

벼밤나방(*Sesamia inferens* (Walker, 1856))(나비목: 밤나방과) 성충 발생시기와 연중 세대수 추정

김은영 · 박영미¹ · 배순도² · 이관석³ · 백채훈³ · 김도익⁴ · 이원훈⁵ · 정진교* · 서보윤^{6**}

국립식량과학원 재배환경과, ¹농림축산검역본부 중부지역본부, ²남부식물환경연구소, ³국립농업과학원 작물보호과, ⁴전라남도 농업기술원, ⁵경상국립대학교 농업생명과학연구원, ⁶국립식량과학원 작물기초기반과

Estimation of Adult Season of Occurrence and Annual Generation Numbers of the Asiatic Pink Stem Borer, *Sesamia inferens* (Walker, 1856) (Lepidoptera: Noctuidae)

Eun Young Kim, Young-Mi Park¹, Soon Do Bae², Gwan-Seok Lee³, Chae-Hoon Paik³, Do-Ik Kim⁴, Wonhoon Lee⁵,
Jin Kyo Jung* and Bo Yoon Seo^{6**}

Crop Cultivation and Environment Research Division, National Institute of Crop Science, Suwon 16429, Korea

¹Jungbu Regional Office, Animal and Plant Quarantine Agency, Incheon 22133, Korea

²Nambu Plants Environmental Research, Haman 52019, Korea

³Crop Protection Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

⁴Jeollanamdo Agricultural Research & Extension Services, Naju 58213, Korea

⁵Department of Plant Medicine and Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

⁶Crop Foundation Division, National Institute of Crop Science, Wanju 55365, Korea

ABSTRACT: The Asiatic pink stem borer, *Sesamia inferens* (Walker, 1856) (Lepidoptera: Noctuidae) is a pest that attacks rice stems. In this study, we estimated the annual generation of insect in several regions of the Republic of Korea. Adult trapping using a sex pheromone trap detected the occurrence of *S. inferens* adults in the three northernmost areas around 38° latitude and showed that the insect inhabits all of Korea. In most areas investigated, the seasons of the adult generations estimated using the single-sine degree-day model did not deviate from the corresponding observed seasons of adult occurrence. We estimated that the overwintering larvae hypothetically-estimated using the model could be originated from the last generation of adults. When larvae collected in paddy fields during the autumn season in a few middle and southern areas were reared at 25°C, ca. 70% of pupae did not show additional larval molting before their pupation. All larvae collected in early March in a southern area (Goseong, Gyeongsangnam-do) pupated without additional larval molting when reared at 25°C. Based on these results, we presumed that *S. inferens* could overwinter as mainly the last instar larval stage in the area. Taken together, we conclude that *S. inferens* primarily has two generations per year in areas around 38° latitude, and three generations in the areas between 35.3° and 37.3° latitude. In addition, approximately 35% of insects captured by the sex pheromone trap were species other than *S. inferens*, as determined by analyzing the nucleotide sequences of the cytochrome c oxidase 1 gene. These species were not morphologically misidentified as *S. inferens*.

Key words: *Sesamina inferens*, Distribution, Overwintering, Adult occurrence season, Annual generation number

*Corresponding author: jungjk@korea.kr

**Corresponding author: seoby@korea.kr

Received June 14 2023; Revised August 15 2023

Accepted October 4 2023

초록: 벼밤나방 [*Sesamia inferens* (Walker, 1856)] (나비목: 밤나방과)은 벼 줄기를 가해하는 해충이다. 본 연구는 국내 몇 지역에서 벼밤나방의 연중 세대수를 추정하였다. 북위 38° 부근의 세 지역에서 벼밤나방 성충이 성페로몬트랩에 포획되었다. 이는 국내 모든 지역에서 벼밤나방이 서식하는 것을 나타냈다. 조사된 지역 대부분에서 단일사인곡선의 유효적산온일도 모델로 추정된 세대별 성충 발생 시기는 관찰된 성충 세대의 발생 시기와 차이가 없었다. 이 모델을 사용하여 추정된 월동유충은 성충 마지막 세대로부터 유래할 가능성이 있다고 추정되었다. 중남부지역에서 가을동안 벼 포장에서 채집된 유충들을 25°C에서 사육하였을 때, 번데기의 약 70%가 용화전 유충 탈피를 보이지 않았다. 경남 고성에서 3월초에 채집된 유충은 25°C 사육에서 유충 탈피 없이 용화하여 이 지역에서는 주로 마지막 유충 영기로 월동할 것으로 추정되었다. 모든 결과를 종합하여 벼밤나방은 북위 38° 부근 지역에서는 주로 2세대, 북위 35.3° ~ 37.3° 사이 지역에서는 3세대가 경과할 것으로 결론지었다. 별도로, 시토크롬 c 산화효소 1 유전자의 염기서열을 분석한 결과, 성페로몬트랩에 포획된 종의 35%가 다른 종이었고, 이들은 형태적으로 벼밤나방과 혼동되지 않았다.

검색어: 벼밤나방, 분포, 월동, 성충 발생시기, 연중 세대수

벼밤나방 (*Sesamia inferens* (Walker, 1856)) (밤나방과)은 광식성 곤충으로 벼과(Poaceae), 사초과(Cyperaceae), 십자화과(Cruciferae), 부들과(Typhaceae), 꿀풀과(Lamiaceae)에 속한 90여종의 식물들을 기주로 하며, 이중 80여종이 벼과에 속해있다(Khan et al., 1991; Liu et al., 2011). 국내에서는 벼(*Oryza sativa*) 1종이 기주식물로 보고되었다(Park et al., 2006). 식량 작물 중에는 벼와 옥수수(*Zea mays*), 사탕수수(*Saccharum officinarum*), 밀(*Triticum aestivum*)이 주요 피해 작물로 보고되어 있다(Kaur et al., 2015; Singh and Kular, 2015; Shimizu et al., 2018; Huang et al., 2020).

벼밤나방이 벼 줄기를 가해하여 나타나는 피해는 이화명나방(*Chilo suppressalis*) (풀명나방과) 유충에 의한 피해와 유사한데, 유충이 벼 줄기 안에서 섭식하여 어린 식물체 줄기가 마르는 속마름(dead heart) 현상과 성숙한 식물체에서 이삭 알갱이가 차지 않는 흰이삭(백수, white head) 현상으로 나타난다(Banerjee and Pramanik, 1964; Pathak and Khan, 1994).

벼밤나방은 남위 9° (인도네시아 소순다열도)부터 북위 43° (일본 홋카이도) 사이와, 동경 70° (파키스탄)과 159° (솔로몬제도) 사이 [별도로 서경 156° (하와이)]의 아시아 지역과 오세아니아 지역의 태평양 섬들에서 발견되었는데(PlantwisePlus Knowledge Bank website, N.D.), 그 대부분은 북위 33° 아래쪽의 아시아 지역이다. 우리나라에는 남한의 전 지역과 북한에서 발견된다는 기록이 있으나(Kononenko et al., 1998), 구체적인 정보는 확인되지 않았다. 중국 화북성 Shijiazhuang시(38.2°N, 115.2°E)에서 3월 중 옥수수 줄기 잔재물 안에서 월동하는 벼밤나방 유충을 발견했다는 보고를 따른다면(Zhang et al., 2019), 이 지역이 겨울철 온도가 영하로 떨어지는 지역에서 벼밤나방이 해를 거듭하여 세대를 이을 가능성이 있는 현재까지의 가장 고위도 지역이다. 벼밤나방의 월동휴면 특성에 대해서는 중국 북위 32° 혹은 35° 지역에서 겨울 중 채집된 유충에서 내한성의 일부 성질이 보고되어 있다(Sun et al., 2014; Huang et al., 2020).

국내에서는 Bae et al. (1969)이 1960년대 후반 경상남도 밀

양의 벼 포장에서 벼밤나방 유충이 벼를 가해하는 것을 처음 보고하였다. 이 때 유인등을 이용해 북쪽으로 충청남도 서산과 논산, 경상북도 상주, 강원도 강릉에서, 남쪽으로 제주도 남제주군을 포함하여 전국 18개 지역에서 성충이 발생한 것을 확인하였고(트랩이 설치되었던 모든 지역은 불확실), 김재와 김해에서 성충이 연중 3회 발생하는 것으로 판단하였다. 또 1968년 3월 하순 밀양에서 벼 잔재물 지하부 줄기에서 채집한 월동유충을 야외 망실(실험지역과 설치장소 불확실)에서 사육한 결과 벼밤나방이 연중 3세대를 경과할 수 있고, 동시에 3화기(2세대) 성충의 자손이 유충태로 월동에 들어가는 것이 확인되었다.

저자들은 2011년 9월에 전라남도 영광과 충청남도 서천의 벼 포장에서 흰이삭(백수) 피해를 받은 벼에서 이화명나방과 벼밤나방 유충을 같이 발견하였다. 이 결과는 당시 몇 지역에서 발생했던 벼의 흰이삭 피해가 이화명나방과 벼밤나방이 동일 벼 포장에서 같이 서식하면서 가해하여 발생했거나, 벼밤나방 단독 서식으로 비롯되었을 가능성을 나타냈다. 이 해충의 생태 특성을 좀 더 알기 위해 이후 2년에 걸쳐 전라북도와 충청남도 및 경상남도 몇 지역에서 가을과 이른 봄 사이 벼 줄기 잔재물에서 벼밤나방이 발견되는지 조사하였다. 또, 2012~2014년 사이 경기도와 충남, 전북, 전남, 경남 지역에서 벼밤나방의 성페로몬 조성(Nagayama et al., 2006)을 이용하여 국내에서 처음 성페로몬트랩으로 벼밤나방 성충 발생을 탐지하고 발생 시기를 조사하였다. 이후 2020년과 2021년 북위 38° 인접 지역에서 성페로몬트랩을 이용하여 해당지역에서 벼밤나방 성충의 발생 시기를 조사하였다. 이에 그동안 수집된 관찰 자료를 이용하여 국내 벼밤나방 월동 특성과 성충 발생 시기 및 연중 세대 수에 대해 해석을 시도한 결과를 보고한다. 최근 중국에서 벼밤나방에 대해 살충제 처리방법이나(Yang et al., 2021), Bt유전자를 삽입한 형질전환 벼 연구들이 수행되어(Gao et al., 2010; Han et al., 2014), 해당 지역에서 벼밤나방의 위험성이 증가한 것으로 보인다. 현재 국내에서 벼밤나방이 주요 해충으로 분류되어 있지 않으나 그 위험성이 잠재하고 있는 만큼, 본 연구의 결과

는 벼밤나방의 발생량이 증가할 경우 활용할 수 있는 정보로 이용될 수 있다.

