충이었던 이화명나방을 대상으로 꾸러지지 않는 않았던 것으로 판단됨.
- 종합하면, 높은 2모작 비율, 이앙일 앞당김 효과, 양질 먹이원의 상시 존재, 월동처 풍부함 등이 특정 지역(산북동 일대) 밀도 증가와 관련이 있을 것으로 추정됨.

2. 방제시기 재설정

- 이화명나방 유충의 섭식행동 특성상 갓부화유충 최대발생일부터 수일 내에 살충제 영향을 받게 하는 것이 효율이 높을 것으로 추정되었음.
- 1화기 성충 최대발생일보다 이앙일이 빠르거나 같을 경우 갓부화 유충이 나타나는 시점은 성충 최대발생일보다 약 2주 후로 추정되었음. 이앙일이 성충 최대발생일보다 늦을 경우에는 이앙일이 늦어짐에 따라 유충 출현일도 늦어지는 것으로 추정되었음. 단, 이앙일이 늦어짐에 따라 산란밀도도 빠르게 감소하는 것으로 추정되었기 때문에 방제 여부에 대한 의사결정 기준을 만들 필요가 있음.
- 2세대 및 후세대 유충, 월동유충에 관련하여 군산에서는 1화기 이후 공통적으로 관찰되는 3개의 성충 발생 시기(① 7월 중하순, ② 7월 말~8월 중순, ③ 8월 중순~9월 상순) 성충 피크가 있었음. 이들 자손인 갓부화유충은 그 시기의 성충 최대발생일로부터 약 8일 후에 최대로 발생한다고 추정되었음.
- 첫 시기와 두 번째 시기는 발생밀도가 적어 방제 여부에 대해 신중히 고려할 필요가 있고, 세 번째 시기는 수확시기와 가까워 역시 방제 여부를 고민할 필요가 있음.

가. 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

- 1) 최근 군산지역에서 이화명나방에 의한 피해 현황
 - 군산지역에서 이화명나방에 의한 피해 증가는 2021년부터 인지되었고, 2022년부터 피해가 급격하게 증가하였음(표 1).
 - 피해가 처음 관찰된 시기는 6~7월로 1세대 유충에 의한 피해가 인지되었음.
 - 2022년 9월 미성동 일원에서 조사된 수확전 벼 포장에서 피해 필지율이 25.2%였음(전체 282필지 조사, 군산센타 자료).
 - 2022년 11월 10일 산북동과 개정면에서 벼 수확 후 포장에서 조사된 생존유충 밀도는 산북동(미성동)에서 높은 편이었음(표 2).
 - 성페로몬 트랩을 이용한 이화명나방 성충 발생 예찰은 2023년 처음 실시되었는데, 산북동(미성동)에 설치된 트랩에서 포획수가 많았음(표 2).
 - 2024년 1화기 성충 포획수는 2023년보다 증가하였음.
 - 2024년 9월에 조사된 피해면적을 보면 2023년보다 줄어, 1세대 유충에 대한 적극적 방제 효과가 나타난 것으로 추정되었음(표 1; 표 2).
 - 1모작과 2모작 논에 의한 피해 비율은 2023년, 2024년 모두 약 6:4로 1모작 논에서의 피해가 더 컸음(군산센타 조사 자료).

표 1. 최근 연도별 군산시 이화명나방에 의한 벼 피해 상황 및 대응 조치

관찰 항목	연도			
	2021년	2022년	2023년	2024년
피해면적(ha) (9~10월 조사)	10	400	500	291
피해 첫 관찰 시기	7월 중순 (원산북지역 등 산발적 발생)	6월 말 (1모작 초기 이양답 중심)	6월 중순	6월 중순
군산시 방제작업	1세대		6월 8~17일	6월 8~14일
	2세대		7월 26~31일	7월 20~25일 (시 공동방제)

(참고: 해당 해충은 이화명나방으로 동정됨) [군산시 농업기술센타 자료, 2024.10.2]

(2) 의문 및 시사점

- 최근 군산시의 특정 지점에서 이화명나방 발생량이 갑자기 증가한 원인이 뚜렷하지 않음.
- 향후 군산시 전역에서 이화명나방 발생량이 증가하면서 발생지역도 확대될 가능성이 있고, 수확량 감소에 직접 영향을 미칠 것이 예상됨.
- 현재까지 구현하고 있던 이화명나방 방제 체계 - 방제 시기와 살충제 종류 등 - 에 대한 의문점이 대두되고 있는 실정임.

표 2. 2022-2024년 군산시 여러 지점에서의 이화명나방 발생 밀도

관찰 지점	경작 형태 ¹⁾	2022-2023년 월동 유충밀도 (마리/100주)		2023년 성페로몬트랩 성충 포획수(마리)		2024년 성페로몬트랩 성충 포획수(마리)	
		11월 20일 ³⁾	3월 14일	5/16~6/30 (1화기)	7/6~8/21 (2화기~)	3/19~6/30 (1화기)	7/1~9/19 (2화기~)
		산북 2479	2	70	24	869	197
산북 950	- ²⁾	37	8	-	-	-	-
산북 3405	2	7	0	190	35	568	9
산북 2446	-	-	-	-	121	-	-
산북 2314	1	-	-	-	-	872	80
개정 운회 1099	1	0	0	16	3	64	21
대야 지경 2092	1	-	-	24	16	-	-
대야 지경 2057	1(?)	-	-	-	-	452	252
대야 복교 1485	1	-	-	-	18	-	-
회현 금광 1562	2	-	-	-	21	-	-
회현 학당 1878	2	-	-	-	-	240	35

¹⁾1모작 1, 2모작 2; ²⁾조사하지 않음; ³⁾수확후 조사

[군산시 농업기술센터 자료]

2. 연구 목적

- 1) 최근 군산지역에서 나타난 이화명나방 발생량 증가 원인을 추적·규명하여 이화명나방 밀도 감소에 필요한 조치를 검토하고자 함.
- 2 이화명나방 밀도 감소를 위한 효과적인 방법의 하나로 살충제 이용 방제적기를 새로 검토하고자 함.

위 목적을 달성하기 위해 이화명나방의 ① 최근 군산 지역 이화명나방 개체군 밀도 변동 자료 분석, ② 세대 진전 해석 및 ③ 기존 연구 정보 분석을 수행하였음 위 분석 결과를 이용하여 향후 이화명나방 밀도 감소를 위해 효율적이면서 실행 가능한 관리방법들을 제시하고자 함.

나. 군산지역 이화명나방 다발생 원인 규명

1. 이화명나방의 생물적 특성 [Kiritani and Tatsuki(Eds)(2009)로부터 대부분 발췌]

- 이화명나방은 서식하는 지역에 따라 연중 1~6세대 경과.
- 국내에서는 대부분 지역에서 2세대를 경과한다고 알려져 있음.
- 겨울철에는 말령유충태로 휴면(겨울잠).
 - * 휴면은 단일조건과 온도조건에 의해 영향을 받아 유도됨.
 - * 국내 중부지방의 경우 2세대 유충의 일부 혹은 전부, 3세대 유충(형성되는 경우)의 전부가 휴면에 들어갈 것으로 추정됨.
- 알은 알뭉치(난괴) 형태로 산란.
- 유충은 4~8회 탈피할 수 있으나 보통 5 혹은 6령의 경우가 많음.
- 유충은 줄기 안으로 들어가는 습성이 있는데, 2령 유충이 침입한다는 의견과 엽초 안쪽에서 가해하면서 3~4령부터 줄기 안으로 침입한다는 의견이 있음. 임주락박사는 2령이 줄기 안으로 들어가는 것을 확인하였음(2024.10.02. 군산센터 발표회).
- 1세대 유충에 의한 피해는,
 - ① 1차로 알뭉치(난괴)에서 부화한 어린 유충이 한꺼번에 줄기의 엽초 안쪽으로 들어가 섭식하면서 엽초의 색이 황갈색으로 변하는 현상(엽초변색줄기, 초고경)이 나타남[이때를 1세대의 주 피해기로 설정하기도 함. 한 등(1972)에서는 초고경률과 아래의 심고경류를 더해 피해경률로 산출하였음].
 - ② 엽초 안에서 성장한 유충이 분산하여 옆 줄기 혹은 옆 주의 줄기로 들어가 섭식하여 줄기가 마르는 ‘속마름(심고경)’ 현상으로 나타남. 이 결과 피해 주의 줄기수가 감소함. 분얼기 중 보상작용으로 줄기 수는 어느 정도 회복되나 결국 이삭줄기(유효경)는 감소되는 영향을 미치고 수확 감소에 연결됨.
- 2세대 유충(출수기 전후 1세대 성충이 산란한 알에서 부화)에 의한 피해는,
 - ① 부화 유충이 집단으로 엽초 안쪽에서 섭식하여 ‘엽초변색줄기’를 야기하고,
 - ② 성장한 유충이 옆 줄기나 옆 주의 줄기 안으로 침입하여 섭식하는데,
 - ⓐ 줄기가 출수 전이면 ‘출수 정지’ 현상을 일으키고,
 - ⓑ 출수 직후에 침입하면 이삭에 하얗게 마르는 ‘흰이삭(백수)’ 현상으로,
 - ⓒ 등숙기 중에 침입하면 등숙이 방해되고,
 - ⓓ 피해가 매우 심할 경우 벼의 도복현상이 일어나기도 함.
- 벼 포장에서 이화명나방 알에서 부화한 1령이 엽초와 줄기 사이로 침입하기까지의 사망률이 매우 높은 편이나 그 이후 유충 기간동안의 생존율이 어느 정도 안정된 상태로 유지됨(그림 1, 일본 벼 포장에서 조사된 이화명나방 미성숙태(알, 유충, 번데기)의 생존성 곡선 예)

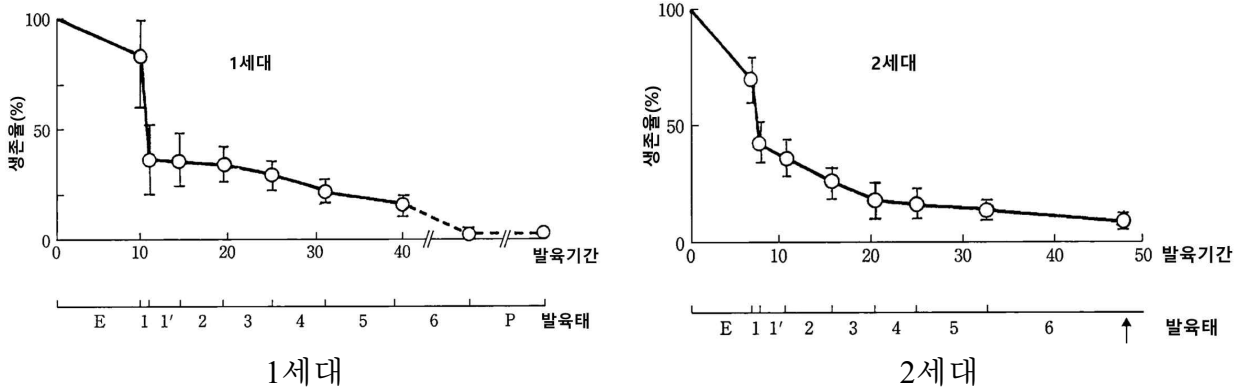


그림 1. 야외에서 이화명나방의 생존 곡선
 [Koyama(1977)의자료, Kiritani와Tastuki(Eds)(2009)에서 재인용 및 수정]

- 성충 우화 시간은 일몰 후 1~2시간 후, 교미는 우화한 날 밤 20~21시에 피크임.
- 산란전 기간은 1~5일, 평균 1.4일임.
- 성충은 낮에는 정지하여 있고, 밤에는 주광성이 있어 암컷은 일몰 1~2시간 후에, 수컷은 2~3시간 후에 등불에 유인, 심야에도 적은 수가 암수 같이 유인됨.
- 유인등에 유인되는 암컷은 우화 당일부터 3일까지의 성충임.
- 유인등에 유인된 암컷을 조사한 결과 92%가 1회 교미, 5%가 2회 교미, 3%가 미 교미 상태였음.
- 성페로몬트랩으로 성충의 출현 정도와 기간을 예측할 수 있음.

(참고: 페로몬트랩 설치에 관련되어 연구된 정보)

: 트랩 형태별 포획 효율: 수반식(물통) ≥ 끈끈이형 ≥ 편넬형(갈대기형)

: 최적 트랩 높이(미끼 높이) : 약 50 cm

: 트랩의 유인거리 : 월동세대(1화기) 100~400 m, 1세대(2화기) 50~100 m

(여러개 트랩을 설치할 경우 200 m 이상 간격을 두어 트랩 설치)

: 광원으로부터 30~40 m 이상 떨어진 곳에 설치

: 줄 근락지로부터 400 m 이상 떨어진 곳에 설치할 때 줄 서식집단 영향 없음

: 벧짚을 피복재로 쓰는 과수원이나 밭으로부터 100 m 이상 떨어진 곳에 설치

2 국내에서 이화명나방의 발생 양상

1) 전국적 이화명나방 발생량 변화

- 1960년대 중후반까지 벼의 가장 큰 해충(박과 현, 1990; 이와 박, 1991).
- 1970년대초부터 밀도가 빠르게 감소하여 현재까지 지속된 것으로 보임(그림 2).
- : 밀도감소의 주 원인으로 조기재배에 의한 2세대 유충 생존성 저하, 콤바인 수확에 월동유충의 기계적 방제, 살충제 사용량 증가 등등이 추정됨.
- : 발생량이 많았던 1970년대 중반까지는 1화기 발생량이 2화기에 비해 더 많았으나, 밀도가 급격히 감소하는 1970년 중반 이후 시기에는 1화기 발생량이 현저하게 적어지고 이것이 전체 발생량 감소의 원인이었음.

- : 1980년대 중반 밀도 증가 현상이 보였고, 이때 지역적 확대도 수반하였음
- 1980년대 후반 ~ 1990년대 초반 사이의 밀도 증가 현상은 더 이어지지 않았고 다시 밀도가 감소하여 현재에 이르는 것으로 추정됨[수원지방의 예 (보충그림 1)].
- 따라서 이화명나방은 현재 국가 주요 예찰대상에서 빠져 2차 해충의 지위에 있음.

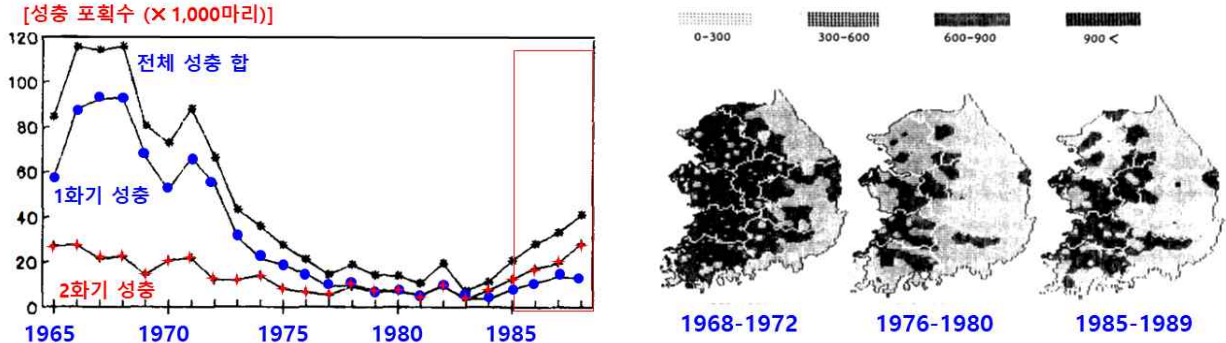


그림 2. 전국 예찰소 유인등에서 이화명나방 성충 포획수.

2) 국지적, 일시적인 발생량 변화(발생량 증가)

(1) 2010년 초반 전북 일부 지역의 피해 발생

- 2010년 초반에 익산과 군산지역에서 이화명나방 피해가 두드러지게 발생함.
- 이때의 이화명나방 피해 증가가 전국적인 현상인지는 밝혀지지 않았음.
- 당시 전북지역 이화명나방 밀도 증가의 원인도 뚜렷하게 밝혀지지 않았음.
- 단, 다른 벼 품종에 비해 신동진벼에서 피해줄기율과 유충밀도가 높았는데, 신동진벼의 줄기 지름이 다른 품종에 비해 상대적으로 큰 것이 관련 있을 것으로 추정되었음(표 3).

표 3. 2011년 전북지역에서 이화명나방에 의한 벼 피해 양상(익산과 군산)

품종	줄기 지름(mm)	9월 상·중순 조사(수확 전)	
		피해줄기 비율(%)	유충밀도(마리/100주)
신동진	6.28	11.5	132.5
동진찰	5.22	2.4	10.0
호평	5.67	0.7	7.5

(백, 2012; 자료 환산수정)

(2) 2020년대 초반 전북 군산지역의 피해 발생

- 현재 본 과제의 문제임 (표 1과 2).
- 본 피해 현상이 전국적으로 나타나는지는 아직 보고되지 않았음.
- 현 군산지역의 이화명나방 밀도 증가 원인을 과거의 경험에서 찾는 것이 어려움.
- 단 현재 문제지역에서 성충 1화기 발생량이 2화기 발생량에 비해 월등히 많은

양상으로, 과거 발생량이 매우 많았던 1970년대 중반까지의 현상과 유사함.

3. 다발생 원인 1: 외부로부터 이화명나방 성충의 이입

1) 해외로부터 이화명나방 성충의 비래 가능성

- 2023년과 2024년 군산 여러 지점에 설치된 성페로몬트랩의 성충 포획수는 트랩 설치 지점 사이에 상당 부분 다르나, 밀도 변동 양상은 서로 유사하였음(그림 3).

① 2023년과 2024년 모두 ㉠ 6월 중순까지의 발생량이 많은 성충 집단(1화기 추정)과 ㉡ 이후 7월 중순에 보이는 발생이 미약한 집단 및 ㉢ 7월 하순부터 8월 중순에 보이는 발생이 약간 더 큰 집단이 모든 지점에 공통적으로 나타난 것으로 보임.

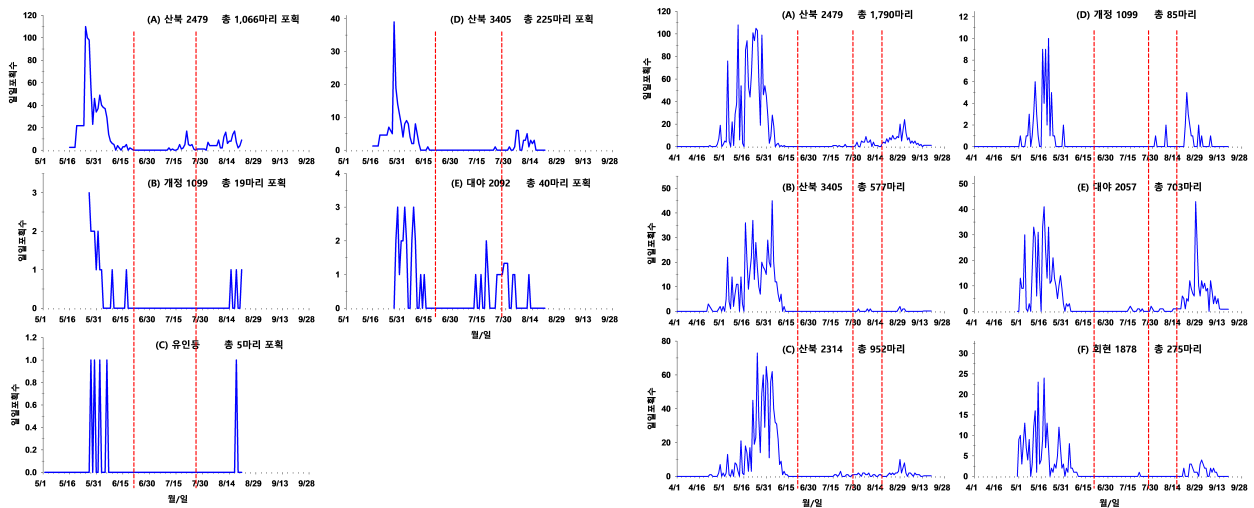
② 2024년에 8월 중순부터 9월 중순까지 보이는 발생량이 많은 성충 집단도 모두 공통적으로 나타난 것으로 확인됨.

: 2024년에는 2023년보다 성충 발생량이 더 많았는데, 산북동 지역 뿐만 아니라 다른 지역에서도 포획수가 증가한 것으로 조사됨.

- 국내의 대표적 비래해충인 멸강나방이 보여주는 것과 같이, 짧은 기간 안에 성충 발생이 급격하게 증가하였다가 다시 급격하게 소멸되는 현상은 발견되지 않았음.

- 현재까지 이화명나방의 장거리 이동에 대해 알려진 국내외 정보는 전혀 없음.

- 이상을 종합하면, 군산에서 최근 해당 지점에서 이화명나방 밀도 증가는 해외로부터의 비래와는 관계 없는 것으로 추정됨.



2023년[(C)는 예찰등 결과임] 2024년
 그림 3. 군산 여러 지점에서 성충 트랩에의 포획 양상(대부분 성페로몬트랩)
 (군산센타 자료 이용 분석)

2) 논포장 주변 대규모 대체 기주 서식지로부터 이화명나방 성충의 이입 가능성

- 줄(*Zizania latifolia*)(벼과)은 이화명나방 유충의 주요 기주식물로 알려져 있음.

: 각 벼 및 줄 집단은 벼와 줄 모두 섭식 가능함(Takano 등, 1959; Jiang 등, 2015).

- : 군산지역에서 2024년 5월 31일 알뭉치 발견됨(줄에서 1~2개/포기, 벼에서는 1~3개/포기) [임주락(식량원)(2024.10.02. 군산센타 세미나 발표자료)].
- 줄 서식 집단과 벼 서식 집단이 서로 섞일 수 있는지에 대해서는 서로 반대되는 주장들이 있음[Kiritani와 Tatsuki]Eds), 2009].
- 두 집단의 교미시간대가 다름: 벼 서식 집단은 암기의 초중반, 줄 서식 집단은 암기의 중후반임(Samudra 등, 2002).
- 두 집단은 교미 가능하여 F1 자손 생산 가능함.
- 몸 크기는 줄 서식 집단이 더 큼. 크기 이외에 수컷 생식기 형태에서 차이가 존재한다는 주장이 있음(Matsukura 등, 2006).
- 줄 서식 이화명나방 성충들은 성페로몬트랩에 유인됨.
- 성페로몬트랩 이용 예찰 시 줄 서식 집단이 더 이른 시기 유인됨.
- 군산 산북동 인근에 줄의 대규모 서식지는 없음. 단 농수로에 줄이 서식하고 있고, 이런 상황은 군산 내 다른 지역 및 김제나 부안과 같은 다른 지역도 유사한 것으로 조사됨[문형철(전북농업기술원)(2024.10.02. 군산센타 세미나 의견 제시)].
- 줄 서식 집단이 논의 이화명나방 집단 형성에 영향을 미칠 수 있다고 짐작되나, 인근에 대규모 줄 군락지가 없는 논 포장에서 심하게 발생한 이화명나방 피해에는 줄 집단이 크게 개입하지 않은 것으로 판단됨.

3) 벼짚 처리의 문제

- 벼짚은 1모작과 2모작 논 모두 수확 후 소먹이용 곤포로 판매됨.
- 남아 있는 벼 밀등을 제외하고 이화명나방 유충 월동처가 많이 제거되는 상태로 특정 상황이 발생하지 않는 한 현 밀도 증가의 원인으로 추정하기 어려움.

4) 육묘장에서의 증식 및 이입 가능성

- 이 경우 군산 내 특정 지역에 관계 없이 일괄적 피해 현상이 나타났을 것으로 추정되나 그런 현상은 보고되지 않았음.

4. 다발생원인 2: 군산지역 벼 재배 환경 변화

1) 1모작과 2모작 논 혼재 (적정 먹이의 지속적 제공 및 월동 밀도 가능성)

- 군산은 전국적으로 벼-맥류 2모작 경작방법을 택하는 주요 지역임.
 - * 전라북도 맥류재배면적 : 12,264 ha [전국의 35%, 전남(41%)]
(겉보리 25%, 쌀보리 60%, 밀 15%, 맥주보리 0.4%)
 - * 군산 맥류재배면적 : 2,722 ha로 벼 재배면적(12,321 ha)의 22.1%
(겉보리 657 ha, 쌀보리 1,865 ha, 밀 160 ha, 맥주보리 40 ha)
(2021년 기준 통계, 국가통계포털, 다른 참고 내용은 <보충그림 2>에 제공)
- 현재 문제가 되고 있는 군산 미성동 지역은 2모작 비율이 특히 높음(표 4).

군산 전체	미성동	회현면	대야면
22	50~60	40	30

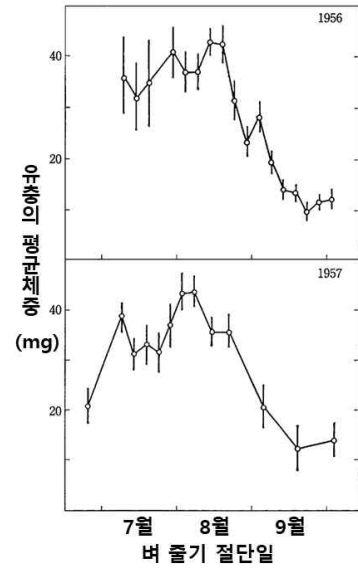
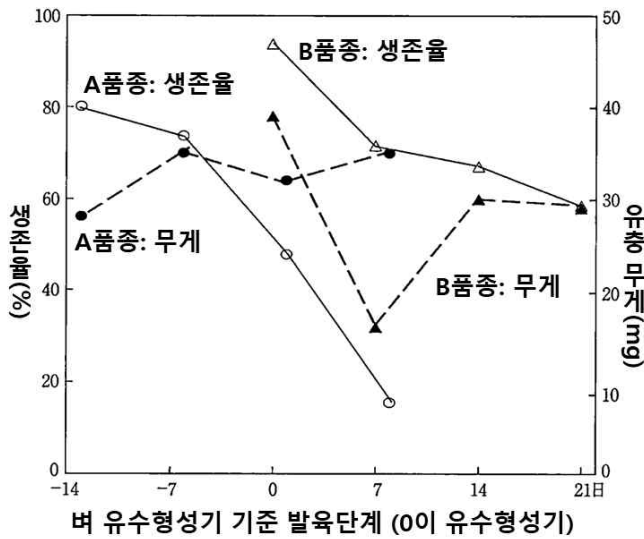
(군산기술센터 자료 제공)

- 1모작과 2모작 논의 혼재되어 있는 경우 생육시기가 다른 벼들이 주변에 같이 존재하여 이화명나방 성충은 자손 생산과 발육에 더 적합한 기주식물(벼)를 쉽게 발견할 가능성이 높고, 유충은 더 적절한 먹이에서 높은 생존율을 나타내게 됨.
- 2모작 논의 경우 벼 생육시기가 상대적으로 늦어짐에 따라 이화명나방 후세대 성충의 산란을 허용할 시기와 유충 발육에 필요한 양질의 먹이 제공 기간이 길어져 월동유충 밀도가 상대적으로 높아질 수 있을 것으로 추정됨.
- 맥류 재배를 위해 벼 수확 후 무경운은 겨울철 벼 그루터기가 이화명나방의 좋은 월동처로 제공되고 이는 성공적인 월동률을 높여 이듬해 1화기 이화명나방 발생량 증가를 유도할 수 있다고 판단됨.
 - : 1모작 논의 경우 벼 수확 후 경운 비율이 약 25%
 - : 2모작 논의 경우 벼 수확 후 무경운으로 맥류 파종(휴립광산과, 줄뿌림)
- 결국 군산지역 벼-동계맥류 2모작 재배 비율이 높은 지점들에서는 이화명나방 밀도가 높아질 수 있는 기본 환경을 갖추고 있다고 판단됨 [참고: 2024년 김제에서도 1화기 성충 발생량이 많은 것으로 보임 (임주락 2024.10.02. 센타 발표자료)].
- 특히 미성동(산북동) 지역의 경우 다른 지점에 비해 2모작 논의 비율이 월등히 높아, 1화기 성충 밀도 증가의 잠재적 가능성이 상대적으로 더 클 것으로 짐작됨.
- 재배환경 다양성 및 먹이에 대한 이화명나방 반응에 대한 과거 일본 연구 사례.
 - ① 일본 코치(Kochi)현 내 다양한 벼 재배형태를 가진 지역들에서 이화명나방이 연간 2세대 혹은 3세대로 각기 달리 발생한다고 판정됨(표 5).
 - ② 유수형성기가 지난 벼가 이화명나방 유충 먹이로서 덜 적합하거나, 생육 후반부의 벼가 유충 먹이로서 덜 적합함(그림 4).

표 5. 일본 Kochi현 여러 지역에서 벼 재배형태별 면적 비율(%)과 그 지역에서 판단된 이화명나방 세대 수

Kochi현 내 여러 지역	벼 재배형태의 구성비율(%)					2모작	이화명나방 연간 세대수
	극조생	보통조생	중생벼	만생벼	만화벼(晩化)		
A		59	28	13			2세대
B		33	48	16	4		2세대
C		11	58	27		4	3세대
D	7	39	12	1	3	38	3세대
E		12	62	27			3세대
F		7	74	19			2세대

(일본 1957년 자료)[Kiritani와 Tatsuki(Eds)(2009)에서 수정]



Tsutsui(1960)의 자료

Hirano(1964)의 자료

그림 4. 다른 벼 생육단계의 줄기를 먹인 이화명나방 유충의 생존율 및 무게(일본 자료)

[Kiritani와 Tatsuki(Eds)(2009)에서 수정]

2) 벼의 조기 이앙 (1세대 유충 발생량의 증가 가능성)

(1) 새로운 군산지역 1모작 신동진벼 재배 매뉴얼 보급

- 2021년부터 시범사업으로 추진됨.
- 고품질 쌀 생산 위해 ‘신동진벼 재배 매뉴얼’ 개편 보급 (2022년, 18년 경과).
 - * 이앙주수, 모내기과 거름주는 시기, 물과 토양관리, 고순도 종자 등 (2022년 2월 여러 언론매체, 전북중앙, 전라매일 등등)
- 새 ‘매뉴얼’에서 모내기 최적시기를 기존 6월 1일에서 5월 25일로 변경 권장됨.
 - * 분얼수 확보와 완전미율 비율 상승 목적
- 군산시 산북동 몇 논 포장의 최근 경작 형태 및 이앙일은 아래와 같음(표 6).

표 6. 군산 몇 논 포장의 경작형태와 이앙일

논 포장	최근 ¹⁾ 경작 형태	2023년	2024년
산북 2314	1모작	5월 25일	5월 23일
산북 2314의 인접포장	1모작	5월 28일	5월 21일
산북 2479	2모작	6월 18일	6월 20일
산북 2479의 인접포장	2모작	6월 18일	6월 20일
산북 3405	2모작	6월 25일	6월 27일
산북 3405의 인접포장	혼재	5월 30일	6월 18일

¹⁾2021~2024년의 최근 4년간

(군산기술센터 자료 제공)

(2) 군산지역에서 이앙시기에 따른 1세대 유충 발생량 모의실험

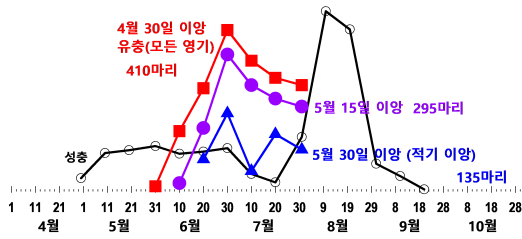
① 이앙에 따른 논 포장 내에서의 이화명나방 동태

- 이앙을 위해 논을 경운하고 물을 대는 작업은 월동세대 성충으로부터 이미 산란되어 경운 전 포장에 존재했던(전년도 벼로부터 나온 새 줄기와 잡초 등에) 알과 유충이 제거되는 효과를 가져옴.
- 아직 성충이 되지 않은 월동세대 번데기(혹은 유충)들도 제거되므로 해당 포장에서 발생하는 성충의 밀도가 떨어질 가능성이 있고, 이는 물리적 방제 효과를 낼 수 있음. 그러나 이동이 가능한 성충 특성상 옆의 논 혹은 논 바깥의 월동집단에서 출현한 성충이 이입하는 것도 물론 가능함. 실제 군산에서 설치된 페로몬트랩의 성충 밀도 변화를 보면 이앙일에 따른 성충 발생 양상이 뚜렷하게 구분되지 않음. 아울러 2모작 비율이 높은 지역에서는 이앙일이 늦어지므로 논 포장 내부에서 월동하던 월동세대의 제거 효과가 떨어질 것으로 짐작됨.
- 월동세대에서 우화한 성충(1화기)들의 산란은 결국 이식된 모가 생기는 이앙일 부터 시작되는 것으로 계산될 수 있음.
- 따라서 월동세대에서 우화한 성충(1화기)의 주 발생시기 중에 이앙일을 이른 시기로 당길 경우, 월동세대 전체 성충의 산란기간이 늘어나는 효과를 가져옴.
- 이는 이화명나방 월동세대 성충(1화기)이 산란하는 산란수가 증가되는 현상이 벌어질 수 있음을 의미함.

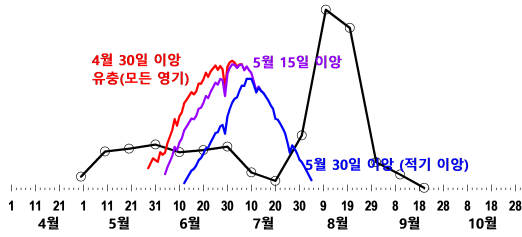
② 1모작 논에서 1세대 유충 발생 밀도 모의실험

- 위의 가정 아래, 1모작 논에서 6월 1일 이앙일을 앞당겨 5월 23~25일 이앙하였을 때의 갖 부화한 유충 발생량을 모의실험해 보면, 산북동 논에서는 약 1.4배, 대야면 지경리의 논에서는 약 3.2배의 유충 밀도가 증가하는 것으로 추정되었음 (그림 5).
- (참고) 1960년대 이후 국내 이화명나방 개체수의 감소 원인의 하나는 벼 조기 재배임. 전체적으로 벼가 조기재배되었을 때, 벼를 일찍 수확하게 되고, 이는 2세대 이화명나방의 영양상태를 나쁘게 하여 월동밀도 및 월동 생존율을 떨어뜨린 결과였음. 그러나 군산과 같이 동계 맥류 재배 논이 비율이 높은 경우, 1모작 재배 논에 인근에 이앙시기가 늦은 2모작 벼 품종이 위치하게 되고 2모작 벼 포장에 산란되고 성장하게 되는 2세대 이후 집단의 경우 발육 및 생존에 유리한 영양상태에 놓이게 되는 것임. 결과적으로 해당 지역 전체의 월동밀도와 생존율을 높이는 요인이 되어 벼 조기 재배로 인한 이화명나방 후세대 발육 억제 효과가 발휘되지 못했던 것으로 추정됨.
- (참고) 위 유충 발생량 추정은 정 등(2022)이 보고한 이화명나방 비월동세대의 세대 진전 과정(1화기 성충부터 2화기 성충까지)을 예측하는 모델을 사용하였음. 각 발육단계에 해당되는 모델을 [성충-알-유충-번데기] 혹은 [알-유충-번데기] 순서로 전개하여 필요한 값을 추정하였음. 관련 자료는 <보충자료>에 제시함.

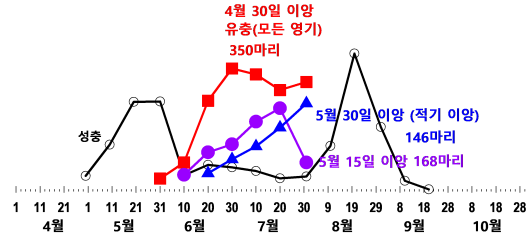
(A) 전남 광주 1988년 관찰값



(B) 전남 광주 1988년 유충 발생 시뮬레이션



(C) 전남 광주 1989년 관찰값



(D) 전남 광주 1989년 유충 발생 시뮬레이션

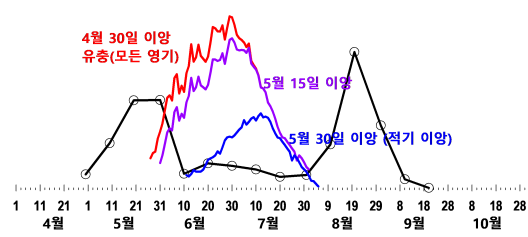


그림 7. 1988년(A와 B) 및 1989년(C와 D) 광주지방에서 이화명나방 성충 발생 및 이앙기에 따른 1세대 유충 발생 관찰(A와 C) 및 추정(B와 D).

(품종: 동진벼)[이와 박(1991)의 그림자료 재구성]

② 1994년 광주 지방에서의 연구(이와 마, 1997)

- 기계이앙의 경우 적정 이앙기(5월 21일)보다 20일 빠르게 이앙한 포장의 피해줄기 비율은 약 1.5배 증가하였고,
- 직파의 경우 파종적기(5월 5일) 보다 15일 빠르게 파종한 포장의 피해줄기 비율은 약 1.3배 증가하였음(표 8).
- 늦게 이앙하거나 파종한 시험구에서는 피해줄기 비율이 유의하게 감소하였음.

표 8. 재배방법과 이앙일에 따른 벼 피해줄기 비율(%) (전남 광주, 1994)

기계 이앙 및 이앙일			직파 및 파종일		
5월 1일	5월 21일(적기)	6월 11일	4월 21일	5월 5일(적기)	5월 20일
2.6 a	1.7 b	0.9 c	2.4 ab	1.9 ab	1.0 c

(반복구 30주씩, 7월 21일 조사, 동진벼, 초기 제초제만 처리) [이와 마(1997), 표 수정]

③ 1973년 충북 청원에서의 연구(한 등, 1975)

- 벼 피해줄기 비율은 조기 이앙 논에서 더 컸고, 늦게 이앙한 논에서 더 작았음 (표 9).

표 9. 이앙일에 따른 벼 피해줄기 비율(%) (충북 청원, 1973)

이앙일(6월 5일이 적정 이앙기)		
5월 20일	6월 5일(적기)	6월 20일
12.25	10.84	4.25

(통일벼, 성충 최대발생일 6월 6일, 조사일은 불확실) [한 등(1975) 보고서로부터 발췌 재구성]

④ 일본에서의 연구

“벼를 이른 시기에 심으면 논에서 산란이 많게 되며, 피해가 크다”[Santoki(1926)를 Kiritani와 Tatsuki(Eds)(2009)에서 재인용]

5. 다발생 원인 3: 살충제 처리 결과의 변화

1) 살충제 저항성 유충 출현

- 해충의 살충제 저항성 발달을 억제하기 위해서 현대에는 연속하는 해충 세대에 살충제를 적용해야 하는 경우, 작용방식이 다른 살충제 종류를 번갈아 사용할 것을 권고하고 있음.
- 살충제 저항성 발달은 해충의 생존성 증가와 연결되어 밀도 증가의 원인이 됨.
- 현 군산의 이화명나방 밀도 증가가 살충제 저항성과 관련이 있는지는 불확실함.
- (참고) 아래 <표 10>은 군산 산북동 지역의 2개 다른 논 포장에서 2024년 처리된 살충제 종류의 한 예임(시기에 따라 대상 해충 종들이 다를 것으로 추정됨).
: 단순하게 살충제 작용기작으로만 본다면, 처리된 작용기작 1a와 1b인 살충제가 시기에 따라 반복적으로 처리되고 있고, 이는 한 해충 종의 연속하는 둘 혹은 세 세대에 걸쳐 적용될 수 있고 저항성 발달의 단초가 될 수 있음.

표 10. 2024년 군산 산북동 지역 2개 1모작 논에 처리된 살충제 종류 예

살충제 처리 시기	처리 약제 성분 및 제형 (괄호 안은 작용기작 대표문자)
5월 하순(이양일)	카보설판입제(1a)
6월 20일	카보설판액상수화제(1a), 메타플루미존유제(22b), 싸이퍼메트린유제(3a)
7월 11일	펜토에이트유제(1b), 싸이퍼메트린유제(3a)
8월 2일	카보설판액상수화제(1a), 페니트로티온유제(1b)
8월 12일	펜토에이트유제(1b), 페니트로티온유제(1b)
9월 1일	카보설판액상수화제(1a), 페니트로티온유제(1b)

2) 살충제 처리에 기인한 천적 밀도 감소

- 이화명나방 대상 살충제의 대부분은 유충 방제용인데, 벼 줄기 안으로 들어간 이화명나방 유충에는 경엽 살포용 살충제의 독성이 전달되기 어려움.
- 따라서 줄기에 침입하기 전의 어린 유충 대상의 살충제 살포가 요구되며, 이는 결과적으로 살충제 적정 살포기간이 상대적으로 짧아지게 됨.
- 살포 적기 이외에 과도한 살충제 살포는 거꾸로 자연계에 존재하는 천적(주로 알, 유충, 번데기 기생천적)을 죽이는 부정적 영향을 미치고, 이것이 자연적으로 해충 밀도를 억누르던 균형상태를 깨뜨리게 되어 해충 밀도가 증가할 수 있음.
- 그러나, 그간 군산지역의 농가들은 합리적으로 살충제를 적용해 왔다고 생각되고,

또 천적 밀도가 일정 지역에서 급격히 감소되기는 어렵기 때문에, 현 문제와 같은 갑작스런 상황 변화에 천적 밀도 감소가 주 요인으로 기여하였다고 추정하기는 다소 무리가 있음.