재료 및 방법

월동유충 채집

2011년부터 2013년까지 가을과 겨울 사이에 전라남도 영광(35.15°N 126.33°E), 전라북도 군산(35.55°N 126.50°E), 충청남도 서천(36.07°N 126.41°E), 경상남도 고성(34.58°N 128.20°E)의 벼 포장에서 벼 줄기해충인 벼밤나방과 이화명나방 월동유충을 채집하였다. 벼 수확 전에는 흰이삭 피해가 있는 벼 줄기에서 피해 구멍을 관찰하면서 채집하였고, 수확 후 남아있는 벼 밀동 줄기 안에 살아있는 유충을 채집하였다(Table 1). 두 종의 채집수를 각각 조사하였고, 2012년 10월 18일 군산 벼 포장에서만 별도로 25개 잔존 주를 대상으로 두 종의 서식밀도를 구했다. 채집된 유충들은 두쪽을 측정하지 않았으나 대부분 노숙유충으로 추정되었다. 군산의 채집 집단에는 크기가 상대적으로 작은 유충들이 몇 마리 섞여 있었다.

채집 유충 사육 및 발육 특성 조사

각 지역에서 채집된 유충들을 수원에 소재한 국립식량과학원으로 옮겨와 일부 개체들은 곤충사육실(25 ± 2°C, 15:9 h = light:dark, 60 ± 5% relative humidity)에서 사육하였다(Table 2). 다른 일부 개체들은 곤충의 야외 발육을 관찰하기 위해 야외의 그늘막 사육장에서 사육하였는데(Table 3), 이 사육환경은 조명나방(*Ostrinia furnacalis*)(풀명나방과)(Park et al., 2017), 왕담배나방(*Helicoverpa armigera*)(밤나방과)(Jung et al., 2015), 팔나방(*Matsumuraeses falcana*)(잎말이나방과)(Jung et al., 2014)의 야외 인공사육에 사용되었던 환경과 동일하였다. 두 환경에서 동일하게 소형 플라스틱 원형용기(50 mm in diameter × 10 mm in height) (SPL Life Sciences, Pocheon, Korea)에 이화명나방 대상의 인공사료(Jung et al., 2021)를 제공하고 채집한 벼밤나방 유충을 개체별로 사육하였다. 매일 조사하면서 탈피와 사망 여부를 기록하였고, 발육기간과 생존율, 성비 등의 발육특성을 분석하였다. 실내에서 사육한 집단으로부터 우화한 성충 개체들을 이용하여 짝짓기를 시도했으나 후대를 얻지 못했다.

시토크롬 c 산화효소 1 유전자 염기서열 분석

2011년 9월 영광에서 채집된 유충 8마리(벼밤나방 5, 이화

명나방 3)와 서천 채집 유충 12마리(벼밤나방 12)마리에 대해 채집 직후 바로 시토크롬 c 산화효소 유전자 1 (COX1)의 부분 염기서열을 해독하였다. 유충에서의 게놈 DNA 추출과 C1-J-1751과 C1-N-2191 프라이머(Simon et al., 1994)를 이용한 COX1 부분염기서열 증폭방법은 Seo et al. (2012)의 방법과 동일하였다. 증폭산물을 (주)마크로젠에 의뢰하여 408 ~ 409 bp의 서열을 해독하고 미국국립생물정보센터(NCBI) GenBank에 17개 서열(accession No. JX020958 ~ JX020974)을 벼밤나방으로, 3개 서열(JX020955 ~ JX020957)을 이화명나방으로 등록하였다(Fig. 1). 한편 군산에서 채집된 2012년 10월 18일 유충 1마리와 2013년 1월 31일 유충 2마리(냉장실에서 70% 에탄올 용액에 보관) 및 2021년 백령도와 연천, 고성(강원)에서 성페로몬트랩(아래 성충 발생 조사 방법)에 포획된 비표적종을 포함한 성충 대부분(생체시료 냉동 보관)에 대해 LCO1490과 HCO2198 프라이머(Folmer et al., 1994)를 이용하여 COX1 부분염기서열(658 bp)을 해독하였다. 이 과정은 Jung et al. (2022b)의 방법을 따랐고 2022년에 해당 실험이 수행되었다. 이중 군산의 유충 3마리에서 해독된 서열은 GenBank에 벼밤나방으로 등록하였다(OQ568696 ~ OQ568698) (Fig. 1).

해독된 유충 서열 전체 23개(벼밤나방 20, 이화명나방 3)와 GenBank에서 벼밤나방으로 등록된 중국 시료 1개(HM160125)와 이화명나방으로 등록된 일본시료 1개(AB238203)의 서열을 MEGA11에서 ClustalW로 정렬하여 모두 391 bp로 맞추어 pair-wise 방법과 Kimura 2-parameter 모델을 채용하여 neighbor-joining (1,500 bootstrapping) 방법으로 유전거리 기반의 계통도를 작성하였다(Tamura et al., 2021). 두 서열 사이의 유전적 거리 값은 MEGA11 프로그램에서 pair-wise 방식으로 Kimura 2-parameter 모델(1,500 bootstrapping)로 추정하여 구했는데 모든 값들을 따로 제시하지 않았다(Fig. 1).

2021년 성페로몬 트랩에 포획된 성충들 중 벼밤나방 이외의 비표적 종들은 GenBank BLAST 검정을 실시하고 공통서열에서 99% 이상의 서열 유사도로 확인된 종을 해당 종으로, 그 이하의 유사도를 보인 종은 근접하게 추정된 종에 근거하여 족이나 아과, 과 수준의 종으로 임의로 추정하였고, 형태 검정을 통한 종 동정은 수행하지 않았다(Table 4). 해독된 서열 중 이화명나방붙이(*Chilo luteellus*)(풀명나방과)로 확인된 성충의 서열만 GenBank에 등록하였다(OQ568168). 벼밤나방 성충 시료에 대한 분석 결과는 본 연구에 제시하지 않았다.

성충 발생 조사

성충의 발생시기는 성페로몬 트랩을 이용하여 탐지하였다.

미끼 안의 벼밤나방 수컷 성충 유인용 화합물은 (Z)-11-hexadecenyl acetate와 (Z)-11-hexadecen-1-ol이 3:1 비율인 벼밤나방 암컷의 성페로몬 조성(Nagayama et al., 2006)으로 합성화합물을 이용하여 제조한 뒤 1 mg씩 미끼에 넣었다. 합성화합물(purity > 96%)은 Shinetsu (Tokyo, Japan)로부터 구입하였다. 미끼에는 향산화제로 butylated hydroxytoluene (99%) (Sigma, USA) 1 mg을 추가하였다. 방출제로는 고무마개(8-9 mm) (Chemglass, Vineland, USA)를 사용하였다. 트랩 형태로 경기도 수원(37.29°N 126.95°E) (2012-2013년)과 이천(37.31°N 127.51°E) (2014년), 충남(2012년) 서산수석동(36.77°N 126.48°E), 가사리(36.75°N 126.36°E), 홍성(36.60°N 126.50°E), 보령(36.50°N 126.58°E), 서천(36.12°N 126.68°E)에서는 끈끈이형의 날개트랩(Gaia, Suwon, Korea)을 사용하였고, 전북(2012년) 군산(35.97°N 126.86°E)과 익산(35.94°N 126.93°E), 전남 강진(34.65°N 126.79°E) (2013년)과 나주(35.03°N 126.82°E) (2012년), 경남 밀양(35.49°N 128.74°E) (2012-2013년) 및 2020년과 2021년의 경기 연천(38.06°N 127.07°E), 인천시 백령도(37.96°N 124.71°E), 강원 고성(38.45°N 128.44°E)에서는 델타트랩(GreenAgrotech, Gyeongsan, Korea)을 사용하였다. 트랩은 조사 지점에 2~4개 반복으로 설치하였고, 한 포장에서 반복 트랩들은 7~십수 m 간격을 두었다. 백령도에는 약 1.5 km 떨어진 두 포장에 각각 한 개의 트랩이 설치되었다. 미끼는 한달 간격으로 교체하였다. 성충 포획수는 1일~1주일 간격으로 불규칙하게 조사하였는데, 조사일 평균 포획수를 조사일 간격으로 나누어 조사일 사이의 밀도를 같은 값으로 산출하여 그림에 표시하였다(Fig. 2 and 3). 나주 지역에서는 조사 당시 벼밤나방을 포획하지 못했다.

세대 진전 추정과 연간 세대 수 판정

성충 발생 양상을 조사한 지역별로 벼밤나방의 연중 세대 수를 추정하였다. 이 분석에 Bae et al. (1969)가 유인등으로 전북 김제(35.81°N 126.83°E)와 경남 김해(35.27°N 128.86°E)에서 조사한 연중 성충 발생시기 자료를 포함시켰는데, 조사일별 포획수를 이용하여 성충 발생양상을 재구성하였다.

각 조사지역별로 관찰된 성충 밀도 변동 양상에서 임의로 발생 화기를 구분하고, 각 화기의 기간을 기준으로 벼밤나방의 온도존적 발육모델을 적용하여 다음 세대 혹은 이전 세대가 발생될 수 있는지 추정하였다. 세대 진전을 추정하는 방식으로 유효적산온일도(degree-day) 모델을 사용하였고, 일일 벼밤나방 유효발육온도량은 하루 중 최저와 최고 온도를 이용하는 단일 사인곡선(single-sine wave) 방법(Baskerville and Emin, 1969)

으로 얻었다. 일일 유효적산온일도 값은 스프레드시트 프로그램(Microsoft Excel 사용)을 이용하여 계산하였다.

본 연구에서 벼밤나방의 최저발육온도(lower development threshold, LDT, °C)로 11.90°C를 채택하였는데, 이는 Selvaraj et al. (2015)이 벼밤나방 인도개체군을 대상으로 18~33°C 범위 6개 온도를 이용한 실험에서 4개 발육태(알, 작은 유충, 큰 유충, 번데기)별 발육속도와 온도의 선형회귀 관계로 제시된 최저발육온도들을 본 연구에서 평균한 값이었다. 알, 유충(작은 유충과 큰 유충 기간 합), 번데기, 미성숙태 각각의 발육에 필요한 온도량(K, °C)은, 온도와 발육률의 선형 비례관계(Campbell et al., 1974; Shi et al., 2010)에 근거하여 Selvaraj et al. (2015)에서 각 온도(T, °C)별로 관찰된 평균발육기간(D, days)에 위의 공통 최저발육온도를 초과한 온도 값을 곱해 얻어진 값들을 평균하여 구했다 [$K = D \times (T - LDT)$] (Table 5). 유효적산온일도 모델에서 벼밤나방의 발육 상한온도는 Selvaraj et al. (2015)의 전체 미성숙태 온도별 발육속도 자료를 TableCurve2D 프로그램(SYSTAT, Palo Alto, USA)(Jandel Scientific, 1994)에서 Lactin-2 모형(Lactin et al., 1995)을 적용하여 추정된 값인 42.7°C를 적용하였다.

세대 진전은, 각 지역에서 임의로 구분한 화기 기간의 처음과 끝 발생일을 기준으로 순방향으로 다음 세대 성충의 출현기간, 혹은 역방향으로 이전 세대 성충들이 출현하는 기간으로 추정하였다. 벼밤나방 성충의 산란전 기간에 대한 온도량은 따로 계산하지 않고 미성숙태의 발육에 필요한 유효 온도량에 시기에 관계없이 모두 1일을 적용하였고, 이를 세대 진전 추정에 더했다. 이는 동속종인 *S. nonagrioides*를 대상으로 15~30°C에서 산란전 기간이 1.2~1.7일로 조사된 보고(Fantinou et al., 2004)를 참고하여, 벼밤나방의 산란전 기간이 계절에 따라 크게 다르지 않아 전체 발생기간에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 가정하여 결정하였다. 각 지역의 온도자료는 기상청 기상자료개방포털(KMA website, N.D.)에서 제공하는 그 해의 그 지역의 종관기상 혹은 트랩 설치점 인근의 방재기상 자료에서 일 최고 및 최저온도를 사용하였다. 단 Bae et al. (1969)에 있는 김제와 김해 지역의 온도는 당시 기상청 온도자료가 수집되지 않았기 때문에 본 연구에서는 각 지역의 평년값(김제 1997-2020년; 김해 2008-2020년)의 일 최고 및 최저 온도를 대신 사용하였다.

1화기 성충 발생기는 2화기 성충 발생기로 구분한 기간으로부터 역방향으로 누적하여 추정하였다. 2화기 성충 발생기는 1화기 관찰기간으로부터 순방향으로, 또 3화기 관찰기간으로부터 역방향으로 누적하고 두 경우에서 최소일과 최대일 사이를 2화기 발생기간으로 추정하였다. 3화기는 2화기 구분기간으로부터

터 순방향으로 누적하기 추정하였다. 4화기는 조사된 모든 경우에서 성충 발생이 관찰되지 않았다고 판단하였으나, 유효적산온일도 모델에 의해 3화기로부터 그 해 안에 4화기 발생이 추정될 수 있는 경우 그 기간을 제시하였다. 모든 경우에서 관찰된 성충 발생 시기가 있는 경우에만 유효적산온일도 모델을 적용하였다.

한편, 벼밤나방은 어느 정도 자란 유충태로 월동하고(Bae et al., 1969; Sun et al., 2014; Zhang et al., 2019; Huang et al., 2020), 월동 유충의 대부분이 마지막 세대에 속한다는 가정 아래, 본 연구에서는 연중 성충밀도 변동이 관찰된 지역에서의 유효적산온일도 누적값으로 가을철 가상의 월동태(노숙유충)가 생성되는 시기를 추정하였다. 이 때 유충 전체 기간의 65%가 지난 유충을 월동하는 노숙유충으로 가정하였고, 65%가 발육한 첫 유충을 생성시키는 이전세대 성충 최초 발생일과 최종 번데기가 생성되지 않는 성충 최종 발생일 사이의 기간을 추정하였다. 이때 유충의 65% 발육기간은 Selvaraj et al. (2015)의 자료 기반의 유효적산온일도 모델에서 25°C에서의 추정 유충기간인 32.82일에서 채집한 월동유충을 25°C에서 사육하였을 때 용화까지 걸린 평균기간인 11.6일을 뺀 기간의 비율을 추정하여 얻었다(Table 2 and 5).

위 분석의 결과로 연중 세대 수는 1) 관찰된 성충 발생 시기가 구분될 수 있는지, 2) 각 구분된 발생세대 기간은 위 추정된 기간과 비교하여 가능한 범위 내에 있는지, 3) 월동 유충을 생성할 수 있는 성충은 관찰되거나 추정된 성충의 어느 세대에 속할 수 있는지를 고려하여 결정하였다(Fig. 2 and 3). 여기에 어떤 지역에서 본 연구에서 설정한 최저발육온도 이상의 일일 온도를 그 해 모두 더한 값을 미성숙태 전체의 유효적산온도로 산술적으로 나눈 값을 제시하였다.

결 과

월동기간 중 벼 포장에서 벼밤나방과 이화명나방 유충 밀도

2011년 9월 수확 전 흰이삭 피해 증상을 보였던 벼 줄기에서 벼밤나방과 이화명나방 유충이 같이 발견되거나(전남 영광), 벼밤나방만(충남 서천)이 발견되었다(Table 1). 지역별 벼 줄기 밀도에서 유충 채집 결과, 2012년 10월 서천에서는 이전 해와 마찬가지로 벼밤나방만 발견되었다. 전북 군산은 벼밤나방과 이화명나방 유충이 같이 발견되었는데, 2012년 10월과 11월 채집에서는 벼밤나방 수가 더 많았다. 해충 밀도가 조사된 10월에 벼밤나방이 주당 최대 6마리, 이화명나방이 최대 2마리까지 발견되었고, 벼밤나방의 전체 분포 비율(피해주율)이 이화명나방보다 더 높았다. 벼 2개 잔존 주에서는 두 해충종이 동시에 발

견되었다(Table 1). 그러나 12월과 2013년 1월 중 조사에서는 벼밤나방은 거의 발견되지 않았고 이화명나방만이 발견되었다. 2013년 3월 경남 고성에서는 두 해충이 같이 발견되었고, 이화명나방 유충 채집수가 더 많았다.

COX1 염기서열로 동정된 월동유충 곤충종

2011년 9월 전남 영광에서 채집한 이화명나방 추정 유충 3마리의 COX1 유전자 염기서열(391 bp)은 대조서열로 사용한 AB238203과 100% 일치하여 이화명나방으로 확인되었다(Fig. 1). 벼밤나방으로 추정된 유충 20마리 가운데 16마리(영광 5, 서천 9, 군산 2마리)는 모두 동일서열로 벼밤나방 대조서열인 HM160125와 100% 일치하여 벼밤나방으로 확인되었다. 서천 시료 JX020963과 JX020969 및 군산 시료 OQ568698의 3마리 서열은 위 우점 서열에 대해 각각 0.26%, 0.51%, 0.26%의 유전거리를 보였는데, 변이값이 1% 미만으로 크지 않아 모두 벼밤나방으로 판정하였다. 벼밤나방으로 판정한 19개 시료는 높은 지지도값(100%)으로 묶여 분지되었다. 서천 시료 1마리(JX020971)는 우점 서열에 대해 4.84%의 유전거리를 나타내는 서열 변이를 보였다(Fig. 1).

벼밤나방 월동유충의 발육특성

월동 중인 벼밤나방 유충을 채집 후 바로 25°C 장일조건에서 사육한 실험에서, 2012년 10월 서천에서 채집된 유충들 중 일부 개체들은 유충 탈피 없이 용화하였다(Table 2). 4개체는 1회 유충 탈피를 보였으나 모두 용화하지 못했다. 2012년 10월과 11월에 군산에서 채집된 유충들은 유충 탈피 없이 용화하거나 1회 혹은 2회 탈피 후 용화하였다. 2013년 3월 경남 고성에서 채집된 5마리 유충은 모두 탈피 없이 용화하였다. 가온 사육 후 용화 전까지 평균 8.5일에서 18일까지의 기간이 소요되었고, 1회 혹은 2회 탈피한 개체들의 마지막 유충 영기간은 평균 2.9일에서 8.8일 사이로 나타났다. 용기간은 모든 처리 집단에서 10~11.3일 사이로 집단 사이에 큰 차이가 없었다. 용화율은 채집시기가 늦어질수록 높은 경향이였다. 번데기의 용화율은 채집시기의 순서와 무관하게 나타났다. 우화한 성충들의 성비는 크게 편향되지 않았다.

한편, 채집한 유충을 수원으로 옮겨와 가온 없이 야외조건에서 사육한 개체들의 경우 모든 개체들이 용화하지 못했다(Table 3). 일부 개체들은 유충 상태로 사망하기 전에 1회 혹은 2회 탈피하였다.

벼밤나방 성페로몬트랩에서 비표적종의 포획 비율

2021년에 북위 38도 부근의 세 지역에서 성페로몬 트랩에 포획되어 COX1 유전자로 동정된 132마리 성충 가운데 벼밤나방이 아닌 다른 종으로 밝혀진 종은 32종으로 총 46마리였고, 비표적종 포획비율은 약 35%였다(Table 4). 이들 비표적종에서 외형으로 벼밤나방으로 잘못 동정된 종은 없었다.

성충 발생 시기와 발생 세대 추정

2020년과 2021년에 북위 38도 부근의 세 지역에서 조사된 벼밤나방 성충 발생 양상에서(Fig. 2), 최서단인 백령도 지역에서는 두 해의 양상으로 5월 중순과 7월 중순 사이와 8월 초순과 9월 하순 사이에 2회 벼밤나방 성충이 발생하였다고 판단하였다(Fig. 2 A, D). 연천에서는 2020년에만 2회기로 추정된 발생이 관찰되었고, 두 해를 종합하여 5월 하순에서 6월 하순까지 1회기, 7월 하순부터 이후의 2회기의 연 2회 발생을 추정하였다(Fig. 2 B, E). 최동단인 고성(강원)에서는 5월 중순부터 7월 초순 사이와 7월 하순부터 9월 초순 사이, 9월 하순부터 10월 초순 사이의 3회 발생이 관찰되었다고 판단하였다(Fig. 2 C, F). 한 세대의 발육에 필요한 온도량을 이용하여 세대 진전(순방향 혹은 역방향)을 추정한 결과에서 두 해의 백령도와 2020년의 연천 지역에서 임의로 구분한 성충 세대 기간과 추정된 성충 세대 기간의 시기적으로 크게 벗어나지 않았다. 백령도의 경우에 노숙유충(유충기의 65% 발육)을 생성하는 성충 세대는 2회기 발생시기와 겹쳐 나타났다. 2020년 백령도에서는 2회기 성충 시기에서 3회기 성충 발생 시기가 추정되지 않았다. 2021년 백령도와 2020년 연천에서 2회기 성충 시기에서 10월 이후의 3회기 성충 발생 시기가 추정되었으나 적어도 성충 발생을 관찰한 시기 안에서 3회기 성충 발생을 탐지하지 못했다. 또 2021년 백령도에서 가상의 월동 유충을 생성하는 성충 발생 시기인 8월 28일~9월 11일 기간은 3회기 성충 발생 가능 기간으로 추정된 10월 8일~11월 15일 기간보다 최소 26일 크게 빨랐다. 2020년 연천에서도 가상의 월동 유충을 생성하는 성충 발생 시기인 8월 21일~8월 30일 기간은 3회기 성충 발생 가능 기간으로 추정된 10월 1일~10월 19일 기간보다 최소 32일 빨랐다(Supplement table 1). 이들 결과를 바탕으로 백령도와 연천에서는 벼밤나방이 연중 2세대를 경과했을 것으로 판단하였다. 고성(강원)에서 1회기와 2회기 성충 발생 관찰 시기와 추정된 발생 시기는 크게 다르지 않았다. 그러나 2회기 성충 시기로부터 추정된 3회기 발생 추정 시기는 10월 초순부터 11월 중순 사이로 9월 말에서 10월 초 발생되어 3회기로 규정한 관찰 시기보다 지

연되었다. 2020년 고성에서 월동할 노숙 유충을 생성시킬 것으로 추정된 성충 발생 시기는 2회기 발생 시기에 포함되었다. 그러나 2021년의 해당 시기는 2회기와 3회기 발생 시기 사이에 위치하였다. 이상의 결과로부터 고성에서는 2020년은 2세대가 경과하였고, 2021년에는 2세대 혹은 3세대가 경과했을 것으로 판단하였다.