3) 육묘상 처리 살충제 사용량의 문제

[참고: 이 문제는 군산기술센터 발표회(2024.10.2.) 토의에서 언급되었음]

- 쌀 품질 개선을 위해 단위면적당 모내기 포기 수를 기존보다 줄인다면, 하나의 육묘상에 있는 모가 심어지는 면적이 증가하는 꼴이 되므로, 기존에 육묘상에 처리되었던 입제 형태의 살충제를 증가시킬 필요성이 있음.
- 그러나 모내기 주 수 변경 이후에도 육묘상에 이전과 같은 농도로 살충제를 처리했을 때, 이화명나방 유충에게 사멸에 필요한 살충제 양이 전달되지 않았다면, 이화명나방의 생존율과 밀도가 높아졌을 수도 있음.
- 그러나, 이와 같은 상황이 실제로 군산에서 발생했는가는 증명 실험을 거치지 않는 한 추정하기 어려움.

6. 다발생 원인 4: 이화명나방 1화기 성충 발생일의 변화

- 월동유충의 온도의존 발육 모형에 의해 군산 지역에서 1화기 성충 50% 발생일이 2019년과 2020년에는 늦은 시기에 형성되었다가 2021년부터는 상대적으로 빠른 시기에 나타나는 경향이였음(보충그림 7).
- 이는 이화명나방 발육과 산란에 더 적절한 온도 조건이 형성되었다는 것을 의미하는데, 그 영향으로 이화명나방의 생존성도 높아지고 성충의 산란량이 많아졌을 가능성을 배제할 수 없음.
- 그러나 이를 추적할 밀도 자료가 없고, 관련된 기존 실험결과를 찾기 어렵기 때문에 군산지역에서 최근 이화명나방 밀도 증가와 이의 관련성에 대해 단정하여 언급하기 어려움.

7. 다발생 원인 5: 이화명나방 월동 유충 생성기 및 발생 세대 변화

1) 월동 유충 생성시기 추정

- 이화명나방은 말령 유충태로 ‘월동’에 들어가는데, 이는 다가오는 겨울 환경이 발육에 부적절함을 미리 예측하여 ‘휴면’이라는 생리현상을 통해 발육과 활동을 정지하는 행동임.
- 이화명나방 유충의 휴면은 유충기(어린 유충기로 추정) 짧아지는 낮길이(일장 조건)에 반응하여 유도되는데, 온도는 휴면 강도에 영향을 미쳐 휴면이 유도되거나 종료되는 시기를 변화시킬 수 있음.
- 그간 국내에서는 대부분의 지역에서 이화명나방이 1년에 2번 발생한다고 알려져 왔고, 이는 2세대 유충은 모두 월동휴면을 하는 것을 의미함.
- 아래 <그림 8>은 *Chilo*속 나방종(이화명나방과 같은 속의 종) 갓부화 유충을 수원 지역에서 2013년과 2014년에 인위적 야외조건을 조성하여 순차적으로 사육하였을

때 월동유충이 생성되는 시기를 표현한 자료임(실험 오류로 인해 이화명나방에 대한 자료를 얻지 못했음. 그러나, 이화명나방이 이와 유사한 휴면유도 속성을 보일 것으로 짐작되어 자료를 제시함). 이 결과에서,

- ① 2013년 7월 29일과 8월 27일, 2014년 8월 6일과 9월 15일에 사육을 시작한 부화 유충은 모두 월동에 들어가 각각 이듬해 5월과 6월에 걸쳐 성충이 되었고,
- ② 2014년 6월 21일, 7월 7일, 7월 22일에 사육이 시작된 갓 부화유충 집단들에서, 각 집단 중 일부는 그해 성충이 되었고, 나머지는 이듬해에 성충이 되었음. 이 중 2014년 7월 22일 유충집단은 수원지방의 야외개체군이라면 2세대에 속할 가능성이 큰데, 이들 일부가 그해 성충이 된 것은 3화기(2세대) 성충이 출현할 가능성이 있다는 것을 보여주고 있음. 이런 현상은 군산지역에서도 유사할 것으로 짐작됨.
- ③ 전체적으로 6월 하순부터 9월 중순 사이에 자라기 시작하는 유충들은 일부 또는 전부가 월동휴면에 들어가는 것으로 추정되었음.
- ④ 한편, 9월 15일 유충집단이 월동에 들어간 결과에 근거하여, 적어도 이의 어미세대가 9월 초중순 산란한다면 어느 정도(사망 제외)의 유충들이 모두 월동유충으로 발달되어 이듬해 1화기 성충밀도 구성에 기여할 것으로 판단됨. 즉, 현재 군산에서 8월 하순과 9월 초순 사이에 보이는 성충 피크는 월동유충의 밀도를 증가시키고, 이는 이듬해 1화기 성충 발생량을 증가시킬 수 있다는 관점에서 쉽게 무시될 수 없는 현상일 수 있음.

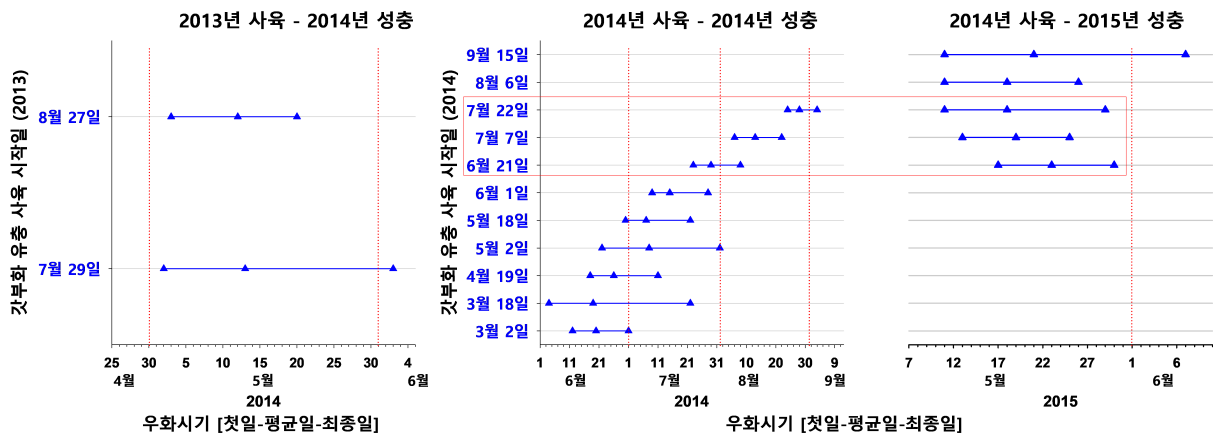


그림 8. 수원지방 야외조건에서 시기별로 사육한 *Chilo*속 갓부화유충의 성충 출현 시기(참고로, 2013년 10월 21일 사육에서는 모든 유충이 용화전 사망하였음) (참고: 이 실험에서는 실험곤충종이 정확하게 동정되지 않았음) [김 등(2024)의 표 기반 재구성]

2) 이화명나방의 발생 세대 추정

(1) 1980년 중반 전북지역의 이화명나방 성충 발생 양상(그림 9)

- 전북지역을 포함한 국내 대부분의 지역에서 성충이 1년에 2회 발생했고, 1화기는 4월부터 7월 초중순 사이에 발생하면서 최대발생기는 6월 초에 나타났음.
- 2화기는 7월 하순부터 9월 중순 사이에 발생했는데, 최대 발생기는 8월 초순으로 나타났다고 분석되어 왔음.

- 군산지역에 대해 별도로 기록한 문헌들을 찾을 수 없어 군산지역의 이화명나방 성충 발생 상황을 짐작하기 어려우나, 군산지역도 전북 전체로 표현된 발생 양상과 크게 다르지 않았을 것으로 추정됨.

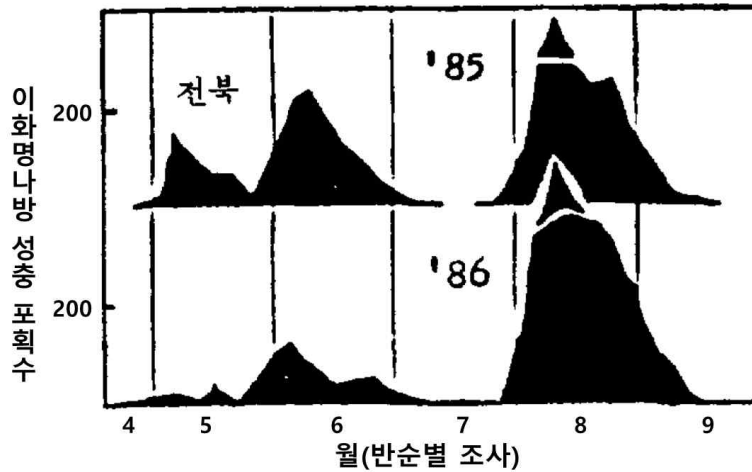


그림 9. 1985년, 1986년 전북지역 이화명나방 성충 발생 양상(예찰소 유인등트랩).
[김 등(1987)의 전국 그림에서 추출 및 수정]

(2) 2010년대 초중반 익산에서의 이화명나방 성충 발생 양상(그림 10)

- 2010년대 초반 익산에서 성페로몬트랩으로 조사된 성충 발생 상황은 이전 전북 지역의 성충 발생 양상과 조금 달랐음(오히려 최근 군산 발생 양상과 유사).
- 두 해 모두 1화기의 최대 발생 시점이 5월 31일이었고, 이것이 당시의 일반적인 경향이었다면 과거의 6월 초에서 5월 말로 조금 앞당겨진 꼴이 됨.
- 2화기 주 발생 시점은 애매해졌는데, 2013년의 경우 8월 초 발생 피크가 관찰되고 다시 9월 중순 큰 발생피크가 관찰되었는데, 이는 과거에는 관찰되지 않았던 발생 양상이었음. 2014년은 8월 중순에 과거와 달리 늦은 발생이 관찰되었고, 9월 중순 발생피크는 분리되지 않았으나 전년도와 마찬가지로 상당한 밀도가 발생한 것으로 조사되었음.

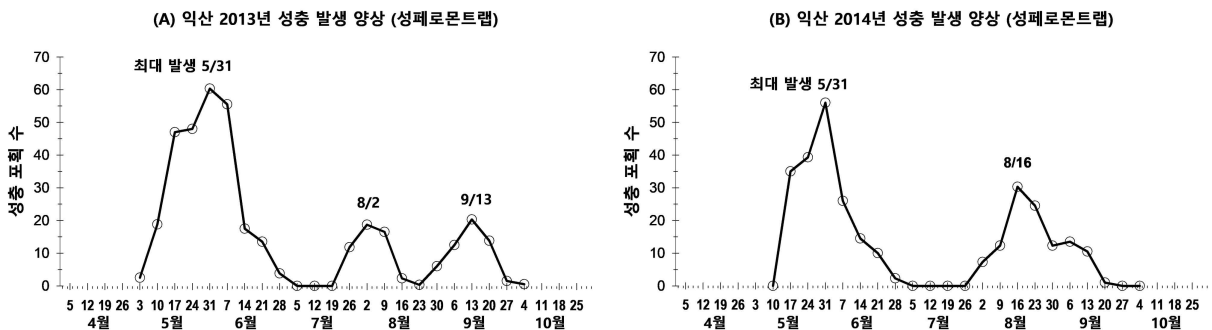
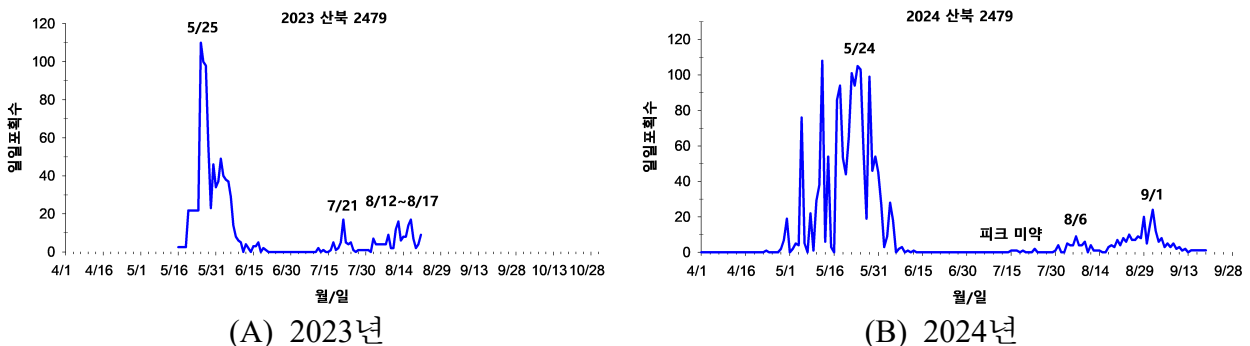


그림 10. 2013년, 2014년 익산에서의 이화명나방 성충 발생 양상(성페로몬 트랩).
[최와 이(2015)의 그림 재구성]

(3) 최근 군산지역에서의 이화명나방 성충 발생 양상과 세대 구분

① 군산 지역 발생 양상(그림 11)

- 2023년 성페로몬트랩을 이용하여 성충 발생을 매일 조사한 결과 7월 중하순에 작지만 뚜렷한 발생 피크가 관찰되었음. 2024년도에는 7월 중하순 피크가 매우 미약하게 관찰되었음.
- 이어 7월 말에서 8월 중순에 걸쳐 증가 피크가 관찰되는데, 이는 두 해 모두 공통이었고, 위 익산(그림 10)과 유사한 시기 피크로 판단되었음.
- 이어 8월 중순과 9월 중순 사이 관찰되는 피크가 있었고, 이는 이전 시기 피크에 비해 더 컸음(2023년에는 미조사).
- 1화기 최대 발생기는 5월 하순에 형성되었는데, 2024년과 같이 매일 조사에서는 하루당 발생 수가 5월 중순에 최대가 되는 경우도 있었음.
- 전체적으로 1년 중 1화기(4월 말~6월 중순), 그 후 3번의 발생피크(7월 중하순, 8월 초중순, 8월말~9월 초)가 군산지역에서 공통적으로 관찰된다고 판단되었음(그림 3).
- 또 다른 특징으로 1화기 성충 발생 후 6월 중순부터 7월 중순 사이, 최대 1개월 정도 성충 발생이 전혀 관찰되지 않았음.



(A) 2023년 (B) 2024년
 그림 11. 2023년, 2024년 군산에서의 이화명나방 성충 발생 양상(성페로몬 트랩).
 [군산기술센터 자료 이용 작성]

② 군산에서의 연중 발생 세대수 추정

① 연 2세대 추정

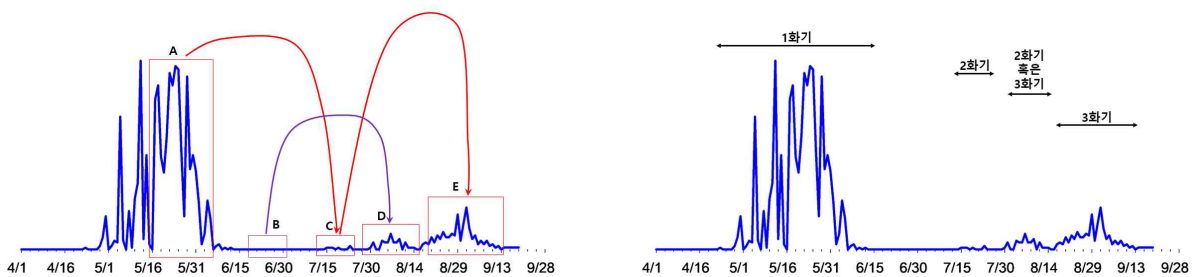
- 과거와 같이 1년에 2번 성충이 발생한다고 가정하면, 군산 지역에서 1화기 성충이 6월 중순까지 발생을 완료하고, 7월부터 9월까지 관찰되는 성충들 피크 모두는 2화기 성충에 해당함.
- 이 경우 1세대(2화기 성충이 되는 세대)의 미성숙태(알, 유충, 번데기) 기간이 매우 길어지는 개체변이가 상당한 비율로 나타나야 되고, 이는 실제 이화명나방이 이런 속성을 지니고 있는가에 대한 의문이 제기될 수 있음.
- (참고) 이화명나방이 먹이 종류(벼의 생육단계 혹은 영양원 종류)에 따라 발육기간이 크게 차이 나는 현상을 환경변화에 적응을 잘하는 속성으로 규정하

여, 이를 이화명나방이 과거 대발생하는 원인이었다고 고찰한 연구자도 있음.

- 연중 2세대 가설과 월동유충 생성 추정 시기를 같이 고려하면, 2세대 유충(2회기 성충 자손)은 모두 월동유충으로 발전하게 됨(그림 13). (7월 중하순에 발육을 시작하는 유충들도 모두 월동하는 것으로 간주)
- 이 경우, 2회기 성충 발생 밀도는 그 해 수확량에 영향을 미치는 2세대 유충 밀도 및 이듬해 발생할 1회기 성충 밀도를 구성하는 월동유충(2세대)에 관련되어 방제를 위해 고려할 요인이 됨.

㉞ 연 3세대 추정

- 이화명나방 발육기간의 변이가 먹이원에 의해 크게 차이나는 것을 인정하지 않고, 온도와 발육속도의 관계로만 이화명나방 세대가 진전하는 것을 규정할 때, <그림 12>(2024년 군산 예)에서 A시기의 발생 성충이 C시기의 다음 세대 성충으로 진전하고, C성충은 다음세대 E성충으로 진전하는 것으로 추정됨.
- D시기 성충은 B시기 성충으로부터 추정된 세대이나, 실제 관찰되지는 않았음. 따라서 D시기 성충의 기원이 애매함.
- 이 가설에 따라 성충 회기를 구분하면, 1회기(4월 하순~6월 상중순), 2회기(7월 중순~8월 상중순), 3회기(8월 상중순~9월 중하순)으로 구분되고, 8월 상중순의 시기는 2회기와 3회기가 겹치는 시기로 추정됨.
- 이때, 연중 3세대 가설과 월동유충 생성 추정 시기를 같이 고려하면, 2세대 유충(2회기 성충 자손) 중 일부가 그해 3회기(2세대) 성충으로 출현하고, 다른 일부는 월동하여 이듬해 1회기(이 경우 월동한 2세대) 성충으로 출현함. 3세대 유충(3회기 성충 자손)은 모두 월동하여 이듬해 1회기(이 경우는 월동한 3세대) 성충으로 출현함(그림 13).
- 이 경우, 2회기 성충 발생 시기는 그해 안에 다음 세대 성충을 발생시키기 때문에 연중 2세대 가설 경우의 2회기 성충과는 다른 속성을 갖게 됨.