북위 34°~37° 사이에 위치한 지역들에서는 5월 초부터 10월 초 사이에 벼밤나방 성충의 발생이 관찰되었다(Fig. 3). 대부분의 지역에서 연중 3회 발생하는 것으로 판단하였으나 2회기와 3회기를 명확하게 구분하기 어려웠다. 수원에서는 2012년 1회기로 추정된 발생만 관찰되었고, 2013년에는 2회기가 관찰되지 않고 3회기 성충으로 추정되는 발생이 관찰되었다(Fig. 3 A, B). 수원과 유사한 위도에 위치한 이천에서는 5월 초부터 6월 중순 사이의 1회기, 7월 말에서 8월 초 사이의 2회기, 8월 하순부터 9월 하순 사이의 3회 발생이 나타났다고 판단하였다(Fig. 3 C). 충청남도 서쪽에 위치한 서산(Fig. 3 D, E)과 홍성(Fig. 3 F), 보령(Fig. 3 G)에서는 5월 초순부터 6월 하순의 1회기, 7월 초순부터 8월 초순까지의 2회기, 8월 초순부터 10월 중순의 3회기로 구분되었다. 충남 서천은 7월 중 발생피크가 관찰되지 않아 2회기 구분이 어려웠는데, 연속되는 발생 양상의 분리시점인 8월 말을 기준으로 8월 중의 2회기, 9월 초순부터 10월 초순 사이의 3회기로 구분하였다(Fig. 3 H). 전라북도 군산과 익산, 김제의 경우에도 4월 말부터 6월 중순, 7월 초순부터 8월 초중순, 8월 초중순부터 9월 하순까지 3회 발생이 나타나는 것으로 판단하였다(Fig. 3 I, J, K). 2013년 전라남도 강진에서는 7월 하순부터 9월 초순 사이의 연속된 발생만이 관찰되어 성충 발생 세대를 규정하지 못했다(Fig. 3 L). 경상남도 밀양에서는 관찰된 두 해를 종합하여 5월 초순부터 6월 초순 사이의 1회기, 6월 하순부터 8월 초순 사이의 2회기, 8월 하순부터 10월 초순 사이의 3회기 발생이 있었던 것으로 판단하였다(Fig. 3 M, N). 김해에서는 5월 초순부터 6월 중순 사이의 1회기, 7월 중의 2회기, 8월 중하순의 3회기의 3회 발생이 있었던 것으로 추정하였다(Fig. 3 O). 앞의 고위도 지역에서와 같이 세대 완성에 필요한 온도량을 이용하여 성충 발생 시기를 추정하였을 때, 추정된 발생 시기는 대부분의 지역에서 관찰된 성충 시기로 구분된 해당 세대의 발생 시기와 겹쳐 나타났다(Supplement table 1). 또 월동유충을 생성시킨다고 추정하는 성충 발생 시기는 3회기 발생 시기 안에 포함되었다. 그러나 2012년 서천에서는 임의로 구분한 성충 발생 시기와 추정 시기가 일치하지 않았고, 월동유충 생성 성충 발생 시기는 임의로 구분한 2회기 성충 시기에 포함되었다(Fig. 3 H). 전체 경향을 고려하여 이들 지역에서는 해당 연도에 연중 3세대를 경과했다고 판단

하였다. 한편, 1968년 김제와 김해, 2013년 밀양에서는 3화기 성충 시기로부터 4화기 발생 시기가 추정되었다(Fig. 3 K, N, O). 이중 김제와 밀양에서는 월동유충을 생성시키는 성충 발생 추정 시기는 3화기 발생 시기 안에 포함되었다. 김해에서는 월동유충을 생성할 것으로 추정한 성충 시기는 3화기와 추정된 4화기 사이에 위치되었다.

고찰

2011~2013년 서천과 군산, 영광의 벼 포장에서 가을철에 채집한 유충을 COX1 유전자 염기서열로 동정한 결과, 벼밤나방으로 추정된 20마리 가운데 19마리가 COX1 유전자 염기서열로 벼밤나방으로, 이화명나방으로 추정된 3마리는 모두 이화

Table 1. Number of overwintering larvae of *Sesamia inferens* and *Chilo suppressalis* in several rice fields

Sampling site	Sampling date	Total No. and relative ratio (%) (in parenthesis) of larvae collected ³⁾	
		<i>S. inferens</i>	<i>C. suppressalis</i>
Seocheon (36.07°N 126.41°E)	2011. 9. 28. ²⁾	113 (100.0)	0 (0.0)
	2012. 10. 10.	6 (100.0)	0 (0.0)
	2012. 10. 17.	41 (100.0)	0 (0.0)
		104 (91.2)	10 (8.8)
Gunsan (35.55°N 126.50°E)	2012. 10. 18.	[1.7 ± 1.8 larvae per hill, maximum 6 per hill, damaged hill ratio 72.0%] ⁴⁾	[0.4 ± 0.8 larvae per hill, maximum 2 per hill, damaged hill ratio 24.0%] ⁴⁾
	2012. 11. 28.	61 (64.9)	33 (35.1)
	2012. 12. 13.	0 (0.0)	11 (100.0)
	2013. 1. 22.	1 (1.7)	57 (98.3)
	2013. 1. 31.	0 (0.0)	37 (100.0)
Yeongkwang (35.15°N 126.33°E)	2011. 9. 22. ²⁾	5 (62.5)	3 (37.5)
Goseong (GN) (34.58°N 128.20°E) ¹⁾	2013. 3. 7.	5 (45.5)	6 (54.5)

The sampling sites on different dates in an area do not necessarily represent the same rice fields. ¹⁾This region is located in Gyeongsangnam-do (GN). ²⁾Larvae were collected from rice stems with white head before harvest, whereas larvae in the other samples were collected from rice stem stumps after harvest. ³⁾The total number of hills observed was not counted. ⁴⁾Twenty-five hills were investigated separately to analyze the density of the two insect species. On two hills, larvae of both species were found, whereas no larvae were found on three of the hills.

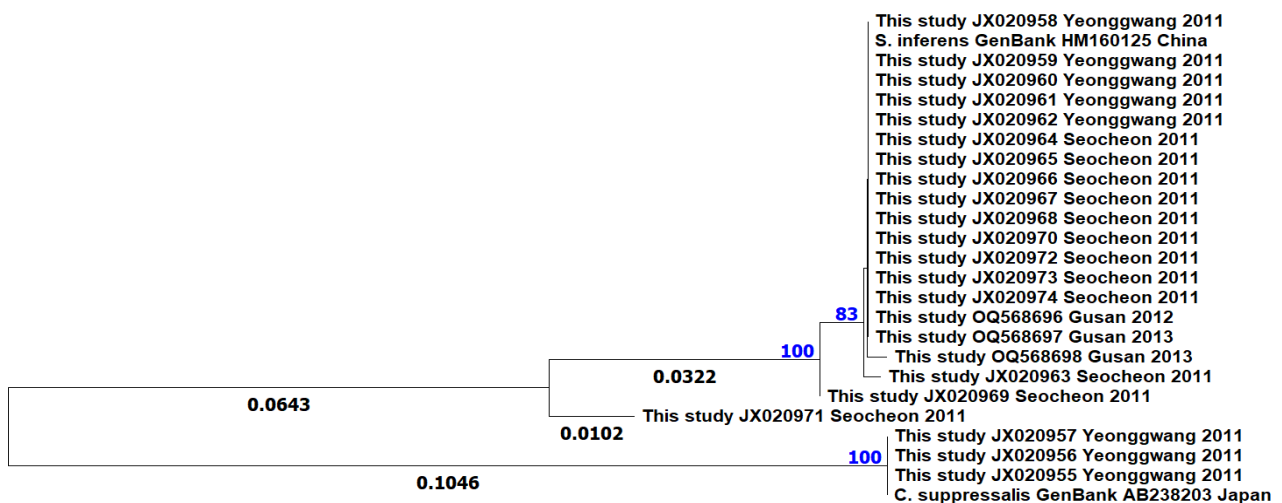


Fig. 1. Neighbor-joining relationship among partial nucleotide sequences (391 bp) of the cytochrome c oxidase 1 subunit gene in the overwintering larvae of *Sesamia inferens* and *Chilo suppressalis* collected from paddy fields. Bootstrap estimation of 1,500 replicates was conducted using Kimura 2-parameter and pair-wise models. The numbers below and on the bars indicate genetic distance (1/100%) (black letters) and bootstrap confidence (%) (blue letters) values, respectively.

Table 2. Developmental properties of *Sesamia inferens* overwintering larvae reared at 25°C

Sampling site ¹⁾ Samling date Rearing start date	No. treated	Additional molting times	Developmental period (days) after rearing (No. in parenthesis)				Pupation rate (%)	Pupal period (days) (No. in parenthesis)	Emergence rate (%)	Female ratio
			Before 1st molting	Between 1st and 2nd molting	Between last molting and pupation	Before pupation				
Seocheon 2012.10.10. 2012.10.13.	6	0 1		11.0 (1)	(0)	(0)	18.0 (1) 16.7	10.0 (1) -	100.0	1.00 -
2012.10.17. 2012.10.19.	20	0 1	5.0 ± 0.0 (3)		(0)	(0)	14.3 ± 3.4 (6) 30.0	11.0 ± 0.0 (3) -	50.0	0.67 -
Gunsan 2012.10.18. 2012.10.19.	50	0 1 2	5.7 ± 1.8 (16)		8.8 ± 2.7 (8)	14.0 ± 2.6 (8)	12.1 ± 0.3 (11) 40.0	10.2 ± 1.0 (9) 10.8 ± 1.6 (6)	75.0	0.56 0.33 -
2012.11.28. 2012.11.29.	38	0 1	8.4 ± 1.7 (9)		2.9 ± 2.5 (8)	11.3 ± 0.7 (8)	8.5 ± 1.9 (22) 78.9	11.3 ± 1.5 (12) 11.3 ± 1.9 (4)	53.3	0.67 0.50
Goseong (GN) 2013.3.7. 2013.3.8.	5	0				15.0 ± 4.8 (5)	100.0	11.3 ± 1.0 (4)	80.0	0.50
		0				11.1 ± 3.6 (45)		10.9 ± 1.2 (29)		0.62
Total	119	1 2	6.7 ± 2.3 (29)	8.0 ± 0.0 (2)	5.8 ± 3.9 (16)	12.6 ± 2.3 (16)	52.1	11.0 ± 1.6 (10)	62.9	0.40 -
Total mean	119	Total	6.5 ± 2.2 (31)	8.0 ± 0.0 (2)	5.7 ± 3.8 (17)	11.6 ± 3.4 (62)	-	10.9 ± 1.3 (39)	-	0.56

¹⁾Larvae (shown in Table 1) were moved from the sampling sites to Suwon (37.27°N 126.98°E), and reared at a constant environmental condition, 25°C and 15:9 h (light:dark).

Table 3. Developmental properties of *Sesamia inferens* overwintering larvae reared under outside conditions

Sampling site ¹⁾	Samling, date	No. treated	Additional molting times	Developmental period (days) after rearing (No. in parenthesis)		Pupation rate (%)
				Before 1st molting	Between 1st and 2nd molting	
Seocheon	2012.10.17.	21	1	16.2 ± 11.0 (5)		0.0
			1	13.5 ± 9.0 (19)		
Gunsan	2012.10.18.	54	2	10.5 ± 3.5 (2)	10.5 ± 7.8 (2)	0.0
	2012.11.28.	21				0.0

¹⁾Larvae (shown in Table 1) were moved from the sampling sites to Suwon (37.27°N 126.98°E), and reared outdoors.

명나방으로 동정되었다. 이 결과는 당시 벼 포장에 서식하면서 줄기 피해의 대부분에 원인이 되었을 해충종이 이 두 종이었던 것을 나타냈다. 단, 2011년 서천 유충에서 분석된 12개 COX1 서열 중 1개 서열(JX020971)이 우점 집단 서열과 4.84%의 유전거리를 보여 벼밤나방이 아닌 유사종이 섞여 있을 가능성도 제기되었다. 이와 관련하여 2020년과 2021년 백령도와 연천, 고성(강원)의 성페로몬트랩에 포획된 벼밤나방 성충 COX1 염기서열 약 230개에 대한 별도의 분석에서, 4개 서열만이 위 벼밤나방 유충의 우점서열 집단 범위 안에 묶이지 않았고, 이 중 1개 서열은 JX020971과 높은 서열유사도를 갖는 결과를 얻었다

(Jung, J.K., unpublished observation). 한편, NCBI GenBank에 현재까지 벼밤나방으로 등록된 COX1 서열들은 서로 2% 이상의 유전거리를 보이는 3개 이상의 집단으로 분지되는 것으로 보인다(Dey et al., 2021; Jung, J.K., unpublished observation). 이는 COX1 서열 비교만으로는 벼밤나방 동정이 높은 신뢰성을 갖지 못할 가능성을 나타내고 있다. 이런 의문점을 포함하여 국내에서 얻어진 벼밤나방 COX1 서열에 대한 분석 결과를 별도로 보고할 예정이다.

2011년 수확 전 벼 포장에서 흰이삭 피해를 받은 벼 줄기에서 영광에서 벼밤나방과 이화명나방이 같이 발견되었거나(벼

Table 4. Non-target species adults caught in sex pheromone traps of *Sesamia inferens* in Baengnyeong, Yeoncheon, and Goseong (GW¹⁾) located around 38° latitude, 2021 identified using partial nucleotide sequences (658 bp) of the chytochrome c oxidase 1 gene

Species categorized by Family (No. in parenthesis) (total 46 insects of 32 species, 46/32)
Crambidae (8/7): <i>Chilo luteellus</i> (1), <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> (2), <i>Conogethes punctiferalis</i> (1), <i>Elophila turbata</i> (1), <i>Glyphodes pyloalis</i> (1), <i>Parapediasia teterrella</i> (2), Crambidae sp. (1)
Depressariidae (1/1): <i>Scythriodes malivora</i> (1)
Erebidae (7/5): <i>Herminia tarsicrinalis</i> (2), <i>Herminia</i> sp. (3), <i>Pangrapta perturbans</i> (1), <i>Paracymoriza</i> sp. (1)
Gelechiidae (1/1): <i>Dichomeris</i> sp. (1)
Geometridae (2/2): <i>Scopula</i> sp. (1), Geometridae sp. (1)
Limacodidae (1/1): <i>Microleon</i> sp. (1)
Noctuidae (13/7): <i>Acosmetia chinensis</i> (4), <i>Anomis mesogona</i> (1), <i>Athetis lepigone</i> (1), <i>Niphonyx segregata</i> (2), <i>Mythimna separata</i> (2), <i>Spodoptera exigua</i> (2), <i>S. litura</i> (1)
Nolidae (4/1): <i>Nola taeniata</i> (4)
Pyralidae (4/2): <i>Aphomia zelleri</i> (1), <i>Comorta</i> sp. (3)
Tortricidae (5/5): <i>Bactra lancealana</i> (1), <i>Celypha</i> sp. (1), <i>Epiblema strenuana</i> (1), <i>Eucosma</i> sp. (1), Olethreutinae sp. (1)

Total 132 sequences including those of *S. inferens* and other species were analyzed in the BLAST service in GenBank. A species matched with sequence similarity more than 99% to the species registered in GenBank was regarded as the registered species.

¹⁾GW: Gangwon-do

Table 5. Thermal constants (K) for complete development of different stages of *Sesamia inferens*

Stage	K (degree days)	Developmental period (days) estimated at 25°C
Egg	54.50	4.16
Larva	429.96	32.82
Larva 65% development	279.47	21.33
Egg and larva 65%	333.97	25.49
Egg and larva	484.46	36.98
Pupa	181.32	13.10
Total immature	665.78	50.82

The thermal constants [mean $K = D \times (T - LDT)$] were acquired using a common lower developmental threshold (LDT), 11.90°C that the LDTs for the different stages of *S. inferens* presented in Selvaraj et al. (2015) were averaged. D indicates the developmental period (days) at an experimental temperature (T, °C), in which the data for D and T values from Selvaraj et al. (2015) were used. The K values at different temperatures for each insect stage were averaged as the mean K for the stage.

밤나방 분포 상대비율 62.5%) 서천에서는 벼밤나방만이 발견된 결과(Table 1)는 당시 수확기의 흰이삭 피해의 전부(서천) 혹은 일부(영광)가 조사된 벼밤나방의 상대 비율에 비례하여 발생했을 가능성을 의미한다. 2012년 10월과 11월 서천(벼밤나방 100%)과 군산(10월과 11월 벼밤나방 상대비율 평균

78.1%)의 수확 후 벼 잔재 줄기 밑둥에서 조사된 벼밤나방 상대 비율에 의해서도 벼 수확 전 해당 포장에서 벼밤나방이 흰이삭 피해의 상당 부분을 야기한 역할을 했을 것으로 추정되었다. 그러나 더 이른 벼 재배기간 중에 벼 포장에 서식했던 두 해충의 이전 세대 개체군들의 분포 비율은 알 수 없기에, 가을철 두 해충의 분포 비율이 그 해 벼 재배기간 전체의 분포 비율을 대표할 수는 없다.

한편, 2012년과 2013년 군산의 동일 지역 벼 포장에서 10월과 11월에 이화명나방보다 벼밤나방이 많은 수로 발견되었으나 12월과 1월에는 거꾸로 벼밤나방이 거의 발견되지 않았는데, 이는 가을철 벼 포장에 서식했던 벼밤나방 유충이 겨울을 지나는 동안 월동하지 못하고 대부분 사망했을 것으로 추정된다. 이와 같은 추정은 10월과 11월중 서천과 군산에서 채집한 유충들을 겨울철 기온이 더 낮은 수원으로 옮겨져 야외 지상부에서 사육하였을 때 모든 개체가 용화하지 못했던 결과로 뒷받침된다. 그러나 경남 고성(북위 34.6°)에서 2013년 3월에 벼밤나방 유충을 발견한 사실은 적어도 그 지역에서 벼밤나방이 월동할 수 있는 가능성을 보여준다. 현재까지 국내에서 벼밤나방이 벼 포장에서 월동이 가능한 지역에 대한 정보로는 본 연구의 고성(경남)에서의 채집 결과와 Bae et al. (1969)이 밀양(35.5°N)에서 3월 중 채집한 유충을 야외 망실에서 성충으로 우화시켜 월동을 증명한 결과로부터 추정된 두 지역뿐이다. 즉, 현재까지는 국내 남부의 일부 지역에서만 벼 포장에서 벼밤나방이 월동 성공률이 높을 가능성을 나타내고 있다. 이와 관련하여 벼밤나

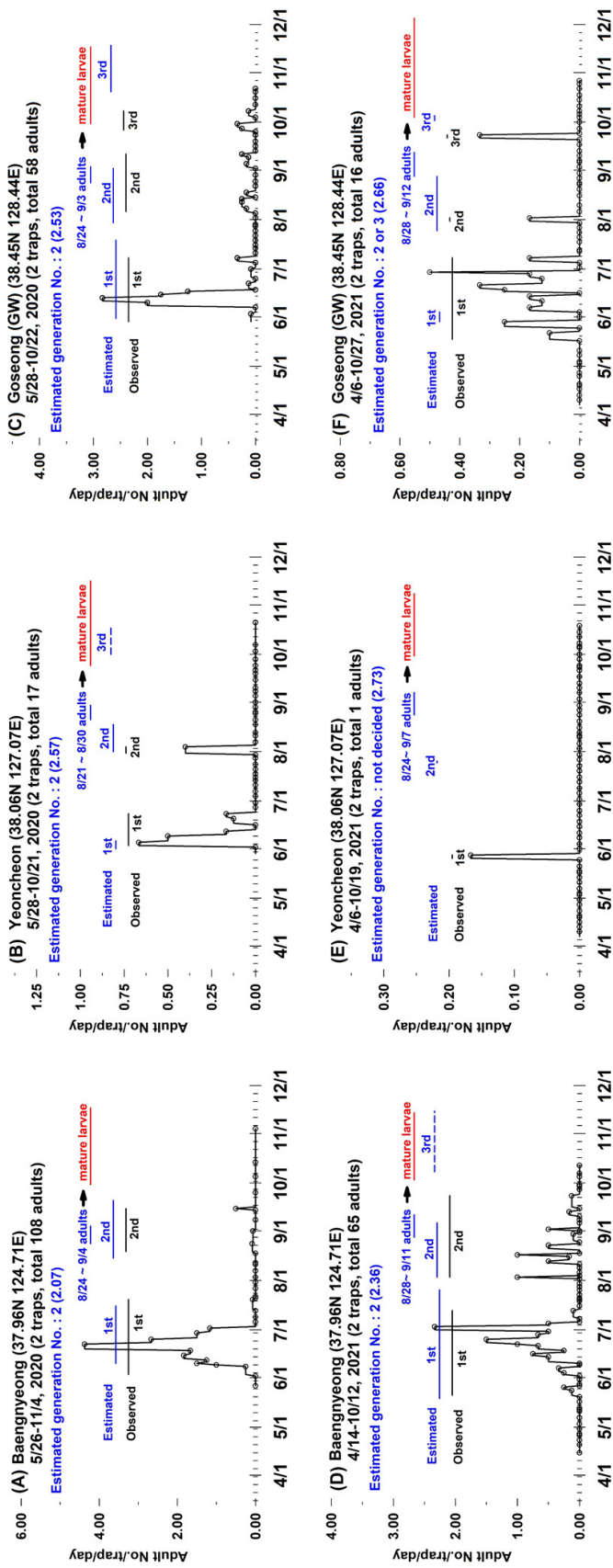


Fig. 2. Annual occurrence patterns and generations (black letters and lines) of *Sesamia inferens* adults investigated using sex pheromone traps, and adult generations (blue letters and lines) estimated with the single-sine degree-day model in three northernmost areas near 38° north latitude in Republic of Korea, 2020 and 2021 (A and D: Baengnyeong; B and E: Yeoncheon; C and F: Goseong, Gangwon-do(GW)). The blue dashed line in the graph indicates the period during which adult emergence was not observed or not investigated during the corresponding season. The occurrence seasons of mature larvae (red letters and lines) and the seasons of parent adults were estimated using the degree-day model. Numerical values in parentheses following the final estimated generation number are those in which the effective developmental temperatures accumulated in the year were divided by the thermal constant for the development completion of the total immature stage.