(A) 성충 피크별 세대 진전 추정 결과 (B) (A) 결과로 추정된 성충 발생 회기
 그림 12. 군산에서 이화명나방 성충 발생횟수를 3회로 가정했을 때의 성충 세대 구분

(2024년 산북 2479 자료)

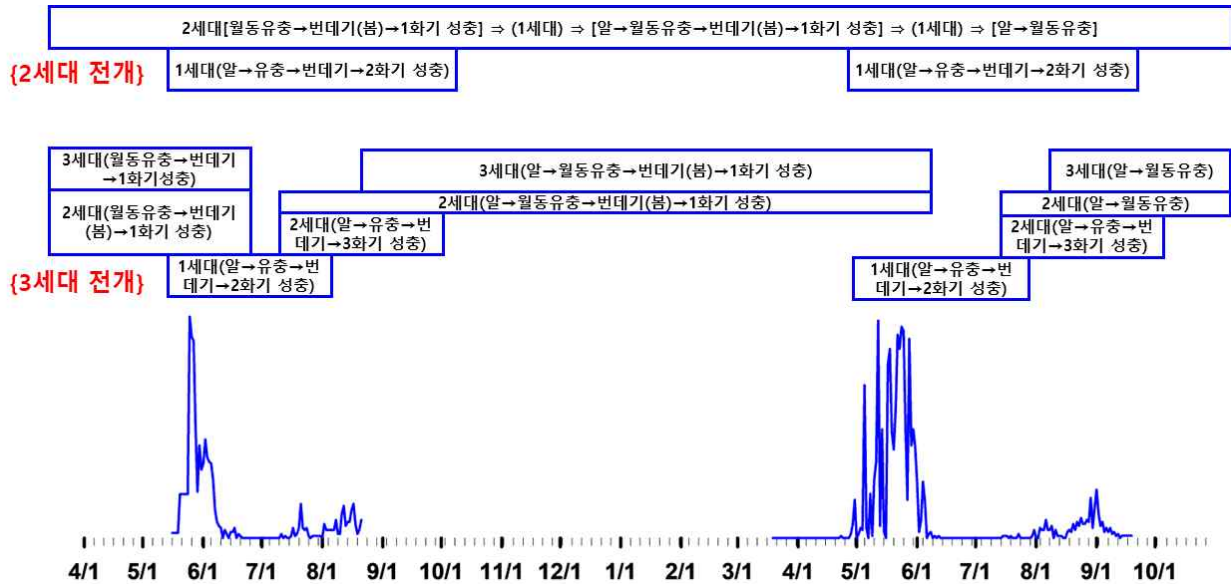


그림 13. 군산에서 2년에 걸쳐 이화명나방의 세대가 전개되는 과정
(1년에 2세대 혹은 3세대 가정)

8. 이화명나방 다발생 원인 추정 결과 요약 및 고찰

1) 이화명나방 다발생 원인 추정 결과 요약

- (1) 군산 특정 지역들은 2모작 비율이 높아 생육시기가 다른 벼들이 공존하며, 이는 이화명나방 1세대 및 후세대(2세대 혹은 3세대까지) 유충에게 양질의 먹이원이 계속 제공될 수 있는 환경임. 즉, 어떤 요인에 의해서 밀도가 쉽게 증가할 수 있는 잠재적 환경임.
- (2) 이화명나방 밀도가 갑자기 증가하고 피해가 많았던 지역은 2모작 비율이 높았던 산북동 지역이었음.
- (3) 군산 2023년과 2024년의 성충 발생 양상으로 볼 때 이화명나방의 발생량에 관계없이 연중 성충 밀도가 변화하는 양상은 포장들 사이에 유사한 것으로 조사되었음. 이는 군산의 특정 지역(미성동 일대)에 외부로부터의 갑작스런 이화명나방 성충의 대량 이입이 없었음을 보여주고 있음.
- (4) 1모작 논에서 이양기를 이른 시기로 이동하는 것은 해당 포장의 이화명나방 산란량이 증가하는 효과를 갖고 오며, 이는 밀도 증가의 원인이 될 수 있는데, 현재로서는 가장 객관성 있는 원인으로 판단됨.
- (5) 피해면적으로 1모작 논 면적이 2모작 논의 면적보다 많았음 - 6:4 정도.
- (6) 밀도 증가에 살충제 저항성 발달 가능성이 관여될 수 있는지는 추후 연구 및 검토가 더 필요하다고 판단됨.
- (7) 현재의 문제가 생기기 이전에는 이화명나방 피해 문제가 대두되지 않았기 때문에 (아마 적어도 10년 정도), 이제까지의 해충 방제 체계는 다른 해충들을 대상으로 구성되었을 것으로 추정됨.

2) 최근 군산지역 이화명나방 밀도 증가의 진행 과정 추정 고찰

- 이상을 종합하여 아래와 같이 군산 이화명나방 밀도 증가 과정을 추정하였음.
- (1) 늦어도 2021년 이전 해부터 산북동 지역에서 이앙일을 앞당긴 논에서 이화명나방 밀도가 증가하였고, 이후 그 증가 경향이 현재까지 지속되었다고 추정됨.
 - 이화명나방의 발생이 산북동 지역에 특히 많은 것에는 이 지역의 2모작 비율이 50~60% 정도로 커 생육시기가 다른 벼가 혼재하여, 결국 이화명나방 영양 공급원이 적절하게 배치되어 있는 환경이 크게 기여하였을 것으로 추정됨.
- (2) 처음 피해가 관찰된 해는 2021년이고, 피해는 7월 중순 원산북지역에서 발생했는데 그 피해 포장들은 이앙시기가 늦은 2모작 재배지(군산센타 자료)이고, 어린 벼의 피해가 쉽게 인지될 정도로 밀도가 증가한 것을 의미함. 이 피해는 이앙 후 논에 침투한 성충이 낳은 자손 유충에 의해 발생했을 가능성이 큰데, 이 성충의 기원이 애매함(현재 가장 불확실한 상황임). 이는 (가정하여) 2023년이나 2024년처럼 6월 초에 성충 발생이 대부분 종료되었던 것과 같이 당시 성충 발생이 거의 종료된 상태였다면 이와 같은 피해가 발생하기는 불가능하였다고 판단됨. 결국 2모작 논에서 7월 중순의 피해가 발생하려면 6월 중순~7월 초 사이에는 월동세대 성충이 많은 양으로 관찰되어야 하고, 당시의 해당포장 혹은 인근 포장의 월동밀도가 높았어야 함. 현재 당시의 성충 발생 자료나 피해의 정확한 성질을 알 수 없어 추정이 어렵고, 추후 자세한 조사가 요구됨. 참고로 위에서 보기로 든 1988년 광주에서 6월 15일과 6월 30일 이앙한 논에서도 피해가 어느 정도 발생하였는데 이는 적어도 6월 30일까지 1화기 성충 밀도가 높은 상태로 유지되었기 때문으로 보임(표 7; 그림 7). 한편 한 세대를 더 지나면서 밀도가 증가된 다음 세대 유충(현 피해를 준 유충이 자라 성충이 된 후 낳은 자손)은 대부분 월동유충으로 발달했을 것으로 추정되고, 이는 월동유충 집단의 밀도 형성에 보태져 2022년 1화기 성충 발생 밀도에 크게 기여했을 것으로 짐작됨.
- (3) 2022년은 피해 면적이 급격하게 늘어난 해인데, 피해 발생 시기에 대한 구체적인 자료가 없으나, 2021년 급격히 증가한 월동세대 성충의 산란량과 부화 유충 밀도가 원인이 되었을 가능성이 큼. 또 주로 1모작 논의 조기이앙(5월 30일 이전 이앙) 논에서 6월 말에 피해가 발생하였던 것은 앞에 분석한 것처럼 조기재배 논에서는 이앙시기가 빨라짐에 따라 이화명나방 산란량 제거 효과가 낮아진 것과 직접적 관련이 있다고 판단됨.
- (4) 2023년과 2024년 성페로몬트랩 포획수로부터, 적어도 산북동 지역에서는 1모작, 2모작 논 모두 1화기 발생량이 매우 컸고, 이는 이전 월동세대 유충 밀도에서 기인된 것은 의심할 여지가 없음. 이는 이화명나방 밀도의 증가하는 경향이 그대로 유지되었다는 것을 나타냈고, 결국 해당 지역의 생육시기가 다른 벼의 혼재 환경이 이화명나방 밀도 유지에 직접 반영되었다는 것을 의미함.
- (5) 한편, 2024년의 산북동 2모작 논과 개정면 윤희리 1모작 논에서 성충 포획수가 2023년보다 월등히 증가하였는데, 이는 이화명나방 밀도 증가 현상이 지역적으

로도 확산되고 있다는 것을 의미함. 단 해에 따라 (불확실한 원인에 의해) 해충 밀도의 변동이 큰 경우가 종종 관찰되기에, 이런 한 해 사이의 증가가 전체적인 밀도 증가 현상이라고 판단하기에는 아직 이룸.

(6) 마지막으로 논 이모작 비율이 높은(50~60%) 산북동 지역과 같은 상황에서 이화명나방이 서식/이동하는 과정과 피해 발생 양상을 아래와 같은 가설로 제시함 (그림 14).

- 1모작 논은 월동유충은 이듬해 1화기 성충으로 출현하고 1세대 유충을 생산함. 이때 이앙기가 빨라짐에 따라 산란되는 양이 증가하여 1세대 유충 밀도가 높아지게 됨.
- 한편 2모작 논은 월동유충도 이듬해 1화기 성충으로 출현하는데 월동세대의 대부분이 발생할 수 있음. 그러나 산란할 때는 2모작 논에는 보리가 자라고 있어 적절한 산란처가 아니고, 1모작 논은 이앙기 이후에 산란에 적절한 모가 자라고 있기 때문에 2모작 논에서 출현한 성충의 많은 수가 1모작 논으로 이동하여 산란하고 1세대 유충을 생산함.
- 논 주변의 갈대 혹은 줄과 같은 월동기주에 서식했던 월동유충에서 출현한 1화기 성충도 1모작 논으로 이동하여 산란함. 많은 수는 아닐 것으로 추정됨.
- 1모작 논에 집중된 1화기 성충의 자손인 1세대 유충은 밀도가 증가한 상태로 가해하고, 어느 수준 이상이면 눈에 쉽게 띄는 피해로 나타나게 됨.
- 한편, 2모작 논에서는 이앙기가 늦음에 따라 1화기 성충이 거의 사라진 상태에 있게 되고, 산란량이 적어 다음 세대 유충 밀도가 낮아지고 1세대 유충 피해가 거의 나타나지 않을 것으로 추정됨.
- 1모작 논은 1세대 유충은 2화기 성충으로 발전하고, 이들은 1모작 논과 2모작 논으로 이동하여 산란할 수 있음. 이때 2모작 논으로 이동한 성충의 수와 산란수가 많고(유인 작용이 관여할 경우), 산란된 알과 유충의 생존률이 높다면(영양 가치가 높을 경우) 2세대 유충에 의한 피해가 발생하게 됨. 1모작 논에 산란되어 부화한 2세대 유충 역시 1모작 논에서 피해를 일으킴.
- 2세대 유충의 일부는 월동유충으로 발전하고, 다른 일부는 성충(3화기)로 발전함.
- 3화기 성충은 2화기 성충과 마찬가지로 1모작과 2모작 논으로 이동하여 산란할 수 있는데, 역시 산란에 더 적절한(즉 유충이 월동유충까지 발전하게 될) 벼에 더 끌리게 됨(아마도 생육이 늦은 2모작 논).
- 3화기 성충(8월 말~9월 중순)은 생식력을 발휘할 수 있어 산란을 함. 이 성충은 더 적절한 산란처에 산란하고, 여기서 부화한 유충의 상당수는 모두 월동유충으로 발전하게 됨. 너무 늦게 부화한 유충은 월동유충(노숙유충) 상태까지 가지 못하고 사망함.
- 수확이 시작되면 밀동에 남겨진 유충과 떨어진 유충들은 벼 잔재물의 줄기 안에서 월동하고, 일부 유충들은 인접지(수로 등)의 월동기주(갈대나 줄)로 기어서

이동하여 월동기주 안에서 월동하게 됨(많은 수는 아닐 것으로 짐작하나 본논의 밀도 형성에 단초가 될 수 있음).

- 월동유충은 이듬해 다시 1화기 성충으로 출현하여 위의 과정을 반복하는데, 1화기 성충 출현일이 빨라질 정도의 온도 상승이 있는 연도라면 온도에 의한 생존성 증가 가능성 때문에 밀도가 더욱 증가할 수 있음.

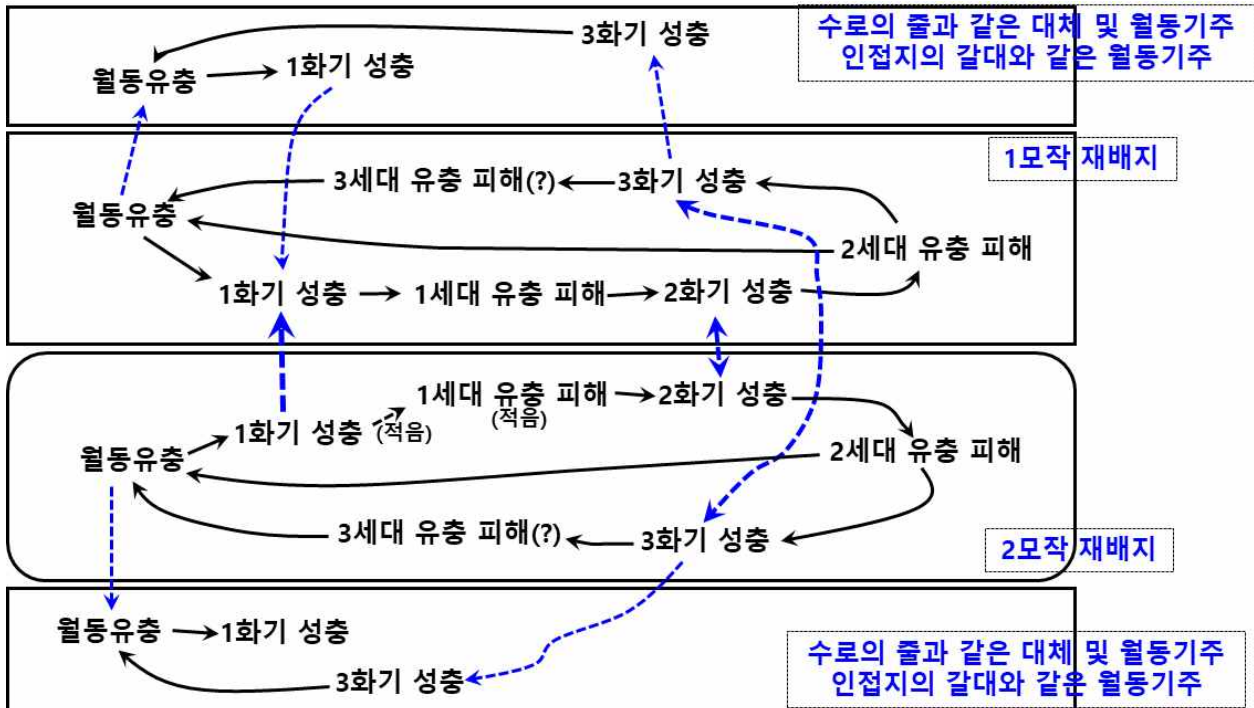


그림 14. 군산 1모작/2모작 혼재지에서 이화명나방 이동 가설
 실선은 같은 논 포장에서의 이동, 점선은 포장 사이의 이동, 굵은 점선은 중요한 성충 이동

다. 군산지역 방제적기 재설정

1. 살충제 이용 방제에서 고려되어야 할 중요 요소들

1) 방제 대상

- 현재 나방류에 대해 상용화된 살충제의 대부분은 유충 대상 살충제임.
- 따라서 이화명나방 유충(애벌레)이 방제 대상임.
- 나방 유충의 경우 영기가 진행될수록 살충제에 대한 감수성이 떨어지는 경우가 많아, 결국 같은 농도의 살충제는 늦은 영기의 유충들보다 어린 영기의 유충들에 대해 살충력이 더 강한 경향이 있음. 따라서 가급적 높은 방제효과를 얻기 위해서는 어린 유충들을 대상으로 살충제를 처리하는 것이 유리함.
- 이화명나방 유충은 은폐된 곳에서 섭식하는 습성이 있고, 어느 영기가 되면 벼 줄기 안으로 들어가 안에서 줄기 조직을 섭식함(앞의 거의 2에서 기술하였듯이 줄기 안으로 들어가는 유충 영기에 대해서는 다른 주장들이 있음).
- 접촉독 살충제는 줄기 안 유충에 직접 닿지 않고, 유충도 안에서 섭식하기 때문에 방제효과가 떨어짐.
- 이화명나방 유충은 알에서 부화한 후 줄기에 침투하기 전에 엽초와 줄기 사이에 은폐하여 섭식하기 때문에, 이 공간의 유충들을 대상으로 살포하는 것이 유리함.
- 결국 1령 혹은 1~3령 유충들이 방제 대상이 되어야 함.

2) 방제 시기

(1) 이화명나방 발생 조사 대상

- 어린 유충의 밀도가 어느 수준에 도달하여 방제가 요구되는 시점을 알기 위해서 유충 단계나 그 전단계인 알의 밀도 변화를 조사하여야 함. 그러나 그 결과를 이용하여 방제를 해야 하는 경우 방제를 준비할 수 있는 시간적 여유가 많지 않으며, 자료 수집에 요구되는 전문성을 가진 노동력 확보도 어려워 현실적으로 실행하기 어려움.
- 대신 유충의 어버이 세대인 성충은 전문가가 아니더라도 성페로몬 트랩 혹은 유인등 트랩으로 더 쉽게 밀도 조사가 가능함. 즉, 성충 포획용 트랩에서 얻어진 성충 밀도 변화 자료를 기준으로 그 자손인 어린 유충의 출현 시기와 발생량을 예측하거나, 방제 효과가 가장 좋은 시점을 결정하는 등의 방제에 관련된 정보를 추출할 수 있음.
- (참고) 일본에서는 이화명나방 성충 발생시기를 유인등트랩과 성페로몬트랩이 동일하게 나타낸다고 판단하였음[Kiritani와 Tatsuki(Eds), 2009].

(2) 성충 발생 밀도 조사를 위한 조사 간격

- 성충 밀도 변화 양상은 1일~수일 간격으로 트랩에 포획된 성충 수를 조사하면서 알 수 있는데, 이때 이화명나방 유충 방제시기 결정에 필요한 성충 조사 간격 한계에 대해서는 뚜렷하게 정의된 지침은 없음.

- 단, 아래 ‘최대발생일’에 대한 개념으로 볼 때, 과거 5일 간격의 조사를 권장하였던 것으로 보임(국내 몇 보고서에는 1, 5, 7, 10일 간격 조사 등이 있음).
- (참고) [최대발생일] : 연속 5일간의 포획수(성충) 합계가 최대였던 기간의 중간일 : 한 등(1975)에 의하면, 1970년대 국내에 이미 보급된 개념으로 보임. 이 개념은 실용적으로 사용되어 이화명나방 방제 적기의 기준시점으로 쓰일 때는 반드시 결정되어야 할 시기임. 밀도 변동 전개 모습과 과거의 경험을 이용하여 세대 종료 및 방제시기를 결정하기 전에 최대발생일을 찾을 수 있음. 단 현재 기술 수준으로는 이 최대발생일을 예측하여 추정하기는 어려움.
 - : 군산지역에서 이화명나방의 1화기 성충 최대발생일은 누적 50% 발생일보다 며칠 뒤에 나타나는 경향임.
- (참고) [누적 50% 발생일] : 그 세대의 첫 발생일부터 마지막 발생일까지 포획수(성충)를 누적하여 그 수가 그 세대 총 발생수의 50%가 되는 날. 그 발육태의 세대가 종료되지 않으면 얻지 못하는 개념이나, 그 세대의 시간적 위치를 규정하는 데 필요한 유용한 기준임. 따라서 예측에 종종 이용되는 개념임.
- (문제점) 이화명나방 1화기 성충이 넓은 간격으로 2번 이상의 피크를 보이는 경우 혹은 매일 조사할 때 주 발생시기와 며칠 떨어진 날에 가장 큰 피크를 보이는 경우와 같이 상식적으로 최대발생일 결정이 어려운 경우가 있음.
 - : 한 등(1975)은 1972~1974년 청주지방에서 순별(10일) 조사로 4월 상순~7월 상순 사이에 넓은 간격으로 2개의 큰 피크가 형성되는 것을 관찰하였고, 어느 시점을 최대발생일로 설정할 것인가에 대한 의문을 제기하였고, 결국 이양일을 고려하여 늦은 시기의 피크를 최대발생일로 선택하였음.
 - : 최대발생일을 결정하는 방법에 대해 과거의 예 하나를 위에 설명했으나, 그 날을 결정하고 밀도 변동 모습을 파악하기 위해 조사 자료를 수집하고 처리하는 방법에 대해 뒤의 <보충자료> [이화명나방 성충 발생 조사 간격과 최대발생일을 규정하는 방법]에 별도로 제시하였음.

(3) 방제 적기

- ① 그간 성충 최대발생일을 기준으로 수일 간격을 두어 살충제를 처리하고 그 중 가장 효과가 높은 시기를 방제 적기로 규정하여 왔음.
- ② 그 결과에 따라 이화명나방 1세대 유충에 대해서는 1화기 성충 최대발생일을 기점으로 14일 후부터 7일 이내, 2세대 유충에 대해서는 2화기 성충 최대발생일 7일부터 7일 이내 살포를 권장하여 왔음(한 등, 1972; Kiritani와 Tatsuki(Eds), 2009).
 - (일본 나가노현의 연구 예) 트랩 자료의 성충 변화 양상이 성충의 우화 양상과 거의 일치하고, 갓 부화한 유충 최대발생기가 1화기 성충 최대발생일 15일 후가 되는 것이 증명되었음. 방제실험에서는 성충 최대발생일 15~20일 후가 방제효과가 가장 컸음[Kiritani와 Tatsuki(Eds), 2009].
- ③ 이처럼 시기별(성충 화기별) 방제 적기가 다른 것은 그 시기 그 지역의 환경에

서 이화명나방이 자라는 속도, 즉 성충→알→갓 부화유충이 출현하는 속도가 다르기 때문임. 이는 주로 온도의 영향을 받음.