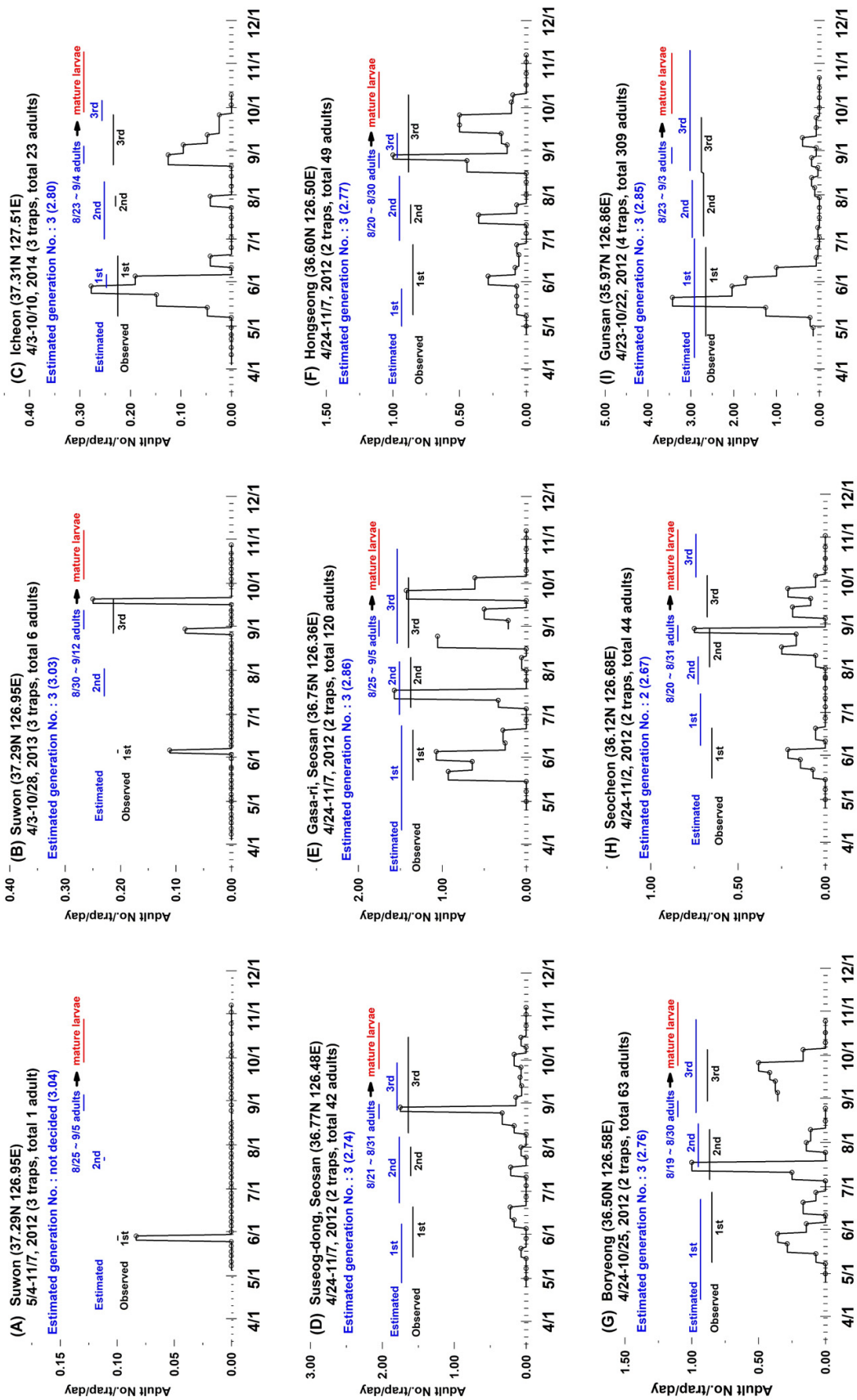


Fig. 3. Annual occurrence patterns and generations of *Sesamia inferens* adults investigated using sex pheromone traps, and adult generations estimated using the single-sine degree-day model in several areas between 34° and 37° north latitudes (A and B: Suwon; C: Icheon; D and E: different sites in Seosan; F: Hongseong; G: Boryeong; H: Seocheon; I: Gunsan; J: Iksan; K: Gimje; L: Gangjin; M and N: Milyang; O: Gimhae). All indicators in the graphs are identical to those in Fig 2. The density fluctuations in Gimje (K) and Gimhae (O) were re-constructed using the light trap data from Bae et al. (1969).

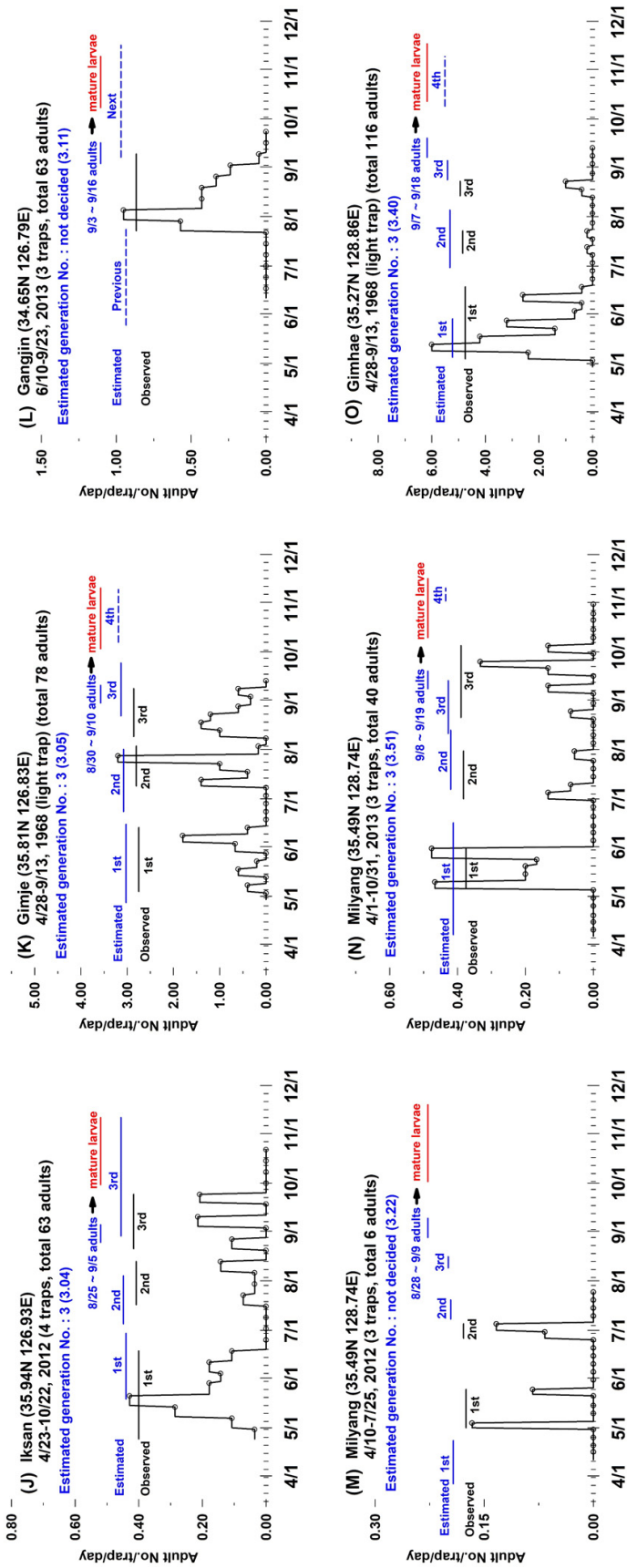


Fig. 3. Continued.

방의 내한성 특성으로, Sun et al. (2014)이 중국 강소성 양주시 (32.4°N) 벼 줄기 잔재물에서 10월에 채집한 유충들을 여러 영하온도에 각각 2시간 동안 처리하여 반수 치사온도(LT₅₀)를 -6.12°C, 90% 치사온도를 -9.77°C로 제시하였다. Huang et al. (2020)은 중국 하남성 안양시(35.6°N) 옥수수 줄기 잔재물에서 11월에 채집된 유충을 토양 속에 보관하면서 11월과 2월 사이 4차례 각각 일정 영하온도들을 순차적으로 처리(7개 온도, 12시간 간격)하여 지하부(지표 아래 2 cm) LT₅₀를 -4.5°C, 지상부(지상 10 cm) LT₅₀를 -9.7°C로 추정하였다. 두 보고는 각각 평균 -6.8°C와 -7.6°C의 월동유충 최저 과냉각점을 제시하였고, 벼밤나방의 유충의 내한성을 동결저항성(freeze-tolerant)으로 추정하였다.

북위 36.8~38.2°의 중국 화북성 지역에서 3월 중 토양 속 옥수수 잔재물에서 벼밤나방 유충이 어느 정도 자란 단계로 월동하는 것을 발견한 보고(Zhang et al., 2019)에 근거하여, 북위 38°의 최북단 지역을 포함한 국내 전 지역에서 벼 포장에 아닌 다른 월동 서식처(기주식물과 월동 위치)에서 벼밤나방이 월동할 가능성을 배제할 수 없다. Liu et al. (2011)은 중국 저장성 항주시(30.3°N, 120.2°E)에서 7~10월 사이 조사한 벼밤나방 기주 식물 종류에서 유충 서식 밀도가 높은(100주당 6마리 이상) 기주식물로 벼과에서 벼 이외에 옥수수, 줄(*Zizania latifolia*), 사초과에서 너도방동사니(*Cyperus serotinus*), 부들과의 애기부들(*Typha angustifolia*)이, 중간정도의 서식밀도(100주당 2.4~6마리)를 보인 식물로 벼과의 돌피(*Echinochloa crus-galli*), 사탕수수(*Saccharum officinarum*), 수수(*Sorghum bicolor*), 왕바랭이(*Eleusine indica*), 물억새(*Miscanthus sacchariflorus*)를 보고하였다. 이에, 국내에서 현재 벼가 유일한 기주식물로 기록되었으나(Park et al., 2006), 벼 포장에서 월동이 어려운 지역에서 주변의 다른 기주식물종에 서식하는 개체군에 대한 조사가 필요할 것으로 생각된다.