- ④ 따라서, 특정 단계의 유충 출현 시기를 대상으로 방제 적기를 구하고자 할 때는 당시의 해당 지역 기온을 이용하여, 성충 최대발생일부터 유충 출현일을 추정하는 것이 더 정밀성이 높음.
 - (참고) 방제적기를 결정할 때는 이를 추정하는 날까지는 그해 해당지역(혹은 해당 포장)의 기온을 이용하고, 앞으로 방제적기까지 필요한 며칠은 예상기온(예를 들면, 과거 4-5년 정도 기온의 매일 평균값 등)을 이용하여 방제적기를 예상할 수 있음.
- ⑤ 한편, 1화기 성충 최대발생일은 해에 따라 달라지는 경우가 종종 있고, 전년도와 일주일 이상의 편차도 보일 수 있음. 이는 성충 발생 전까지 기온이 연도별로 다르기 때문임. 따라서 정해진 날짜를 방제 적기로 고정시키면 경우에 따라 방제효과가 감소하는 결과를 초래할 수 있음.
- ⑥ 매년 성충 최대발생기를 파악한 후에 갓 부화유충이 나오는 시기를 추정하여 방제일을 결정하는 것이 방제 적기 정밀성을 높일 수 있음.

3) 방제가 필요한 밀도(요방제 수준)

- 본 연구에서는 유충 밀도(혹은 알 밀도) 대신 간접적으로 성충 수를 방제에 필요한 밀도로 이용한 과거 일본의 연구 사례를 아래 제시하고자 하였음.
- 성충 수를 이용하는 것이 편리한 장점이 있으나, 지역과 재배환경에 따라 그 기준이 달라질 수 있으니, 앞으로 국내에서 기준을 확립하는 연구 등이 필요함.

(1) 성페로몬트랩 포획수 기준 사례 1

(일본 오카야마, 1990-1991 실험) (Kondo와 Tanaka, 1995)

- 이앙일 : 6월 9~18일 (품종 Akebono)
- 페로몬 미끼 조성: 0.6 mg [(Z)-11-hexadecenal : (Z)-13-octadecenal : (Z)-9-hexadecenal = 48:6:5] + 0.06 mg [butyl hydroxytoluene] (상용품)
- 트랩 종류, 끈끈이트랩; 트랩 설치, 5월 7~8일; 설치 개수, 포장당(크기에 따라) 2~4개 설치[1 포장 크기가 2.1~4.4 a(210~440 m²), 전체 10포장 설치]; 트랩 간격, 약 15 m; 트랩 높이, 0.5 m; 조사 기간 및 간격, 4~5일 간격으로 9월 중순까지 조사.
- 5% 수량 감소를 일으키는 피해허용 수준
 - = 1세대 유충 - 5% 피해줄기 비율; 2세대 유충 - 12.5% 피해줄기 비율
- 피해 조사: 1세대 - 8월 1~2일(속마름 조사 추정)
 - 2세대 - 10월 22~24일(수확 후 피해 줄기 조사)
- 방제가 필요한 성충 밀도(요방제 수준)
 - = 이앙 5일전부터 최대발생기까지의 누적포획수
 - = 1화기(월동세대) 56마리; 2화기(1세대) 144마리

: 트랩 자료 사용기간: 이양 5일 전부터 그 세대 종료 때까지 포획수

(2) 성페로몬트랩 포획수 기준 사례 2

(일본 니가타, 1987-1991 실험) (Kojima 등, 1996)

- 페로몬 미끼 조성: 위와 동등
- 트랩 종류, 물통트랩; 트랩 설치, 5월 7~8일; 설치 개수, 지형이 다른 3개 지역 선정, 지역당 10~15개 설치; 트랩 간격, 한 지역에서 가장 가까운 곳이 약 500 m; 트랩 높이, 0.5 m(월동세대), 1 m(1세대)
- 피해허용 수준 = 1세대 유충 - 20% 엽초변색 주(포기) 비율 (줄기가 아님)
- 방제가 필요한 성충 밀도(요방제 수준)
= 1화기(월동세대) - 6월 10일까지의 누적 포획수 800마리.

2. 1세대 갓 부화유충 발생 시기 추정

1) 최근 군산지역에서 1화기 성충 최대발생일 기준 1세대 유충 발생일 추정

- 유충 발생 시기의 추정은 1화기 성충 발생기간 전체 발생 자료를 이용하여 <보충 자료>에 제시된 세대진전 모델에 의해 수행되었음.
- 분석 조건은 이양일을 고려하지 않거나, 이양일을 기점으로 산란 양상을 추정한 후, 다시 이 산란양상을 기반으로 이양일과 1화기 성충 최대발생일 및 갓 부화 유충 발생일 사이에 형성되는 일반적 경향을 분석하였음.
- (참고) (2024년의 경우) 군산 내 여러 지점에서의 1화기 성충의 누적 50% 발생일이나 최대발생일이 서로 꽤 다른 것이 관찰되었음.

(1) 이양 행위를 고려하지 않고 갓 부화유충의 발생일 추정(표 11)

- 이양으로 이미 산란된 알이 제거되지 않았다고 가정한 경우로, 성충 최대발생일 부터 갓부화 유충이 누적 50% 혹은 최대로 발생하기까지는 평균 약 13일 소요된다고 추정되었음.
- 변이폭은 누적 50% 유충발생일을 구하는 경우가 더 컸음.

(2) 이양일부터 새로운 산란이 시작된다고 가정할 때, 이양일에 따른 갓 부화유충 발생일 추정(군산에서 재배되는 벼의 주요 이양시기에 맞추어 추정하였음)

① 5월 25일 이양(표 12)

- 성충 최대발생일부터 갓 부화유충 누적 50% 혹은 최대발생일까지는 평균 약 15일 소요된다고 추정되었음.
- 이양일부터 갓 부화유충 누적 50% 혹은 최대발생일까지는 평균 약 15.5일 소요된다고 추정되었음.
- 이 시기 이양은 이양 효과를 고려하지 않았을 때에 비해 유충이 평균 약 74%로 감소하여 발생할 것으로 추정되었음.

표 11. 군산에서 이화명나방 성충밀도 변화 양상으로부터 이앙일의 유충 제거 효과를 무시하고 1세대 갓 부화유충 발생일을 추정한 결과

트랩 지점	연도	1화기 성충 발생기	1화기 성충 포획수	성충 발생일		갓부화유충 발생일		성충 최대발생 후 유충발생까지(일)	
				50%	최대	50%	최대	50%	최대
산북 2479	'23	(5/19) ¹⁾ -6/20	869	(5/27) ¹⁾	5/26	6/9	6/9	14	14
산북 3405	'23	(5/16)-6/16	190	(5/29)	5/28	6/10	6/10	13	13
개정 운회 1099	'23	(5/27)-6/17	16	(5/30)	5/29 ^{2),3)}	6/11	6/10	13	12
대야 지경 2092	'23	(5/28)-6/16	24	(6/3)	6/1 ²⁾	6/15	6/12	14	11
산북 2314	'24	4/23-6/14	872	5/29	5/30	6/11	6/14	12	15
산북 2479	'24	4/23-6/12	1,539	5/21	5/23	6/5	6/7	13	15
산북 3405	'24	4/22-6/12	568	5/24	6/1 ³⁾	6/8	6/14	7	13
개정 운회 1099	'24	5/2-5/31	64	5/18	5/19	6/1	6/3	13	15
대야 지경 2057	'24	5/2-6/4	452	5/17	5/18 ³⁾	6/1	5/30	14	12
회현 학당 1878	'24	5/1-6/9	240	5/15	5/18 ³⁾	5/31	5/30	13	12
평균±표준편차								12.6±2.1	13.2±1.5
변이계수								0.16	0.11

¹⁾2023년은 첫발생일과 50% 발생일을 특정할 수 없음.

²⁾발생량이 매우 적어 최대발생일에 대한 신뢰성 작음.

³⁾1주에 한번 조사하는 경우로 가정하여 결정.

표 12. 군산에서 이화명나방 성충밀도 변화 양상으로부터 5월 25일 이앙할 때 1세대 갓 부화유충 발생일을 추정한 결과

트랩 지점	연도	1화기 성충 최대발생일	유충수 상대비 (%)	갓부화유충 발생일		성충 최대발생 후 유충 발생까지(일)		이앙 후 유충 발생까지(일)	
				50%	최대	50%	최대	50%	최대
산북 2479	'23	5/26	97	6/9	6/9	14	14	15	15
산북 3405	'23	5/28	96	6/10	6/10	13	13	16	16
개정 운회 1099	'23	5/29	100	6/11	6/10	13	12	17	16
대야 지경 2092	'23	6/1	100	6/15	6/12	14	11	21	18
산북 2314	'24	5/30	89	6/11	6/14	12	15	17	20
산북 2479	'24	5/23	65	6/8	6/7	16	15	14	13
산북 3405	'24	6/1	74	6/11	6/14	10	13	17	20
개정 운회 1099	'24	5/19	39	6/5	6/4	17	16	11	10
대야 지경 2057	'24	5/18	41	6/7	6/5	20	18	13	11
회현 학당 1878	'24	5/18	37	6/9	6/10	22	23	15	16
평균			74.0±26.5			15.1±3.7	15.0±3.5	15.6±2.7	15.5±3.4
변이계수			0.36			0.24	0.23	0.17	0.22

② 6월 1일 이앙(표 13)

- 성충 최대발생일부터 갓 부화유충 누적 50% 혹은 최대발생일까지는 평균 약 17~18일 소요된다고 추정되었음.
- 이앙일부터 갓 부화유충 누적 50% 혹은 최대발생일까지는 평균 약 10~11일 소요된다고 추정되었음.
- 이 시기 이앙은 이앙 효과를 고려하지 않았을 때에 비해 유충 밀도는 평균 약 48%로 감소하여 발생할 것으로 추정되었음.

표 13. 군산에서 이화명나방 성충밀도 변화 양상으로부터 6월 1일 이양할 때 1세대 갓 부화유충 발생일을 추정된 결과

트랩 지점	연도	1화기 성충 최대발생일	유충수 상대비 (%)	갓부화유충 발생일		성충 최대발생 후 유충 발생까지(일)		이양 후 유충 발생까지(일)	
				50%	최대	50%	최대	50%	최대
산북 2479	'23	5/26	57	6/13	6/10	18	15	12	9
산북 3405	'23	5/28	69	6/12	6/10	15	13	11	9
개정 운회 1099	'23	5/29	81	6/11	6/10	13	12	10	9
대야 지경 2092	'23	6/1	97	6/15	6/12	14	11	14	11
산북 2314	'24	5/30	66	6/13	6/14	14	15	12	13
산북 2479	'24	5/23	26	6/11	6/10	19	18	10	9
산북 3405	'24	6/1	49	6/13	6/14	12	13	12	13
개정 운회 1099	'24	5/19	4.7	6/11	6/11	23	23	13	13
대야 지경 2057	'24	5/18	13	6/11	6/10	24	23	14	9
회현 학당 1878	'24	5/18	21	6/12	6/10	25	23	11	9
평균			48.4±31.0			17.7±4.9	16.6±4.8	11.2±1.3	10.1±1.7
변이계수			0.64			0.27	0.29	0.12	0.16

③ 6월 16일 이양(표 14)

- 2모작 논의 이양기인 6월 16일 이양에서는 성충 최대발생일부터 갓부화유충 50% 혹은 최대발생일까지는 평균 약 28일 소요된다고 추정되었음.
- 이양일부터 갓부화유충 50% 혹은 최대발생일까지는 평균 약 7~8일 소요된다고 추정되었음.
- 이 시기 이양은 이양 효과를 고려하지 않았을 때에 비해 유충이 평균 약 2%로 감소하여 발생할 것으로 추정되었음. 이는 1화기 성충 출현이 거의 끝나는 시기이기 때문임.

표 14. 군산에서 이화명나방 성충밀도 변화 양상으로부터 6월 16일 이양할 때 1세대 갓 부화유충 발생일을 추정된 결과

트랩 지점	연도	1화기 성충 최대발생일	유충수 상대비 (%)	갓부화유충 발생일		성충 최대발생 후 유충 발생까지(일)		이양 후 유충 발생까지(일)	
				50%	최대	50%	최대	50%	최대
산북 2479	'23	5/26	2.5	6/25	6/25	30	30	9	9
산북 3405	'23	5/28	2.0	6/23	6/23	26	26	7	7
개정 운회 1099	'23	5/29	7.3	6/26	6/27	28	29	10	11
대야 지경 2092	'23	6/1	8.0	6/24	6/24	23	23	8	8
산북 2314	'24	5/30	0.6	6/22	6/23	23	24	6	7
산북 2479	'24	5/23	0.05	6/22	6/23	30	31	6	7
산북 3405	'24	6/1	0.4	6/22	6/23	21	22	6	7
개정 운회 1099	'24	5/19	- ¹⁾	-	-	-	-	-	-
대야 지경 2057	'24	5/18	0.00	6/22	6/22	35	35	6	6
회현 학당 1878	'24	5/18	0.03	6/22	6/23	35	36	6	7
평균			2.3±3.2			27.9±5.1	28.4±5.1	7.1±1.5	7.7±1.5
변이계수			1.35			0.18	0.18	0.22	0.20

¹⁾2023년 개정 운회 논에서는 이양일 전에 알 발생이 끝나 추정되지 않음.

※ 이앙일과 1화기 성층 최대발생일 및 1세대 갓 부화유충 출현일 사이의 관계

- 앞(①, ②, ③) 3종류의 이앙일별 1세대 갓 부화유충 발생일 추정에서, 이앙일이 늦어짐에 따라 <1화기 성층 최대발생일부터 유충 발생일까지의 기간>은 길어지고, <이앙일부터 유충 발생일까지의 기간>은 짧아지는 경향>이었음.
- 3개의 이앙일 비교만으로는 전체 경향을 알기 어려워, 2023년과 2024년 10개의 트랩 설치점에서 5월 15일부터 6월 24일까지 2일 간격으로 이앙일을 달리하여 유충 발생일을 추정하는 모의실험한 결과를 <그림 15>에 제시하였음.

: 이 때 공통된 변화 기준으로 이앙일 대신 <이앙일부터 성층 최대발생일까지의 기간>[즉 이앙일 빼기(-) 성층 최대발생일]을 선택하였음.

: 유충 발생일 추정은 성층 최대발생일 기점으로 <성층 최대발생일부터 유충 최대발생일까지 기간>과 <성층 최대발생일부터 유충 누적 50% 발생일까지의 기간>을 추정하였음

: 이앙일 기점으로는 <이앙일부터 유충 최대발생일까지 기간>과 <이앙일부터 유충 누적 50% 발생일까지의 기간>을 추정하였음.

[모의실험 결과 ①과 ②] 성층 최대발생일 기점 유충 발생일 추정

- ①은 유충 최대발생일, ②는 유충 누적 50% 발생일
- <이앙일이 성층 최대발생일보다 빠르거나 같을 때>는 <성층 최대발생일부터 유충 발생일까지의 기간>은 약 13일로 일정한 경향임(그림 15 A와 B, 표 15). 이 경향은 이앙일을 가정하지 않고 예측되는 유충 발생기와 유사하였음(표 11).
- <이앙일이 성층 최대발생일보다 늦을 때>는 <성층발생일부터 유충 발생일까지의 기간>이 증가하는 경향으로 선형방정식으로 추정할 수 있었음(그림 15 A와 B, 표 15 ①과 ②).

[모의실험 결과 ③과 ④] 이앙일 기점 유충 발생일 추정

- ③은 유충 최대발생일, ④는 유충 누적 50% 발생일
- <이앙일이 성층 최대발생일보다 빠르거나 7일까지 늦을 때>는 <이앙일부터 유충 발생까지의 기간>은 선형방정식으로 추론한 것처럼 감소하였음(그림 15 C와 D, 표 15 ③과 ④).
- <이앙일이 성층 최대발생일보다 8일 이상 늦을 때>는 <이앙일부터 유충발생일까지의 기간>은 약 7.9일로 일정한 경향이었음(그림 15 C와 D, 표 15).

[모의실험으로부터 결론]

- <성층 최대발생일부터 유충 최대발생일까지의 기간>으로 갓 부화유충 발생일을 추정할 경우, 이앙일과 성층 최대발생일 사이를 규정짓는 기준이 단순하고, <이앙일이 성층 최대발생일보다 빠르거나 같을 때>의 고정된 값 평균에 대한 변이계수가 다른 경우보다 제일 작고, <이앙일이 성층 최대발생일보다 늦을 때>의 선형방정식에서도 신뢰계수가 제일 큰 편으로 현장에서 사용하기 편함.

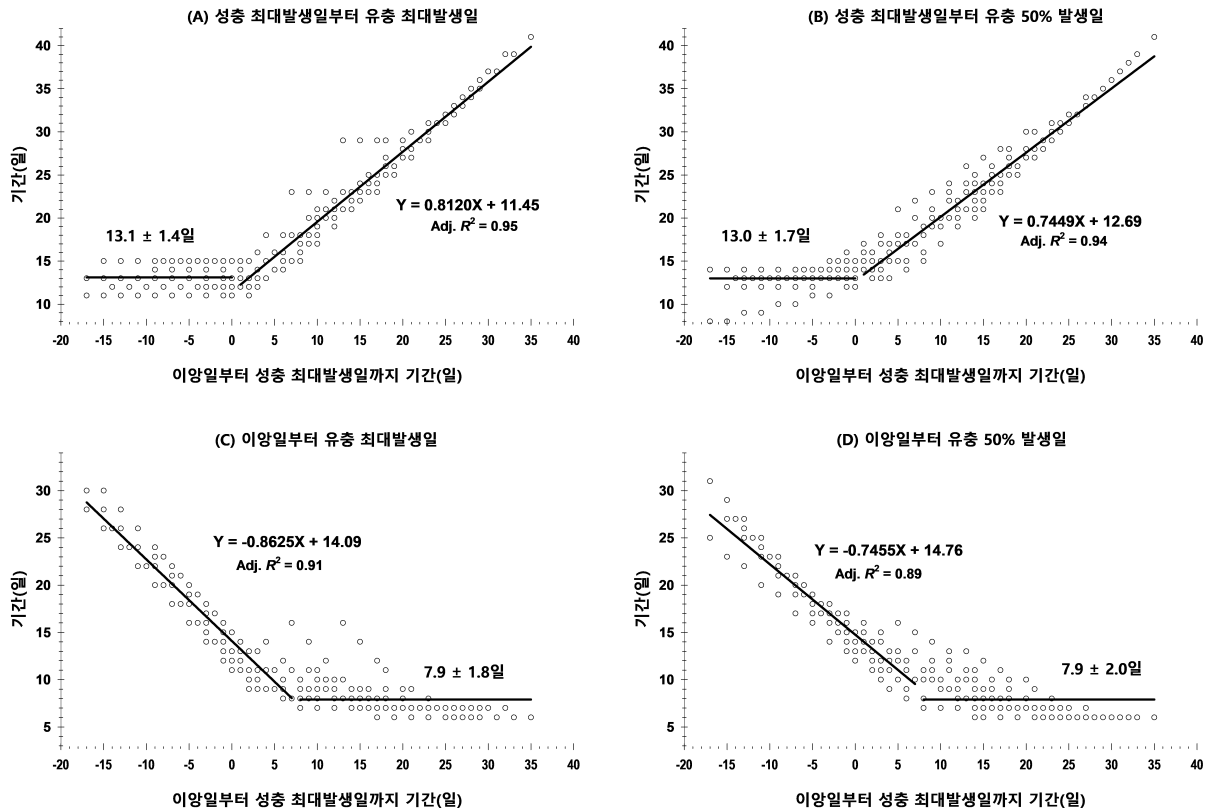


그림 15. 이앙일부터 1화기 성충 최대발생일까지의 기간에 따라, 성충 최대발생일부터 유충 발생일까지(A와 B) 및 이앙일부터 유충 발생일까지(C와 D) 기간 추정 및 경향모델[A와 C는 유충의 최대발생일까지, B와 D는 유충 누적 50% 발생일까지].

표 15. 군산에서 이화명나방 성충 최대발생일 기준 혹은 이앙일 기준 갓부화유충 출현일을 추정하는 방법

이앙일과 성충발생일의 관계	성충 최대발생 후 유충발생까지(일)		이앙 후 유충발생까지(일)	
	누적 50%	최대	누적 50%	최대
이앙일이 성충 최대발생일보다 빠르거나 같을 때	13.0±1.7 ¹⁾ [8~16] ²⁾ (0.13) ³⁾	13.1±1.4 [11~15] (0.11)	-	-
이앙일이 성충 최대발생일보다 늦을 때	증가형 선형함수 ㉑	증가형 선형함수 ㉒	-	-
이앙일이 성충 최대발생일보다 빠르거나 7일까지 늦을 때	-	-	감소형 선형함수 ㉓	감소형 선형함수 ㉔
이앙일이 성충 최대발생일보다 8일 이상 늦을 때	-	-	7.9±2.0 [6~14] (0.25)	7.9±1.8 [6~16] (0.23)

¹⁾평균±1표준편차; ²⁾범위(최소~최대); ³⁾변이계수

㉑ Y = 0.8120X + 11.45; ㉒ Y = 0.7449X + 12.69; ㉓ Y = -0.8625X + 14.09; ㉔ Y = -0.7455X + 14.76

※ 이앙일이 늦어질수록 1세대 갓 부화유충 제거 효과

- 앞 모의실험에서, 이앙일이 늦어질수록 알(혹은 유충) 제거 효과에 의해 발생할 유충 수는 sigmoid 형태로 감소하게 됨(그림 16). 따라서 이앙일이 늦어지는 경우에는 성충 산란양 변화를 고려하여 방제 여부를 결정하는 것이 요구됨.

: 가령 2모작 논의 이앙기는 6월 중하순에 형성되므로 본 연구에서의 추정에 기초한다면, 1화기 성충 발생이 거의 끝나거나 끝난 후이므로, 후대 밀도가 매우 적어지게 되고 1세대 유충에 대해서는 방제할 필요성이 없어지게 됨.

: 앞으로 이 추정에 대해 실험적 증명이 필요함.

: 농업 현장에서는 <그림 16의 B> 그림과 같이 선형방정식으로 작성되는 모델도 신뢰계수가 높은 편으로 사용하기가 더 편리할 것으로 생각됨.

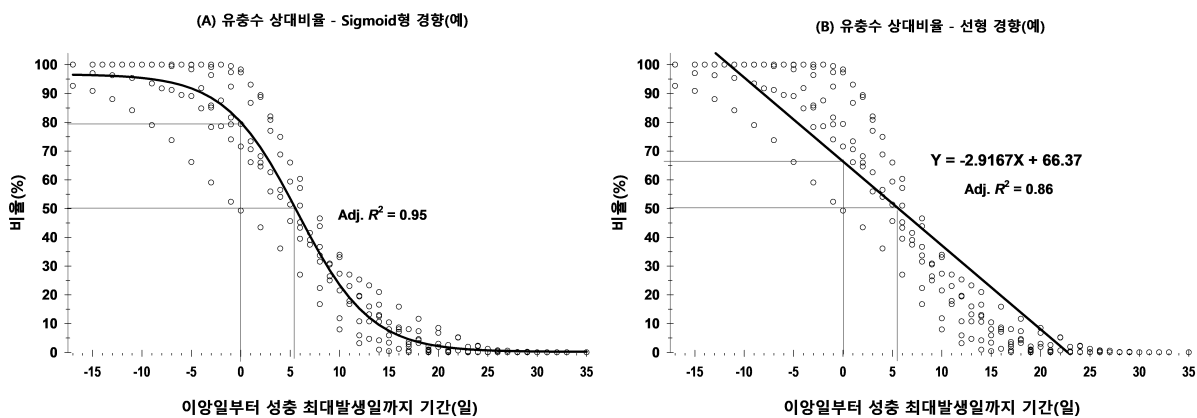


그림 16. 이앙일부터 1화기 성충 최대발생일까지의 기간에 따른 유충 생존비율 추정

2) 과거 1세대 유충에 대한 방제 적기 연구 사례

(1) 충북 청원에서의 성충 최대발생일 기준 방제적기 선택 연구(한 등, 1972)

- 유인등트랩으로 매일 조사된 성충 발생양상으로부터 성충 최대발생기를 결정하고(그림 17),
- 이를 기준으로 시기별로 살충제를 처리한 결과, 성충 최대발생일로부터 14~21일 후에 방제 효과가 가장 크다는 결과를 도출하였음(표 16).

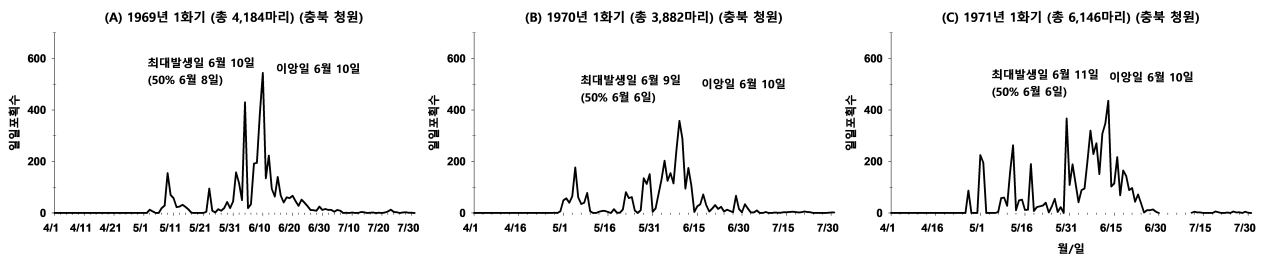


그림 17. 충북 청원에서 1969~1971년 매일 조사된 이화명나방 성충 발생모습.

[한 등(1972)의 매일 조사 자료 이용 그림 구성, 최대발생일은 동 보고서 자료 인용]

표 16. 1969-1971년 충북 청원지방에서 수행된 연구에서 이화명나방 성충 최대발생일 기준으로 살충제 살포일에 따른 피해줄기 비율과 방제가

살포 횟수	살포 시기 설명	평균 살포일(일) ³⁾		피해줄기 비율(%) ⁴⁾	방제가 (%)
		1차	2차		
1회	최대발생일 ^{1),2)}	3.7	-	15.42	31.5
	최대발생일 후 7~14일	10.0	-	2.22	88.0
	최대발생일 후 14~21일	16.7	-	0.55	97.3
	최대발생일 후 21~28일	22.3	-	3.18	83.4
2회	최대발생일 + 후 7~14일	3.7	10.7	2.07	88.8
	최대발생일 후 7~14일 + 14~21일	10.7	16.7	0.68	96.2
	최대발생일 후 14일~21일 + 21~28일	16.7	22.3	0.69	96.9
무처리	-	-	-	21.57	-

¹⁾성충 최대발생일은 3년 순서대로 6월 10일, 6월 9일, 6월 11일이었음.

²⁾이양일은 3년 공통으로 6월 10일이었고, 이양일과 성충 최대발생일이 거의 일치하였음.

³⁾평균 살포일은 성충 최대발생일 후 살포일까지의 경과일수를 뜻함.

⁴⁾피해 조사는 이양 후 35일에 조사한 엽초변색줄기 비율과 속마름 줄기 비율을 합쳐 산출하였음. [한 등(1972)의 3년 자료를 통합 분석]

(2) 충북 청원에서 이양일 기준 방제적기 선택 연구(한 등, 1975)

- 1화기 성충 발생 피크가 2개 발생하는 등 성충 최대발생일을 결정하기 어려운 경우가 발생하여, 이양일을 기준으로 살포시기를 정하려는 목적에서 연구
- 결과 해석이 명확하지 않으나, 이양일의 빠르고 늦음에 따라 방제 적기가 다른 것을 주장하였음(표 17).

표 17. 이양일 기준 살충제 살포일에 따른 줄기피해율(%) (1974년, 충북 청원 실험) (괄호 안은 살포일 및 6월 9일 성충 최대발생일 후 경과일수)

이양일	이양 후 살충제 살포일까지의 기간(일)			
	7일	14일	21일	28일
5월 20일	6.09 (5/27, -13)	5.57 (6/4, -5)	3.18 (6/11, 2)	1.50 (6/18, 9)
5월 25일	5.86 (6/2, -7)	2.94 (6/9, 0)	2.07 (6/16, 7)	1.79 (6/23, 14)
6월 1일	3.91 (6/8, -1)	3.52 (6/15, 6)	2.05 (6/22, 13)	1.73 (6/29, 20)
6월 5일	2.43 (6/12, 3)	1.32 (6/19, 10)	1.08 (6/26, 17)	1.89 (7/3, 24)
6월 10일	2.51 (6/17, 8)	1.28 (6/24, 15)	1.06 (7/1, 22)	0.97 (7/8, 29)
6월 15일	0.58 (6/22, 13)	0.11 (6/29, 20)	0.21 (7/6, 27)	0.52 (7/13, 34)
6월 20일	0.36 (6/27, 18)	0.09 (7/3, 25)	0.26 (7/10, 32)	0.22 (7/17, 39)

성충 최대발생일은 6월 9일; 벼 품종은 통일벼, 푸레치렌 유제 살포

3) 월동유충의 발육과정을 모델링으로 추정하여 1화기 성충 출현시기 예측

- 1화기 성충의 출현일(예, 누적 50% 발생일)이 언제쯤 될 것인지 예측할 수 있으면 성충 최대발생기를 결정하는데 도움을 줄 수 있음.
- 혹은 직접 예찰을 하지 못한 경우, 예측식을 통해 성충 누적 50% 발생일을 추정하고, 이 기준으로 다시 방제 시기를 결정할 수 있음.

- 그러나 앞에 언급한 것처럼, 1화기 성충 누적 50% 발생일이 군산 내 여러 지점 사이에 편차가 있었기때문에, 지역별 하나의 날짜만을 제시하는 예측법은 군산 각 지점별로는 정확도가 떨어질 가능성이 있음.
- <표 18>에는 여러 모델을 이용하여 추정된 1화기 성충 누적 50% 발생일과 각 트랩 설치점별로 관찰된 성충 누적 50% 관찰일과의 차이 일수를 제시하였는데, 2024년의 결과만을 갖고 분석하면, Lactin 2 모델이 차이 일수의 절대값 평균이 약 4일로 가장 작은 차이를 보여 주었음.
- 위 모델들의 유효성이 아직 정확하게 검증되지 않아, 모델만으로 성충 발생일을 추정하는 것은 불가능하나, 관찰값의 누적 50% 발생일 혹은 최대발생일을 정확하게 결정하는데는 도움을 줄 수 있을 것으로 판단됨.
- (참고) 여기서 1화기 성충 발생일은, 휴면상태가 종료된 월동유충의 온도의존 발육자료에 근거하여 몇 수리모델을 이용하여 군산지역 이화명나방 집단의 특징적인 변수를 구하여 추정함. 이에 관한 내용을 <보충자료>의 [월동유충으로부터 1화기 성충 발생일 추정 모델]에 제시하였음.
- (참고) 선형모델에서 이화명나방 월동유충이 성충까지 발육하는 기간동안의 최저 발육온도(해당 온도 이상에서만 발육)는 9.77°C로, 성충 출현시까지의 유효적산온도는 384.6°C로 분석되었음(보충자료 참고).
- (참고) 위 수리모델들을 이용하여 1화기 성충 누적 50% 발생일을 추정해 본 결과, 2019-2020년에 늦어졌다가 2021년부터 빨라지는 경향이었음(보충자료 참고).

표 18. 군산에서 2023-2024년 페로몬트랩으로 이화명나방 성충 발생수가 조사된 논별로 1화기 성충 누적 50% 발생일과 월동유충의 온도의존 발육 모델로부터의 추정된 날짜와의 차이

트랩 지점	연 도	성충 누적 50% 발생일	모델별 추정된 날짜와의 차이(추정값 - 관찰값)(일) (음수값은 모델값이 빠른 것 의미)					
			Logan 6	Briere 1	Lactin 2	선형	유효적산온도	
							평균 기온	단일사인 곡선
산북 2479	'23	(5/27) ¹⁾	-20	2	-5	2	4	-2
산북 3405	'23	(5/29)	-22	0	-7	0	2	-4
개정 운회 1099	'23	(5/30)	-23	-1	-8	-1	1	-5
대야 지경 2092	'23	(6/3)	-27	-5	-12	-5	-3	-9
산북 2314	'24	5/29	-27	1	-8	1	3	-3
산북 2479	'24	5/21	-19	9	0	9	11	5
산북 3405	'24	5/24	-22	6	-3	6	8	2
개정 운회 1099	'24	5/18	-16	12	3	12	14	8
대야 지경 2057	'24	5/17	-15	13	4	13	15	9
회현 학당 1878	'24	5/15	-13	15	6	15	17	11
절대값 평균(2024년만)	'24		18.7	9.3	4.0	9.3	11.3	6.3
표준편차	'24		5.2	5.2	2.8	5.2	5.2	3.6

¹⁾2023년은 누적 50% 발생일을 특정할 수 없음.

3. 2세대를 포함한 후대 세대 유충 대상 방제

- 2세대(혹은 3세대) 유충에 대해서는 성충 발생 시기의 전체 발생 양상 혹은 그 시기 내의 성충 최대발생일로부터 다음 세대 갓 부화유충의 최대발생일을 추정하여 방제적기를 추정할 수 있음.
- 2023년과 2024년 공통적으로 관찰된 것과 같이 1화기 이후 2023년과 2024년 공통적으로 관찰되었던 3개 기간의 성충 발생에 대해 다음 세대 갓 부화유충 발생일을 <표 19>와 같이 추정하여 제시하였음.
- 1세대 알이 발육하는 5~6월보다는 기온이 더 높은 7~9월 사이에 알 발육이 진행되기 때문에 1세대의 방제시기보다는 성충 최대 발생기로부터 상대적으로 짧은 기간 안에 방제 적기에 도달하게 됨(그림 18; 표 19).
- 즉, 이 시기 성충 피크로부터 갓부화유충의 발생일까지의 소요되는 날수는 평균 약 8일 이었음(표 19).

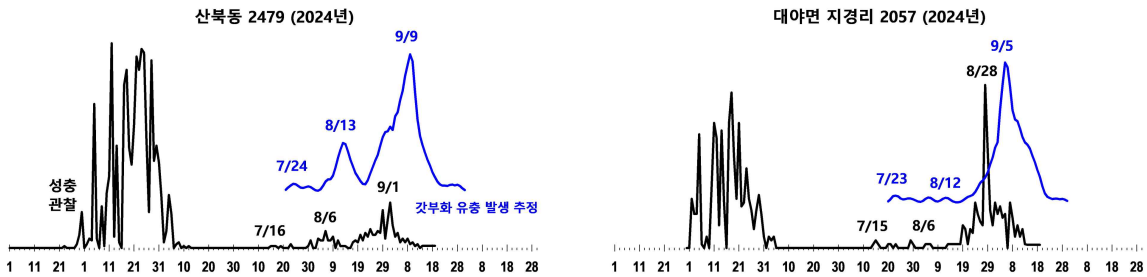


그림 18. 성충 발생 양상으로부터 2~3세대 갓부화유충 발생일 추정 (2024년 대야면 지경리와 산북동의 논 2곳의 예를 들었음)

표 19. 군산에서 2화기 및 후세대 성충의 최대발생일로부터 온도의존 발육모형을 통해 추정된 갓부화 유충 최대 발생일

트랩 지점	연 도	7월 중하순 성충			7월 말~8월 중순 성충			8월 중순~9월 상순 성충		
		성충	유충	기간	성충	유충	기간	성충	유충	기간
산북 2479	'23	7/21	7/29	8	8/12	8/20	8	- ¹⁾	-	-
산북 3405	'23	7/24	8/1	8	8/5	8/13	8	-	-	-
산북 2446	'23	7/17	7/25	8	8/16	8/24	8	-	-	-
개정 운회 1099	'23	-	-	-	8/15	8/25	10	-	-	-
대야 지경 2092	'23	7/19	7/28	9	7/28	8/5	8	-	-	-
대야 북교 1485	'23	7/22	7/30	8	8/12	8/20	8	-	-	-
회현 금광 1562	'23	7/19	7/28	9	8/10	8/18	8	-	-	-
산북 2314	'24	7/20	7/26	6	8/5	8/12	7	8/29	9/6	8
산북 2479	'24	7/16	7/24	8	8/6	8/13	7	9/1	9/9	8
산북 3405	'24	-	-	-	8/9	8/16	7	8/29	9/7	9
개정 운회 1099	'24	-	-	-	8/8	8/15	7	8/22	8/30	8
대야 지경 2057	'24	7/15	7/23	8	8/6	8/12	6	8/28	9/5	8
회현 학당 1878	'24	7/21	7/28	7	-	-	-	9/1	9/10	9
평균				7.9			7.7			8.3
표준편차				0.9			1.0			0.5

¹⁾성충 발생을 관찰하지 않았거나, 피크가 나타나지 않았음.

4. 방제적기 재설정에 관한 종합 결론과 고찰

1) 1세대 유충 대상

- 페로몬트랩으로 조사된 군산 문제 지역의 성충 밀도 변화 양상에서, 1화기 발생량이 월등히 많고 다음 세대는 상대적으로 적은 편으로 나타났음.
- 따라서 1화기 성충의 자손인 1세대 유충에 대한 방제가 요구되고 있음.
- 1세대 유충들 대부분은 월동 유충으로 발전하지 않고 성충으로 발전할 것으로 추정되었음.
- 2023-2024년 군산지역에서, 5월 중하순 경에 관찰되는 1화기 성충 최대발생일보다 이앙일이 빠르거나 같을 경우 갓부화 유충이 나타나는 시점은 성충 최대발생일부터 약 2주 후로 추정되었음.
- 이앙일이 성충 최대발생일보다 늦을 경우에는 이앙일이 늦어짐에 따라 유충 출현일도 늦어지는 것으로 추정되었고, 방제시기도 그에 맞추어 형성될 것으로 추정되었음. 단, 이앙일이 늦어짐에 따라 산란할 성충 수가 빠르게 감소하는 것으로 추정되었기 때문에 방제 여부에 대한 의사결정 기준을 만들 필요가 있음.

2) 2세대 및 후세대 유충, 월동유충

- 군산에서 1화기 이후 관찰되는 3개의 성충 발생 시기에 대해 별도로 정리하면,

(1) 7월 중하순 성충 피크

- 이 시기 성충 발생량은 2023년과 2024년 두 해의 관찰로서는 매우 작거나 없었음. 따라서 이 시기 성충들의 자손인 유충을 방제하여야 할 것인가에 대해서는 의문이 있음(피해 정도 및 후세대 증식에 관한 연구 필요).
- 연중 3세대 진전 가설에 따르면, 이 시기 피크는 2화기(1세대) 성충들의 발생이면서 3번째 공통 시기인 8월 중순~9월 상순 나타나는 성충들의 아버지 세대로 추정되기도 하였음. 이 경우 이 시기 성충으로부터 후세대 성충이 얼마나 증가될 수 있는지가 이 시기 성충들의 밀도를 평가할 척도가 될 것으로 판단되었음.
- 이시기 성충들의 자손 유충 일부는 월동 유충으로 발육할 것으로 추정되었음.

(2) 7월 말~8월 중순 성충 피크

- 한편 이시기 성충들이 발생량은 앞의 시기나 뒤의 시기의 중간 정도가 됨.
- 1화기 성충에 비해서는 월등하게 작은 규모였기 때문에 역시 방제 여부에 대한 의문이 있음.
- 이 시기 성충들의 자손, 즉 유충들은 모두 월동유충으로 발전할 것으로 추정되었음. 따라서 성충 밀도가 크면 그만큼 월동 유충 밀도도 증가하고, 이듬해 1화기 성충 발생량에 직접 영향을 미칠 것으로 추정되었음.

(3) 8월 중순~9월 상순 성충 피크

- 이 시기 성충 발생량은 앞 두 시기보다 월등히 많은 것으로 관찰되었음.
- 이 시기 성충들의 자손인 유충들은 모두 월동유충으로 발전할 것으로 추정되었고, 현재 관찰되는 성충 발생 양상으로 보면, 월동유충 구성에 큰 비율을 차지할

수 있을 것으로 추정되었음.

(4) 위 3개 시기의 성충들의 자손인 갓 부화유충은 그 시기 성충 최대발생일부터 약 8일 후에 최대로 발생할 것으로 추정되었고, 그에 맞추어 방제 시기를 선정할 필요가 있었음.