군산에서 2012년 10월에 채집된 후 실내 사육에서 용화에 성공한 유충들 중 45%는 용화 전에 1회 혹은 2회 탈피하였다. 11월 채집 집단에서는 약 27%의 유충이 용화 전 1회 탈피하였다(Table 2). 또 10월 중 서천과 군산에서 채집한 유충의 야외 사육에서 모든 개체가 월동 중 사망하였으나, 몇 개체는 채집 후 약 21일 전까지 1회 혹은 2회 탈피한 것이 관찰되었다(Table 3). 이 결과는 해당 채집지역의 개체군의 당시 유충 발육에 기온이 최저로 내려가기 전에 탈피를 통한 발육과정을 더 진행하는 개체들이 섞여 있을 가능성을 보여주었다. 그러나 동시에 가을철 채집되어 25°C에서 용화한 개체들의 70%가 추가된 유충-유충 탈피를 하지 않았거나, 고성에서 겨울을 지나 3월 초에 채집된 유충이 비록 적은 수이나 모두 탈피 없이 용화한 사실은 벼밤나

방이 최종 발육단계의 유충으로 월동하는 비율이 높을 가능성을 나타낸다. 중국 여러 지역개체군에서 월동기간 중에 3~4령 혹은 노숙유충(Zhang et al., 2019), 혹은 대부분 5령으로 월동하고 4령과 6령도 발견된다는 보고(Sun et al., 2014)가 있어, 월동 유충의 구체적인 영기를 규정하기는 어렵다. 또, 벼밤나방 유충의 영기 수는 채집개체군이나 발육시기에 따라 5령과 6령, 8령 등으로 다양하게 보고되어 있다(Krishnan and Chander, 2015; Singh and Kular, 2015; Sharma et al., 2017; Roopika et al., 2022). 이는 벼밤나방이 환경에 따라 유충 영기 수에 개체 변이를 보이는 다른 곤충종(Esperk et al., 2007; Jung et al., 2022c; Kim et al., 2022)들과 유사한 속성을 갖는 것을 의미한다. 이와 관련하여 벼밤나방의 동속종이며 유럽 지역의 옥수수 해충인 *S. nonagrioides*는 단일조건에 의해 휴면에 유도되고 인위적 휴면 조건에서 두폭 증가를 수반하는 최대 13 혹은 15개의 유충영기를 경과한다는 기록이 있다(Fantinou et al., 1996; Gadenne et al., 1997). 벼밤나방의 경우 휴면과정에서 유충의 탈피 특성이 보고되어 있지는 않다. 단 본 연구의 군산에서 10월과 11월 채집한 유충의 25°C 실내 가온 사육에서 마지막 탈피 후 용화까지 기간이 2일 정도로 매우 짧게 기록된 개체들의 출현은 벼밤나방이 *S. nonagrioides*의 속성과 유사하게, 불리한 환경에서 영기 수를 늘리는 발육특성을 보일 수 있다고 사료된다.

본 연구에서 벼밤나방 성충 밀도 변동 탐지에 국내에서 처음으로 성페로몬트랩을 이용하였다. 2021년 포획성충의 COX1 유전자 분석 결과에서 비표적종 포획 비율이 약 35%로 나타났다. 이는 곤충 성페로몬의 종특이적인 일반 특성을 고려하고(Boo et al., 2005), 담배거세미나방(*Spodoptera litura*)의 성유인제가 종특이적 포획률이 매우 높은 것과 비교한다면(Jung et al., 2022a), 본 연구의 벼밤나방 성페로몬 조성은 종특이성 정도가 상대적으로 크지 않은 것으로 판단되었다. 포획된 비표적종 가운데 멸강나방(*Mythimna separata*)이나 파밤나방(*Spodoptera exigua*)은 본 연구에서 벼밤나방 성페로몬으로 사용한 (Z)-11-hexadecenyl acetate 혹은 (Z)-11-hexadecen-1-ol을 해당 종의 성페로몬 성분으로 사용하기 때문에(Zhu et al., 1987; Tumlinson et al., 1990; Acin et al., 2010), 실제로 야외에서 벼밤나방 처녀 암컷이 방출하는 성페로몬에 유인될 가능성도 있다. 또 본 연구에서 사용된 벼밤나방 성페로몬 조성 안에 포함된 불순물 성격의 다른 화합물들에 반응하여 비표적종들이 포획되었을 가능성이거나 현재 알려진 벼밤나방 성페로몬 조성의 불완전성일 가능성이 있다. 벼밤나방 성페로몬 조성에 관한 연구는 Nagayama et al. (2006) 이후 적극적으로 시도되지 않아 앞으로 성페로몬의 세밀한 조성에 관한 연구는 더 필요할 것으로 보인다. 한편, 본 연구에서 사용한 성페로몬 미끼가 벼밤나

방 성충 발생 시기를 민감하게 탐지하거나 성충 밀도변동 양상을 정확하게 반영하고 있는가에 대해서는 본 연구의 실험 자료로 정확하게 판단할 수 없다. 그러나 비표적종 가운데 외형으로 벼밤나방으로 오동정한 종이 거의 없었고, 백령도와 고성(강원)에서 두 해에 걸쳐 조사한 성충 발생 양상의 유사성, 충남 서천을 제외한 다른 서쪽 지역들에서 연중 성충 발생 양상의 유사성 및 세대 수에서 관찰된 발생시기와 추정된 발생시기가 서로 크게 다르지 않은 결과들에 기반하여 본 연구의 성페로몬 트랩으로 조사된 연중 성충 밀도 변동 양상을 설정한 데에 큰 오류를 일으키지 않았다고 판단되었다.

본 연구에서 가을철 월동유충(본 연구에서 유충기의 65%를 지난 유충)을 발생시킬 것으로 가정된 성충 발생시기와 겹치는 추정된 성충 세대(마지막 세대의 이전 세대)를 참고하여 실제 연중 경과할 수 있는 세대 수를 판단하였다. Bae et al. (1969)는 인위적으로 야외에서 사육한 세대에서 월동에 들어가는 것으로 판단한 유충들이 대부분 마지막 세대였고 일부 월동유충이 2세대였다고 보고하였다. 이는 본 연구에서 벼밤나방 월동유충의 대부분이 마지막 세대일 것으로 추정된 것과 유사하였고, 월동유충 생성 성충세대를 기준으로 세대 수를 판단한 방식에 큰 오류가 없을 것을 나타냈다. 이렇게 추정된 벼밤나방의 월동태 세대 특성은 왕담배나방이 수원지방에서 연중 4세대를 보이면서 대부분 마지막 세대의 번데기가 월동에 들어가는 양상(Jung et al., 2015)과 유사하였다. 그러나 휴면유도 조건을 이른 시기부터 받아 개체변이에 의해 연중 2세대와 3세대가 섞여 발생하는 조명나방(Kim et al., 2020)과는 그 속성이 달랐다. 결과적으로 본 연구는 국내 북위 약 38°에 위치한 지역들에서는 벼밤나방이 대체로 연중 2세대, 수원 이하의 위도(제주도 제외)에 위치한 지역들에서는 연중 3세대가 경과하였다고 판단한다. 이는 기온 환경이 다른 지역에서 세대 수가 다름을 나타냈는데, 유사하게 Sun et al. (2014)이 중국에서 강소성(30.8~35.1°N, 116.4~121.9°E), 저장성(27.2~31.2°N, 118.0~122.1°E), 안휘성(29.4~34.6°N, 114.9~119.6°E)에서 연중 3~4세대, 광둥성(20.3~25.5°N, 109.8~117.2°E) 남쪽과 해남성(18.2~20.1°N, 108.6~111.0°E)에서 6~8세대가 발생한다는 결과들을 수집하여 기온 환경이 다른 지역에서의 벼밤나방 세대 수 차이를 제시하였다. 단, 앞으로 반복적인 성충예찰과 휴면에 들어가는 월동유충 생성시기에 대한 구체적인 실험을 거쳐 국내 각 지역별 발생 특성을 정밀하게 제시할 필요가 있다.

본 연구에서 유충의 월동 가능성이 확인되지 않은 지역에서 1회기 성충세대의 기원이 어디에서 비롯되었는지는 판단할 수 없었다. 앞에 언급된 다른 기주식물에서 혹은 서식 위치에 따라 월동할 가능성을 배제한다면, 해외를 포함한 다른 지역으로부터

터의 장거리 이동에 의한 이입을 가정할 수 있다. 벼밤나방 성충이 flight mill에서 32 km 이상의 거리를 비행할 수 있었다는 보고가 있었으나(Sun et al., 1993), 장거리 비행 가능성이 추정되거나 직접 관찰된 보고는 아직 없다. 비행 능력과 장거리 이동에 관한 내용도 월동처 규명과 함께 자세히 검토되어야 할 것이다.

본 연구는 국내(남한) 전 지역에서 벼밤나방 발생이 탐지된다는 구체적인 결과를 제시하였다. 최북단 지역들에서는 대체적으로 연중 2세대가 발생한다고 추정하였으나 해당 지역의 기온에 따라 3세대 발생도 가능할 수 있다고 제시하였다. 수원부터 김해 사이의 지역들에서는 대체로 연중 3세대 발생을 추정하였다. 벼 포장에서 유충의 월동은 Bae et al. (1969)와 본 연구에서 제시된 밀양과 고성(경남)과 유사한 기온환경을 갖는 지역에서 가능하다고 판단되었다. 그러나 월동처에 따라 겨울기온이 더 낮은 지역에서의 월동 가능성을 배제하지 않았다. 월동태는 유충 최종 발육단계로 월동하는 비율이 높을 것으로 추정하였다. 또 성페로몬트랩으로 벼밤나방 성충 탐지와 밀도 변동 조사가 가능하다고 제시하였다. 그러나 벼밤나방 연중 생활사를 정밀하게 해석할 자료를 본 연구에서는 충분하게 제시하지 못하였다. 따라서 앞으로 벼밤나방의 생태 및 생리 특성에 대한 후속 연구를 통해 벼밤나방 관리에 실용적으로 이용할 수 있는 구체적인 자료를 구축할 필요가 있다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 어젠다 연구과제(PJ1015278012023)를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 바탕으로 작성되었다. 월동유충 채집 과정을 도와준 김주 박사와 최낙중 박사, 이효석 박사에게 고마움을 표한다.

Supplementary Information

Supplementary data are available at Korean Journal of Applied Entomology online (<http://www.entomology2.or.kr>).

Statements for Authorship Position & Contribution

Kim, E.Y.: National Institute of Crop Science, Researcher; Conducted adult monitoring and nucleotide sequencing, and edited manuscript

Park, Y.-M.: Animal and Plant Quarantine Agency, Researcher; Identified insect species

Bae, S.D.: Nambu Plants Environmental Research, Researcher; Conducted adult monitoring
 Lee, G.-S.: National Institute of Agricultural Sciences, Researcher; Identified insect species
 Paik, C.-H.: National Institute of Agricultural Sciences, Researcher; Conducted adult monitoring
 Kim, D.-I.: Jeollanamdo Agricultural Research & Extension Services, Researcher; Conducted adult monitoring
 Lee, W.: Gyeongsang National University, Professor; Analyzed nucleotide sequences
 Seo, B.Y.: National Institute of Crop Science, Researcher; Designed the research, conducted sampling, adult monitoring and species identification, and edited manuscript
 Jung, J.K.: National Institute of Crop Science, Researcher; Designed the research, conducted experiments, analyzed data, and wrote and edited manuscript

All authors read and approved the manuscript.