- 단 세 번째(마지막) 시기의 유충에 대해서는 수확 전 사용할 수 있는 살충제 종류를 유의하여 선정할 필요가 있음. 현재 이화명나방 밀도가 증가하여 피해가 발생하고 있는 만큼, 이 시기 성충 자손세대의 유충에 대한 방제 필요성을 고려해 보아야 할 것으로 판단됨.

(5) 월동유충의 밀도는 월동 중 월동유충의 사망률이 크지 않는 한, 1화기 성충 밀도를 그대로 반영하는 요소임. 따라서 월동중 월동유충의 밀도를 감소시킬 수 있는 방안을 고려할 필요가 있음.

3) 군산지역 벼 재배기간 중 살충제 처리시기와 이화명나방 방제와의 관련

- 현재 군산 벼 재배기간 중 처리되는 살충목적의 방제전략은 여러 해충을 동시에 방제하는 목적에서 수립되어 왔다고 생각됨.

- 현재의 이화명나방 문제가 나타나기 전의 기존의 방제체계 안에는 2차 해충인 이화명나방 중심의 해충 방제전략은 설계되지 않았을 것으로 생각됨. 따라서 기존 방제체계가 현재 문제가 되고 있는 이화명나방 밀도를 감소시키는데 크게 도움을 주지 못할 수 있음.

- 따라서, 현재 군산지역에서 이화명나방이 일시적(?)이나마 주요 해충으로 부상한 만큼, 여기서 별도로 다른 이화명나방 방제 시기를 포함하여 전반적인 해충 방제 전략을 재검토할 필요성이 있다고 판단됨.

라. 인용 및 참고문헌

- 김용현, 김홍선, 이정운, 1987. 이화명충 발생 생태 조사. 농업기술연구소 시험연구보고서(완결)(작보-농연-곤충-9), pp.394-357.
- 김은영, 박영미, 서보윤, 최낙중, 박창규, 정진교, 2024. 벼의 이화명나방(*Chilo suppressalis*)과 물억새의 나도이화명나방(*C. niponella*) (나비목: 풀명나방과)의 월동 시기. 한국응용곤충학회지 63 (인쇄중).
- 박창규, 현재선, 1990. 한국에서 이화명나방(*Chilo suppressalis* Walker) 발생상의 지역적 특성에 관한 연구. 한국응용곤충학회지. 29, 257-268.
- 백채훈, 2012. 벼 이화명나방 피해양상과 관리요령. 농업기술 552, 6-7.
- 이승찬, 박해준, 1991. 이화명나방의 발생양상 변동에 관한 연구. 한국응용곤충학회지. 30, 249-257.
- 이승찬, 마경철, 1997. 벼 기계이앙 및 직파재배에 따른 수도 주요해충의 발생 피해. 한국응용곤충학회지. 36, 141-144.
- 이준호, 1999. 해충발생동태 및 예찰모델 개발: 수원에서의 이화명나방 발생 사례. 한국응용곤충학회지. 38, 231-240.
- 정진교, 김은영, 양운호, 이석기, 신명나, 양정욱, 구홍광, 김동순, 박금, 왕계춘, 주봉, 2022. 중국 동북부 지역에서 이화명나방(*Chilo suppressalis*)(Crambidae) 2화기 성충 발생 시기 추정. 한국응용곤충학회지 61, 335-347.
- 최만영, 이휘중, 2015. 벼 주요해충 예찰기술 개발 및 피해양상 구명. 신동범(Ed.) '기후변화에 따른 식량작물 병해충 발생실태 및 피해양상 구명' 국립식량과학원 완결보고서. pp.92-103.
- 한의동, 노준철, 박재원, 1972. 이화명충 방제 한계기 시험. 충청북도농촌진흥원 시험연구보고서, pp.345-357.
- 한의동, 김후동, 노준철, 1975. 이화명충(1화기) 방제에 관한 시험. 충청북도농촌진흥원 시험연구보고서, pp.431-462.
- Baskerville, G.L., Emin, P., 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. Ecology 50, 514-517.
- Briere, J.F., Pracros, P., Le Roux, L.Y., Pierre, J.S., 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. Environ. Entomol. 28, 22-29.
- Campbell, A., Frazer, B.D., Gilbert, N., Gutierrez, A.P., Mackauer, M., 1974. Temperature requirements of some aphids and their parasites. J. Appl. Ecol. 11, 431-438.
- Choi, K.S., 2018. Introduction of a model simulation program and its application in a demonstrative expert system to predict optimal spraying time for pest: PopModel 1.5 and pest forecast system, in: Shih, H.-T., Chang, C.-J. (Eds.), Proceedings of the 2018 international symposium on proactive technologies for enhancement of integrated pest management of key crops. Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, pp.

227-243.

- Jiang, W., Jiang, X., Ye, J., Fu, Q., Feng, Y., Luo, J., Han, Z., 2011. Rice striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae), overwintering in super rice and its control using cultivation techniques. *Crop Prot.* 30, 130-133.
- Jiang, W.-H., Li, H.-D., Cheng, X.-F., Ye, J.-R., Feng, Y.-B., Han, Z.-J., 2015. Study on host plants for reproduction of *Chilo suppressalis*. *J. Asia-Pac. Entomol.* 18, 591-595.
- Kim, D.-S., Lee, J.-H., 2003. Oviposition model of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *Ecol. Model.* 162, 145-153.
- Kiritani, K., Tatsuki, S. (Eds.), 2009. The rice stem borer, *Chilo suppressalis*: a history of applied entomology in Japan. University of Tokyo Press, Tokyo.
- Kojima, A., Yamashiro, C., Arisaka, M., 1996. Regional control threshold of rice stem borer, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae), indicated by adult catch with sex-pheromone trap. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 40, 279-286.
- Kondo, A., Tanaka, F., 1995. An estimation of the control threshold of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) based on the pheromone trap catches. *Appl. Entomol. Zool.* 30, 103-110.
- Lactin, D.J., Holliday, N.J., Johnson, D.I., Craigen, R., 1995. Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. *Environ. Entomol.* 24, 68-75.
- Lee, H.S., 2014. Prediction of phenological changes of *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) under global warming. MS Thesis, Seoul National University.
- Logan, J.A., Wollkind, D.J., Hoyt, S.C., Tanigoshi, L.K., 1976. An analytic model for description of temperature dependent rate phenomena in arthropods. *Environ. Entomol.* 5, 1133-1140.
- Matsukura, K., Hoshizaki, S., Ishikawa, Y., Ttsuki, S., 2009. Differences in timing of the emergence of the overwintering generation between rice and water-oats populations of the striped stem borerr moth, *Chilo suppressalis* (Lepidopera: Crambidae). *Appl. Entomol. Zool.* 44, 485-489.
- Rahman, M.T., Khalequzzaman, M., 2004. Temperature requirements for the development and survival of rice stemborers in laboratory conditions. *Entomol. Sin.* 11, 47-60.
- Samudra, I.M., Emura, K., Hoshizaki, S., Ishikawa, Y., Tatsuki, S., 2002. Temporal differences in mating behavior between rice- and water-oats-populations of the striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Crambidae). *Appl. Entomol. Zool.* 37, 257-262.
- Shamakhi, L., Zibae, A., Karimi-Malati, A., Hoda, H., 2018. A laboratory study on the modeling of temperature-dependent development and antioxidant system of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae). *J. Insect Sci.* 18(2), 35; 1-11.
- Takano, S., Takano, T., Inou, M., 1959. Studies on the host plants (rice and water-oat)

of rice stem borer, *Chilo suppressalis* Walker. Ann. Rep. the Kanto-Tosan Plant Prot. Soc. 6, 43.

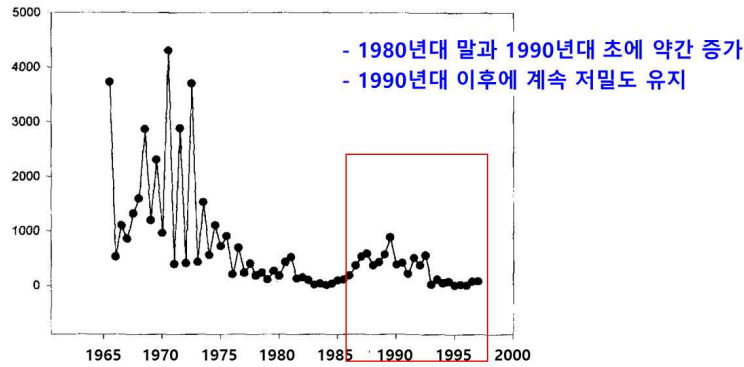
Tsumuki, H., Take, T., Kanehisa, K., Saito, T., Chu, Y.-I., 1994. Effect of temperature on the development and voltinism of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) in Taiwan. Eur. J. Entomol. 91, 477-479.

Wagner, T.L., Wu, H.-I., Sharpe, P.J.H., Coulson R.N., 1984. Modeling distributions of insect development time: a literature review and application of the Weibull function. Ann. Entomol. Soc. Am. 77, 475-487.

마. 보충자료

[1990년대 이후의 이화명나방 성충 밀도 변화]

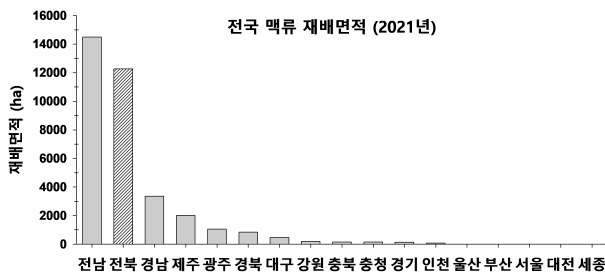
- 1980년대 중반까지 감소했던 밀도가 다시 1990대 초까지 증가했던 경향이었는데, 밀도는 (수원지방의 예로) 다시 감소하여 현재에 이르게 되었음(보충그림 1).



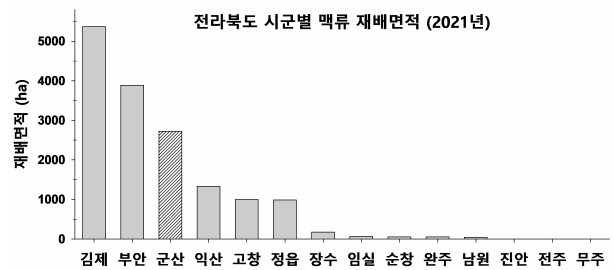
보충그림 1. 수원지방에서 이화명나방 성충 발생량 변화(이, 1999).
[1화기와 2화기를 연속으로 표현하였음]

[국내 맥류 재배면적]

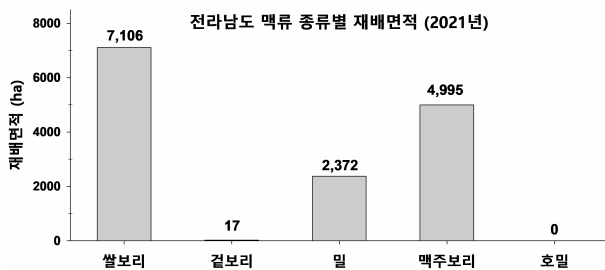
- 전남과 전북의 재배면적이 넓음(보충그림 2 A).
- 전북에서는 김제, 부안 다음으로 군산이 넓음(B).
- 전남북 모두 쌀보리 면적이 가장 넓은 것은 동일하고, 전남이 맥주보리 면적이 더 넓은 반면, 전북은 겉보리 재배면적이 넓음(C와 D)



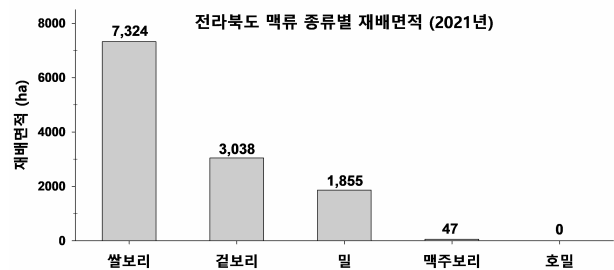
(A) 전국



(B) 전라북도



(C) 전라남도



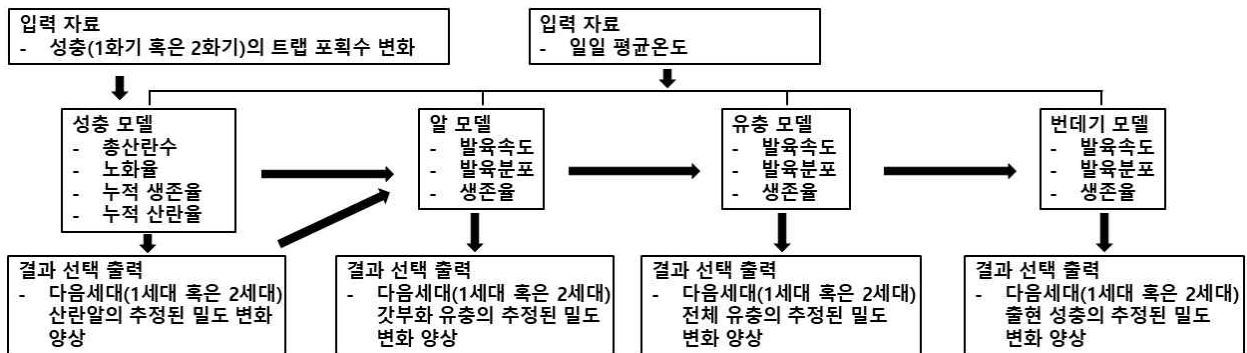
(D) 전라북도

보충그림 2. 2021년 전국 및 주요 지역의 맥류 재배면적(ha)(국가통계포털).

[이화명나방 세대 진전 추정에 사용된 모델](정 등, 2022)

※ 이화명나방 세대 진전 추정 모델링에 대한 간략한 설명

- 1) 생물적 특성(기간, 개체 변이, 생존율, 산란 등)을 모두 온도와 관련하여 해석.
- 2) ① 성충, 알, 유충, 번데기 발육태에 대한 모형을 작성하였는데, 필요한 자료가 부족하여 여러 연구자의 자료를 이용하여 작성함.
 ② 각 발육태별 모형들은 생물 예측모델링 플랫폼 소프트웨어인 PopModel(version 1.5)(Choi, 2018)에서 결합하고, 이 소프트웨어로 세대 진전 양상을 구동하였음.
 ③ 정 등(2022)에서 중국 동북부 이화명나방 2화기 발생 지역에서 확보한 자료로 검증하고, 1 세대 진전으로는 가장 일치하는 모형을 확보하였음(약간 빠르게 추정하는 경향임).
 ④ 각 발육태별 모형의 정확성은 검증되지 않았음.
 ⑤ 유충(애벌레)의 각 영기에 대한 자료 역시 확보하지 못해 영기별 모형 작성은 불가능하였음. 따라서 갓부화유충 출현일은 추정할 수 있으나, 2령 혹은 3령과 같은 더 늦은 영기 유충의 출발일은 추정할 수 없음.
 ⑥ 다른 단점으로는, 각 지역에 서식하는 이화명나방이 같은 환경조건에라도 다른 반응을 보이는 생물적 속성이 있을 수 있다는 가정 아래, 위와 같은 모델을 만들기 위한 자료들은 실제 관심있는 지역에 서식하고 있는 해충 시료로부터 확보되어야 하는데, 그런 자료와는 전혀 동떨어진 자료가 사용되었음.
- 3) 현재 군산에서 확보한 자료는 트랩의 성충 자료이므로 이를 출발점으로 이용함.
 - 성충은 번데기에서 갓 우화한 시점을 가정하였음. 따라서 실제 트랩에 포획되는 성충과 다를 수 있고, 오차가 발생할 수 있음.
- 4) 성충-알-유충-번데기 순서로 전개하고, 출력자료로 갓부화유충 발생량 변화, 유충 전체(영기구분없이)의 밀도변화, 다음 세대 성충의 출현시기 등을 추정함.
 - 이양일을 고려하여 추정할 때에는 성충에서 추정한 전체 산란곡선에서 이양일부터의 산란곡선만을 선택하여 다시 알-유충-번데기 순서로 추정하였음.
- 5) 미성숙태의 발육기간은 연구자에 따라 변이가 큰데, 정 등(2022)에서 인용된 여러 가지 예를 <보충표 4>에 제시함.



보충그림 3. 이화명나방 비월동태 세대 진전 추정의 전개 모식도[정 등(2022) 수정].

보충표 1. 온도와 관련된 이화명나방 미성숙태와 성충의 발육과 생식 특성을 일반화하기 위해 이용된 모델과 방정식

모형 방정식	모형식n
선형식	$r(T) = aT + b$
2차 방정식	$r(T) = aT^2 + bT + c$
Logan 6 모형 ¹⁾	$r(T) = \psi[\exp(\rho T) - \exp(\rho T_m - \frac{T_m - T}{\Delta T})]$
Lactin 1모형 ²⁾	$s(T) = \exp(\rho T) - \exp(\rho T_m - \frac{T_m - T}{\Delta T})$
Kim과 Lee (2003) 모형	$s(T) = a \cdot \exp[1 + \frac{b - T}{k} - \exp(\frac{b - T}{k})]$
2매개변수 Weibull식 ³⁾	$f(P_x) = 1 - \exp(-(\frac{P_x}{\alpha})^\beta)$
3매개변수 Weibull식 ⁴⁾	$f(P_x) = 1 - \exp(-(\frac{P_x - \alpha}{\beta})^\gamma)$

¹⁾Logan et al.(1976), ²⁾Lactin et al.(1995), ³⁾Kim et al.(2001), ⁴⁾Wagner et al.(1984)
[정 등(2022) 수정]

보충표 2. 이화명나방 성충 특성과 온도와의 관계를 설명한 모델식과 매개변수

성충 특성	모형식	매개변수
노화율	선형식	$a = 0.0048, b = -0.0118$
총산란수	2차 방정식	$a = -0.85915, b = 40.79882, c = -235.368$
누적 산란율	2매개변수 Weibull식	$\alpha = 0.489456, \beta = 2.743168$
누적 생존율	3매개변수 Weibull식	$\alpha = -118.4101, \beta = 119.1339, \gamma = -329.563$

[정 등(2022)에 인용된 Lee(2014)의 자료 수정]

보충표 3. 이화명나방 미성숙태 특성과 온도와의 관계를 설명한 모델식과 매개변수

발육태별	생물 특성의 모형식 종류	매개변수	자료 출처
발육속도			
알	선형식	$a = 0.0092, b = -0.0820$	Ⓐ
유충	선형식	$a = 0.0021, b = -0.0193$	〃
번데기	선형식	$a = 0.0090, b = -0.0940$	〃
발육분포			
알	2매개변수 Weibull식	$a = 0.96093, \beta = 10.11129$	Ⓑ
유충	2매개변수 Weibull식	$a = 1.051566, \beta = 8.394368$ (Adj. $R^2 = 0.99$)	Ⓒ
번데기	2매개변수 Weibull식	$a = 1.042189, \beta = 10.139446$ (Adj. $R^2 = 0.99$)	〃
생존율			
알	Lactin 1 모형	$\rho = 0.100438, T_m = 36.47268, \Delta T = 9.399194$ (Adj. $R^2 = 0.84$)	Ⓒ
유충	Kim과 Lee(2003) 모형	$\rho = 0.125946, T_m = 34.28044, \Delta T = 7.743216$ (Adj. $R^2 = 0.95$)	〃
번데기	Kim과 Lee(2003) 모형	$a = 0.988122, b = 26.71715, k = 12.55667$ (Adj. $R^2 = 0.89$)	〃

Ⓐ Tsumuki 등(1976); Ⓑ Lee(2014); Ⓒ Shamakhi 등(2018) [정 등(2022) 수정]

¹⁾매개변수에서 괄호 안에 보정된 신뢰계수가 있는 값은 원 자료를 이용하여 해당 모델에서 매개변수를 구한 것이고, 없는 값은 원자료에 있는 것을 그대로 사용한 것을 뜻함.

보충표 4. 여러 항온조건에서 조사된 이화명나방 미성숙태의 발육기간(일)

T (°C)	알				유충				번데기			
	Tsu	Rah	Sha	Lee	Tsu	Rah	Sha	Lee	Tsu	Rah	Sha	Lee
15		16.11				75.10				16.8		
18			13.0				69.3				21.7	
20	9.8	12.62		13.8	44.1	60.39		94.0	11.63	12.9		12.9
22			7.0				49.0				12.6	
23				8.8				64.4				10.7
24			5.0				41.9				9.5	
25	6.8	9.83			30.1	27.05			7.6	10.5		
26			5.0	7.4			41.3	50.5			8.0	7.8
29				5.7				37.1				6.5
30	5.2	5.97	4.0		22.9	20.45	30.1		5.7	6.2	6.6	
32			4.0	4.6			28.7	38.3			5.8	6.3
34			4.0				31.5				6.6	
35		7.36		6.1		17.83		47.2		4.9		6.8

Tsu: Tsumuki 등(1994); Rah: Rahman과 Khalequzzaman(2004); Sha: Shamakhi 등(2018); Lee: Lee(2014) [정 등(2022) 수정]

[이화명나방 성충 발생 조사 간격과 최대발생일을 규정하는 방법]

○. 조사 간격과 최대발생일

- 1) 성충 조사 자료는 매일 수집하는 것이 가장 정확함. 첫 발생일, 50% 발생일, 최대 발생일, 최종 발생일 등의 시간적으로 중요한 생물 속성 발생일을 정확하게 판단할 수 있음. 또 환경 변화에 대한 생물속성 반응을 이해할 근거자료가 만들어짐.
- 2) 단, 매일 조사가 쉽지 않은 경우, 일정한 간격으로 혹은 불규칙한 수일 간격으로 조사가 수행될 수 있음. 예를 들면 즉 주 1회 및 주 2회 조사한 경우의 예로 자료를 처리하는 방법은 아래와 같음.

① <보충그림 4>의 (A)그림은 매일 조사한 경우의 모습인데, 매우 구체적인 이화명나방 성충의 발생 양상을 볼 수 있음. 50% 발생일을 정확하게 알 수 있으나, 최대 발생일은 그림에서처럼 애매할 수 있음. 가장 많이 잡힌 날은 5월 12일이나 방제적기를 규정하는 기준으로 사용될 경우, 발생량이 많았던 기간인 5월 22~5월 25일 사이의 어느 날로 최대발생일을 지정하는 것이 더 실제와 가까울 수 있음.

- (참고) 성충이 대량 발생하는 경우, 평판형 끈끈이트랩을 사용하여 조사할 때는 끈끈이판의 포획용량 한계가 다른 유형의 트랩에 비해 상대적으로 작아서, 그 날 트랩에 유인된 성충을 모두 포획하지 못하는 경우가 발생함. 이는 성충이 집중적으로 발생하는 기간 중의 최대발생일이 제대로 표현되지 못하는 원인이 됨.

② (B)는 일주일에 2번, (C)는 1번 조사한 경우인데, 조사일 전체 포획수를 발생수로 표현하였음. 조사 간격이 불규칙한 경우에는 해당 기간의 밀도가 상대적으로 작거나 크게 표현되는 오류를 일으킴.

- (참고) 간격을 두어 자료 조사를 하는 경우, 성충이 발생한 날을 조사 간격의 제일 마지막 날에 표현하는 편향을 일으킬 수 있음. 조사 간격 사이에 실제 어느 날에 더 적고 많은 수가 포획되었는지를 모르기 때문에, 조사일과 직전 조사일의 중간일로 표현하는 것이 덜 편향적임.

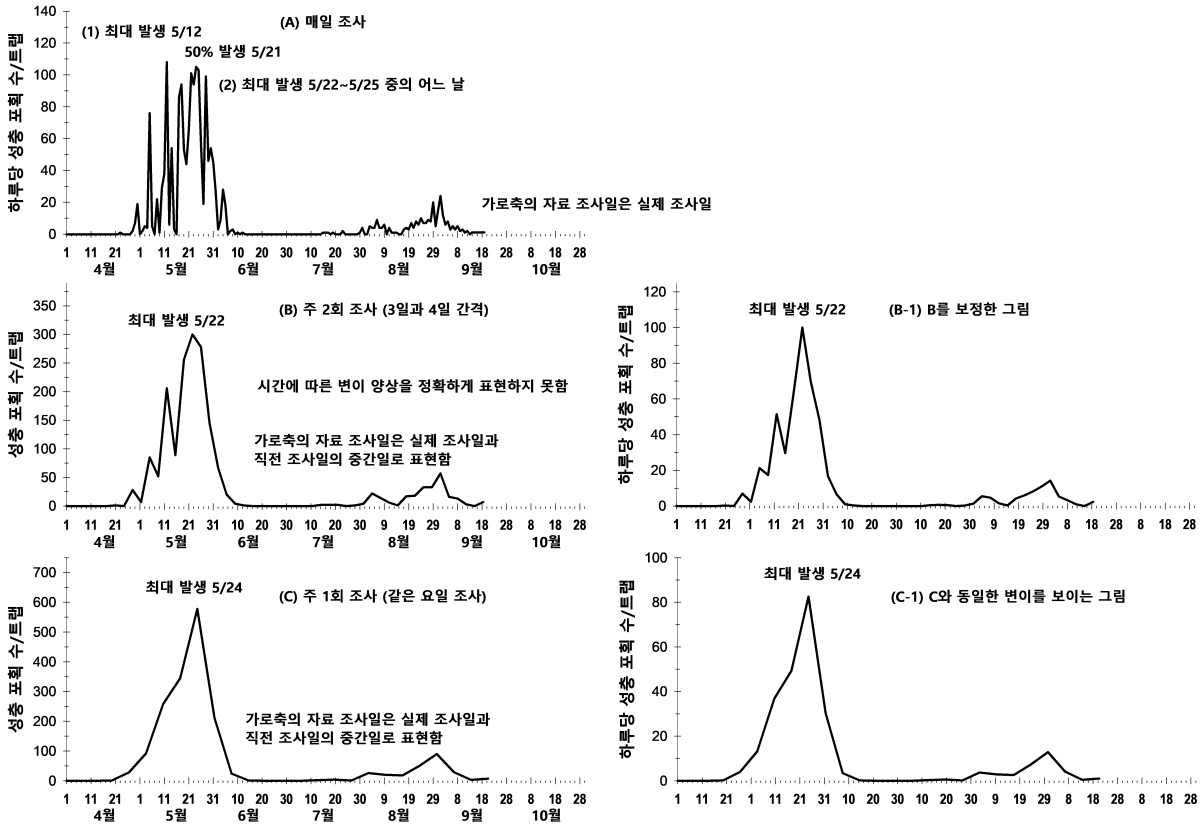
- 조사 간격이 좁은 (B)는 (C)에 비해 조금 더 상세하게 성충 발생 모습을 알 수 있고, 오차 범위가 더 좁음.

- 이런 자료수집 방법은 최대발생일을 쉽게 규정할 수 있음. 만일 좁은 간격 조사에서 최대발생피크가 인접하여 2개 생겼을 경우, 조사 간격을 늘려 마치 더 넓은 간격에서 조사한 것처럼 자료를 환산수정한 후 다시 결정할 수 있음.

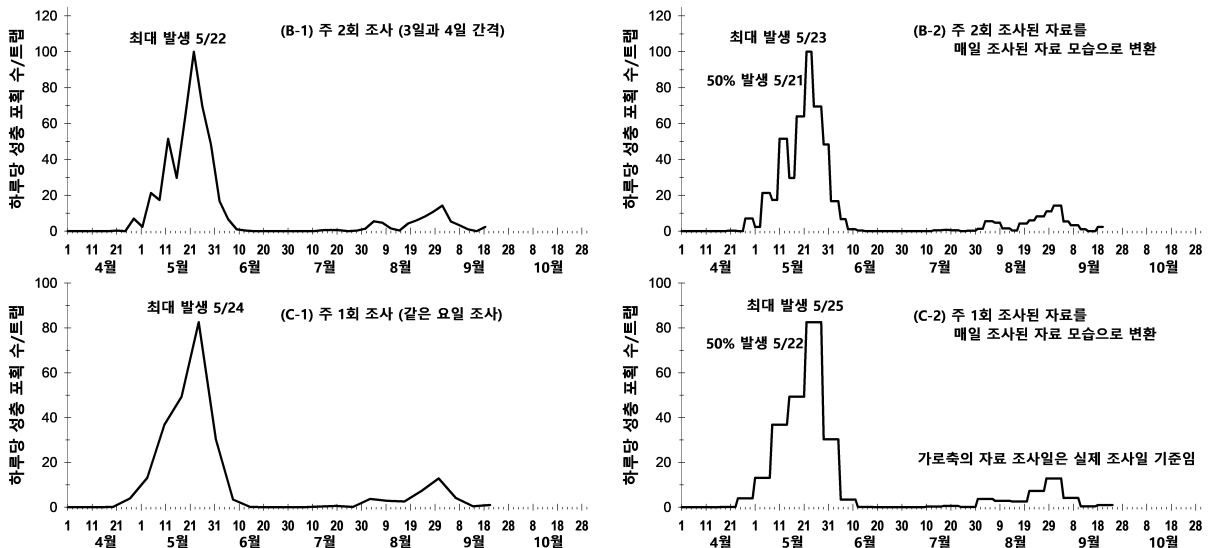
③ (B-1)과 (C-1)은 원 조사자료를 조사 간격으로 나누어 하루당 포획수로 표현하였음. 이 경우 조사 간격이 불규칙한 (B)의 그림이 (B-1)과 달라지고 해당 기간의 밀도가 균일하게 표현됨.

④ <보충그림 5>에서 (B-2)와 (C-2) 그림은 조사일 포획수를 직전 조사일 다음날부터 조사일까지 균등하게 나누어 표현한 것으로 하루당 포획수로 표현됨. 이때 최대발생일은 가장 큰 발생 기간의 중간일을 지정함. 50% 발생일도 더 정밀하게 구해질 수 있음. 예측모델을 구현하는 자료로도 이용됨.

군산 산복동 2479 (3/19-9/19, 2024, 전체 1,790마리 포획)



보충그림 4. 이화명나방 성충 발생을 (A) 매일 조사한 경우, (B와 B-1) 일주일에 2회 조사한 경우, (C와 C-1) 일주일에 1회 조사한 경우의 발생 양상. [(B)와 (C)는 조사일에 트랩에서 발견된 성충 수를 그대로 표현하였음. (B-1)과 (C-1)은 조사일 발견된 성충 수를 조사 간격으로 나누어 하루당 성충 수로 표현하였음. (A)를 제외한 4개 그림의 가로축은 성충 수 조사한 날을 조사한 날이 아닌 조사일과 직전 조사일의 중간일로 표현하였음.]



보충그림 5. 이화명나방 성충 발생에서 조사일 성충 수를 조사 간격 사이를 하루 단위로 균등하게 분배하여 표현한 경우(B-2, C-2)의 발생 양상.

[월동유충으로부터 1화기 성충 발생일 추정하는 모델]

1. 모델 작성의 기초가 되는 실험 자료

- 월동유충(휴면 종료)을 채집하여 여러 온도 조건에서 성충이 될 때까지 사육
- 온도별로 얻어진 발육기간 자료로 발육속도를 구하였음(보충표 5).

보충표 5. 여러 항온 조건에서 이화명나방 월동유충의 발육기간과 발육속도, 생존율

실험온도(°C)	성충까지 평균 발육기간(일)	발육속도(1/기간)	생존율(%)
13.2	107.4	0.0093	27.5
17.7	43.4	0.0230	90.0
22.1	37.0	0.0271	85.0
25.8	26.2	0.0382	85.0
29.7	18.2	0.0550	87.5
34.1	19.0	0.0528	60.0

- 군산시 산북동에서 2024.2.26.-3.2. 채집; 2.26.-3.3. 가온시작

2. 이화명나방 1화기 성충 출현시기 예측 모델

1) 적합 모델 선별

- 온도와 발육속도와의 관계를 설명할 수 있는 비선형 및 선형모델들(보충표 6)에 위의 온도에 따른 발육속도 자료를 입력하여 각 모델에 적합한 매개변수를 추정하였음(보충표 7).
- 개체간 발육 차이를 나타내는 발육분포모형은 3개 매개변수를 갖는 Weibull모형 (Wagner 등, 1984)을 채택하여 유효한 매개변수를 구했음(보충표 6; 7).
- 4개의 온도의존 발육률 모형 각각에서 1월 1일부터 일평균온도를 이용하여 이화명나방 월동유충의 일일 발육률이 구해졌고, 이것을 누적하였음. 매일의 누적된 값들에 Weibull 모델을 적용하여 표준화된 분포(정규분포) 모형의 값들로 표현되게 하였음. 이 정규분포 값이 50%에 가장 가까운 날을 1화기 성충 50% 발생일로 추정하였음.
- ① <보충표 6>의 함수와 <보충표 7>에서 구한 매개변수를 이용하여 월동세대 성충이 출현하는 전체적인 양상을 <보충그림 6>에 2023년과 2024년도의 예로 나타냈음.
- ② Logan 6 모델을 이용한 추정이 발생일을 가장 빠르게 추정하는 경향이었고, Briere 1과 선형 모델이 Lactin 2 모델보다 늦게 추정하는 경향이었음.
- ③ 모델에 따라 같은 해인데도 서로 다른 모습을 나타냈고, 하나의 모델 안에서도 큰 발생 피크가 간격을 두고 나타나는 양상을 보였음. 이런 발생 양상이 이화명나방 고유의 특성인지 좀 더 면밀한 검토를 할 예정임.
- 선형모델(보충표 6, 7)에서는 월동유충-성충출현 기간을 위한 발육영점온도가

9.77°C로, 발육완성에 필요한 유효적산온도(발육영점온도 이상의 매일 온도 누적 값)가 384.6°C로 구해졌고, 이 값들은 유효적산온일도(degree-day) 모델에서 사용되었음(보충표 8).

- 유효적산온일도(degree-day) 모델로 성충 50% 발생일을 추정하기 위해서, 누적할 일일 유효발육온도량을 일 평균기온을 이용하는 방법과 최저/최고 기온 기반의 단일사인곡선으로 추정하는 방법(Baskerville와 Emin, 1969) 두 종류를 제시하였음. 각 방법에서 추정된 일일 유효발육온도값들을 누적하여 유효적산온도값, 384.6°C를 넘는 날을 50% 발생일로 추정하였음.

보충표 6. 온도와 관련된 이화명나방 미성숙태와 성충의 발육과 생식 특성을 일반화하기 위해 이용된 모델식과 수식 형태

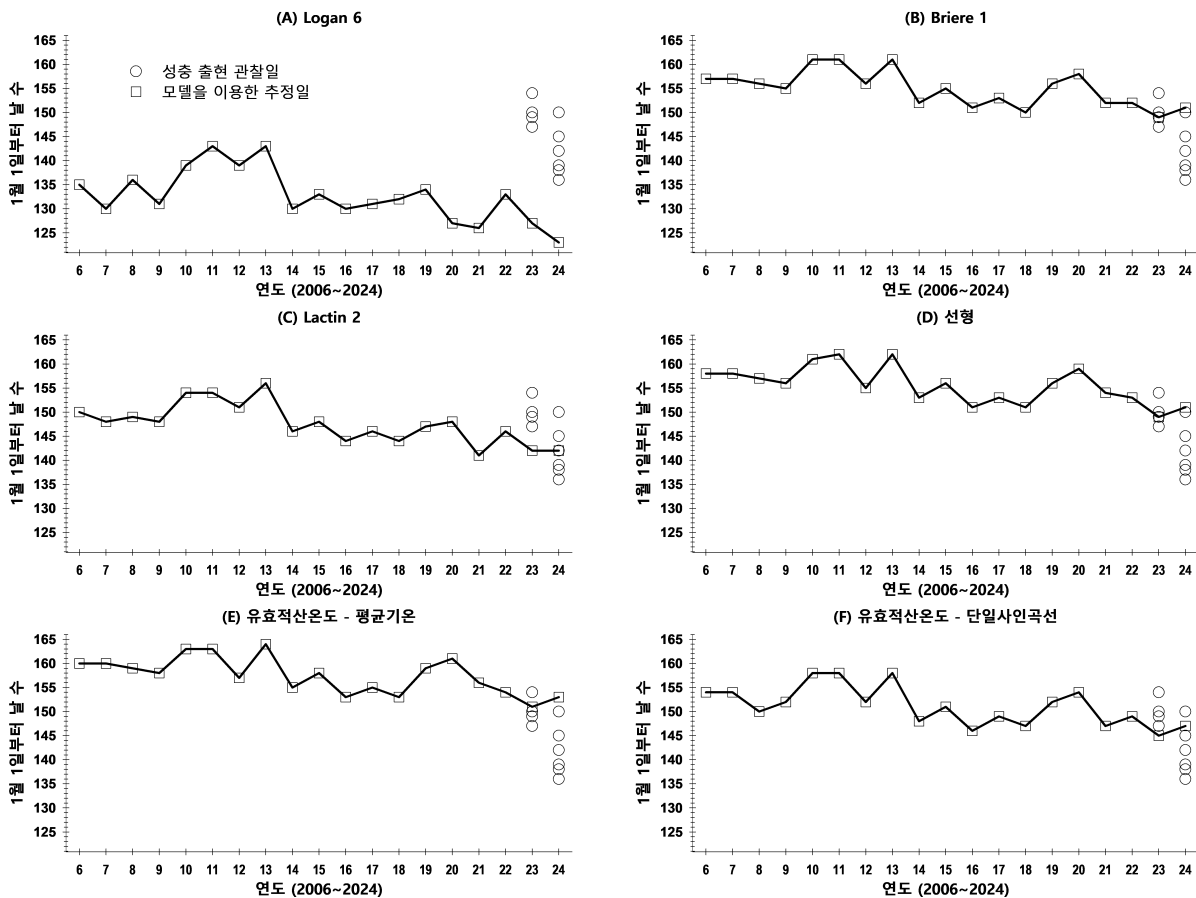
모델 방정식	모형식
온도의존 발육률 모형	
Logan 6 모형 ¹⁾	$r(T) = \psi(e^{\rho T} - e^{(\rho T_m - \frac{T_m - T}{\Delta T})})$
Briere 1 모형 ²⁾	$r(T) = aT(T - T_0)(T_L - T)^{\frac{1}{2}}$
Lactin 2 모형 ³⁾	$r(T) = e^{\rho T} - e^{(\rho T_m - \frac{T_m - T}{\Delta T})} + \lambda$
선형식 ⁴⁾	$r(T) = aT + b$
발육분포모형	
3-매개변수 Weibull 모형 ⁵⁾	$f(P_x) = 1 - e^{-\left(\frac{P_x - \alpha}{\beta}\right)^\gamma}$

¹⁾Logan 등(1976), ²⁾Briere 등(1999), ³⁾Lactin 등(1995), ³⁾Campbell 등(1974), ⁵⁾Wagner 등(1984)

보충표 7. 이화명나방 월동유충의 성충까지의 발육을 설명하는데 사용된 모델들에서 추정된 매개변수

모형식	매개변수
Logan 6	$\psi = 0.0038882402, \rho = 0.089138926, T_m = 34.665091, \Delta T = 0.51475641$
Briere 1	$a = 2.1377909E-05, T_0 = 7.1189114, T_L = 41.705582$
Lactin 2	$\rho = 0.14588671, T_m = 39.258066, \Delta T = 6.8510998, \lambda = -0.0027467652$
선형	$a = 0.0026, b = -0.0254$
3-매개변수 Weibull식	$\alpha = 0.53613367, \beta = 0.49120487, \gamma = 2.4934172$

- Logan 6 모델을 이용한 추정은 다른 모델들보다 50% 성충 출현일을 제일 빠르게 추정하였음. 2023년과 2024년의 추정값과 해당 연도의 관찰값과의 차이의 절대값 평균이 가장 컸기 때문에 성충 발생기간을 추정하는데 이용하기 어려운 모델로 판단되었음(보충그림 6 A).
- Lactin 2 모델을 이용한 추정은 다른 모델들보다 50% 성충 출현일을 늦게 추정했는데, 2024년의 관찰값과 차이의 절대값 평균이 이용된 모델 사이에서 가장 작아, 1화기 성충 발생일 추정에 이용가능할 것으로 판단되었음.
- 각 모델로 추정된 연도별 50% 발생일에서 최근 2021-2024년은 2019-2020년보다 빨라진 경향을 알 수 있었음(단, Logan 6 모델로는 2020년이 빠르고, 2022년이 느려 다른 모델들과 달랐음). 이런 현상은 해당 연도, 해당 기간 동안의 기온에 직접 관계가 있는 것이나, 이런 현상과 최근 군산의 이화명나방 밀도 증가과의 연관성에 대해서는 좀 더 분석할 필요가 있음.
- 더 과거로는 2010, 2011, 2013년의 발생일이 늦은 경향이었고, 중간의 2012년은 양쪽 연도에 비해 매우 빠른 경향이었음. 역시 이것이 당시 전북 일부 지역의 밀도 증가 현상과 연관이 있는가는 좀 더 분석이 필요함.



보충그림 7. 여러 모델을 이용하여 추정한 군산 지역 이화명나방 월동세대(1화기) 성충 50% 출현일. 2006~2024년 추정, 2023년과 2024년은 관찰값 표현.