Literature Cited

- Acín, P., Rosell, G., Guerrero, A., Quero, C., 2010. Sex pheromone of the Spanish population of the beet armyworm *Spodoptera exigua*. *J. Chem. Ecol.* 36, 778-786.
- Bae, S.H., Lee, J.O., Lee, B.H. 1969. Studies on ecology and control for the purplish stem borer (*Sesamia inferens* Walker) in Korea. *Korean J. Plant Prot.* 7, 27-32.
- Banerjee, S.N., Pramanik, L.M., 1964. The lepidopterous stalk borers of rice and their life cycles in the tropics, in: The international Rice Research Institute (Ed.), The major insect pests of the rice plant. The Johns Hopkins Press, Baltimore, MD, pp. 45-101.
- Baskerville, G.L., Emin, P., 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology* 50, 514-517.
- Boo, K.S., Kim, Y.G., Park, K.C., Choi, M.Y., 2005. Insect hormones and physiology, Seoul National University Publishing and Culture Center, Seoul.
- 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.
- Dey, A., Shashank, P.R., Meshram, N.M., Subramanian, S., Jeer, M., Kallelshwaraswamy, C.M., Chavan, S.M., Jindal, J., Suby, S.B., 2021. Molecular diversity of *Sesamia inferens* (Walker, 1856) (Lepidoptera: Noctuidae) from India. *3 Biotech* 11, 134.
- Esperk, T., Tammaru, T., Nylin, S., 2007. Intraspecific variability in number of larval instars in insects. *J. Econ. Entomol.* 100, 627-645.
- Fantinou, A.A., Tsitsipis, J.A., Karandinos, M.G., 1996. Effects of short- and long-day photoperiods on growth and development of *Sesamia nonagrioides* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environ. Entomol.* 25, 1337-1343.
- Fantinou, A.A., Perdakis, D.C., Zota, K.F., 2004. Reproductive responses to photoperiod and temperature by diapausing and nondiapausing populations of *Sesamia nonagrioides* Lef. (Lepidoptera - Noctuidae). *Physiol. Entomol.* 29, 169-175.
- Folmer, O., Black, M., Hoeh, W., Lutz, R., Vrijenhoek, R., 1994. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Mol. Mar. Biol. Biotech.* 3, 294-299.
- Gadenne, C., Dufour, M.-C., Rossignol, F., Bécard, J.-M., Couillaud, F., 1997. Occurrence of non-stationary larval moults during diapause in the corn-stalk borer, *Sesamia nonagrioides* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Insect. Physiol.* 43, 425-431.
- Gao, Y., Hu, Y., Fu, Q., Zhang, J., Oppert, B., Lai, F., Peng, Y., Zhang, Z., 2010. Screen of *Bacillus thuringiensis* toxins for transgenic rice to control *Sesamia inferens* and *Chilo suppressalis*. *J. Invertebr. Pathol.* 105, 11-15.
- Han, L., Han, C., Liu, Z., Chen, F., Jurat-Fuentes, J.L., Hou, M., Peng, Y., 2014. Binding site concentration explains the differential susceptibility of *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens* to Cry1A-producing rice. *Appl. Environ. Microbiol.* 80, 5134-5140.
- Huang, J., Li, G., Lei, H., Fan, C., Tian, C., Chen, Q., Huang, B., Li, H., Lu, Z., Feng, H., 2020. Low-temperature derived temporal change in the vertical distribution of *Sesamia inferens* larvae in winter, with links to its latitudinal distribution. *PLoS ONE* 15, e0236174.
- Jandel Scientific, 1994. Table curve user's manual. San Rafael, CA.
- Jung, J.K., Seo, B.Y., Cho, J.R., 2014. Development of *Matsumuraeses phaseoli* (Lepidoptera: Tortricidae) reared on an artificial diet under outdoor conditions and its over-wintering stage. *Korean J. Appl. Entomol.* 53, 287-293.
- Jung, J.K., Seo, B.Y., Park, C.-G., Ahn, S.-J., Kim, J.I., Cho, J.R., 2015. Timing of diapause induction and number of generations of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) in Suwon, Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 54, 383-392.
- Jung, J.K., Kim, I.H., Kim, E.Y., Seo, B.Y., Moon, Y.-H., 2021. An artificial diet for rearing of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) larvae. *Korean J. Appl. Entomol.* 60, 473-477.
- Jung, C.R., Boo, K.S., Bae, S.D., Han, K.S., 2022a. Optimal composition of sex attractant for monitoring adults of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) in Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 60, 77-83.
- Jung J.K., Kim, E.Y., Han, T., 2022b. Co-occurrence of *Matsumuraeses falcana* and *M. phaseoli* (Lepidoptera: Tortricidae) in soybean

- fields, and polymorphism of cytochrome c oxidase subunit I gene nucleotide. Korean J. Appl. Entomol. 61, 641-649.
- Jung, J.K., Seo, B.Y., Kim, E.Y., 2022c. Effects of temperature on survival, development, and reproduction of the non-diapause Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae). Korean J. Appl. Entomol. 60, 449-462.
- Kaur, J., Kumar, P., Singh, J., Suby, S.B., Bajya, D.R., 2015. Egg laying pattern of *Sesamia inferens* on maize (*Zea mays*). Indian J. Agr. Sci. 85, 109-113.
- Khan, Z.R., Litsinger, J.A., Barrion, A.T., Villanueva, F.F.D., Fernandez, N.J., Taylor, L.D., 1991. World bibliography of rice stem borers, 1794-1990. International Rice Research Institute, Manila.
- Kim, E.Y., Kim, I.H., Seo, B.Y., Kim, Y., Park, C.-G., Jung, J.K., 2020. Diapause and voltinism in *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae) in Suwon, and larval instar sensitivity to diapause induction. Korean J. Appl. Entomol. 59, 185-202.
- Kim, E.Y., Kim, I.H., Jung, J.K., 2022. Developmental and reproductive characteristics of *Mythimna loreyi* (Noctuidae) reared on artificial diets. Korean J. Appl. Entomol. 61, 423-434.
- KMA (Korea Meteorological Administration) website, N.D. <https://data.kma.go.kr> (accessed on 12 May, 2023).
- Kononenko, V.S., Ahn, S.-B., Ronkay, L., 1998. Illustrated catalogue of Noctuidae in Korea (Lepidoptera), in: Park, K.T. (Ed.), Insects of Korea, 3, pp.1-509.
- Krishnan, S., Chander, S., 2015. Simulation of climatic change impact on crop-pest interactions: a case study of rice pink stem borer *Sesamia inferens* (Walker). Clim. Change 131, 259-272.
- Lactin, D.J., Holliday, N.J., Johnson, D.L., Craigen, R., 1995. Improved rate model of temperature-dependent development by arthropods. Environ. Entomol. 24, 68-75.
- Liu, Z., Gao, Y., Luo, J., Lai, F., Li, Y., Fu, Q., Peng, Y., 2011. Evaluating the non-rice host plant species of *Sesamia inferens* (Lepidoptera: Noctuidae) as natural refuges: resistance management of Bt rice. Environ. Entomol., 40, 749-754.
- Nagayama, A., Wakamura, S., Taniai, N., Arakaki, N., 2006. Reinvestigation of sex pheromone components and attractiveness of synthetic sex pheromone of the pink borer, *Sesamia inferens* Walker (Lepidoptera: Noctuidae) in Okinawa. Appl. Entomol. Zool. 41, 399-404.
- Park, K.T., Sohn, J.C., Han, H.L., 2006. Host-plants for larvae of Noctuidae. Economic Insects of Korea 25. Ins. Koreana Suppl. 32, 137pp.
- Park, C.-G., Seo, B.Y., Jung, J.K., Kim, H.-Y., Lee, S.-W., Seong, K.Y., 2017. Forecasting spring emergence of the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae), based on postdiapause development rate. J. Econ. Entomol. 110, 2443-2451.
- Pathak, M.D., Khan, Z.R. 1994. Insect pests of rice. International Rice Research Institute, Manila.
- PlantwisePlus Knowledge Bank website, N.D. *Sesamia inferens* (purple stem borer). <https://plantwiseplusknowledgebank.org/doi/10.1079/pwkb.species.49751> (accessed on 1 April, 2023).
- Roopika, M., Srinivasan, G., Shanthi, M., 2022. Biology of pink stem borer *Sesamia inferens* Walker on barnyard millet *Echinochloa frumentacea*. Indian J. Entomol. 84, 137-139.
- Selvaraj, K., Chander, S., Prasannakumar, N.R., 2015. Determination of thermal constant and development threshold of pink borer, *Sesamia inferens* Walker. Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. B Biol. Sci. 85, 659-662.
- Seo, B.Y., Jung, J.K., Cho, J.R., Kim, Y., Park, C.G., 2012. A PCR method to distinguish *Matsumuraeses phaseoli* from *M. falcana* based on the difference of nucleotide sequence in the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I. Korean J. Appl. Entomol. 51, 365-370.
- Shi, P., Ge, F., Men, X., 2010. How to compare the lower developmental thresholds. Environ. Entomol. 39, 2033-2038.
- Sharma, H., Jaglan M.S., Yadav, S.S., 2017. Biology of pink stem borer, *Sesamia inferens* (Walker) on maize, *Zea mays*. J. Appl. Nat. Sci. 9, 1994-2003.
- Shimizu, Y., Matayoshi, Y., Tomori, K., Yamaguchi, A., Uesato, T., 2018. Damage to sugarcane by borers *Sesamia inferens* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Tetramoera schistaceana* (Lepidoptera: Tortricidae) and control with insecticides on Miyako Island, Japan. Jpn. J. Appl. Entomol. Zool. 62, 55-65.
- Simon, C., Frati, F., Beckenbach, A., Crespi, B., Liu, H., Flook, P., 1994. Evolution, weighting, and phylogenetic utility of mitochondrial gene sequences and a compilation of conserved polymerase chain reaction primers. Ann. Entomol. Soc. Am. 87, 651-701.
- Singh, B., Kular, J.S., 2015. Influence of abiotic factors on population dynamics of pink stem borer *Sesamia inferens* Walker in rice-wheat cropping system of India. J. Wheat Res. 7, 23-28.
- Sun, J.-Z., Zhang, J.-X., Shen, X.-S., 1993. The flight capabilities of rice stem borer moths *Tryporyza incertulas*, *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens*. Acta Entomol. Sin. 36, 315-322.
- Sun, M., Tang, X.-T., Lu, M.-X., Yan, W.-F., Du, Y.-Z., 2014. Cold tolerance characteristics and overwintering strategy of *Sesamia inferens* (Lepidoptera: Noctuidae). Fla. Entomol. 97, 1544-1553.
- Tamura, K., Stecher, G., Kumar, S., 2021. MEGA11: molecular evolutionary genetics analysis version 11. Mol. Biol. Evol. 38, 3022-3027.
- Tumlinson, J.H., Mitchell, E.R., Yu, H.-S., 1990. Analysis and field evaluation of volatile blend emitted by calling virgin females of beet armyworm moth, *Spodoptera exigua* (Hübner). J. Chem. Ecol. 16, 3411-3423.
- Yang, L., Wang, S., Wang, R., Zheng, Q., Ma, Q., Huang, S., Chen, J., Zhang, Z., 2021. Floating chitosan-alginate microspheres loaded with chlorantraniliprole effectively control *Chilo suppressalis* (Walker) and *Sesamia inferens* (Walker) in rice fields. Sci.

Total Environ. 783, 147088.

Zhang, Y.-C., Feng, H.-Q., Huang, J.-R., 2019. A new northern distribution record of the purple stem borer, *Sesamia inferens* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae) in China. Entomol. News

128, 460-462.

Zhu, P., Kong, F., Yu, Y., 1987. Sex pheromone of Oriental armyworm *Mythimna separata* Walker. J. Chem. Ecol. 13, 977-981.