

미국선녀벌레 천적인 선녀벌레집게벌 대량사육 체계

서미자, 김정환, 노현정, 서보윤, 조점래, 박흥현*

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과

Mass rearing system for *Neodryinus typhlocybae* (Hymenoptera: Dryinidae) as a biological control agent of *Metcalfa pruinosa*

Meeja Seo, Jeong Hwan Kim, Hyeon Jung Noh, BoYoon Seo, Jum Rae Cho and Hong Hyun Park*

Crop Protection Division, Dept. of Agro-food Safety and Crop Protection, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

***Corresponding author**

Hong Hyun Park
Tel. 063-238-3285
E-mail. honghyunpark@korea.kr

Received: 31 October 2022

First Revised: 15 November 2022

Second Revised: 16 November 2022

Revision accepted: 17 November 2022

Abstract: The mass-rearing system for *Neodryinus typhlocybae* as a biological control agent of *Metcalfa pruinosa* was established. Depending on the density of host nymphs and plants, the average number of cocoons produced by the parasitoids was 5–8 and 70–150 cocoons per leaf and sapling of mulberry, respectively. There is a significant difference in cocoon length between females (6.10–6.46 mm) and males (4.20–4.62 mm). Sex determination of cocoons before emergence will be helpful for efficiently releasing this parasitoid in fields. The parasitic rate of *N. typhlocybae* at the semi-field condition was on average 13–17%. The release number of this parasitoid did not affect parasitism. Nevertheless, the population growth rate of *M. pruinosa* was reduced by increasing the release number of *N. typhlocybae*. The parasitoid offspring's sex and bivoltine were influenced by the host age. On young host nymphs, the bivoltine portion of parasitoid increased. When parasitized on 4th or 5th nymphs, the offspring's female ratio of *N. typhlocybae* increased. This result may be useful for potentially controlling mass rearing production of parasitoid.

Keywords: mass rearing, biological control, introduction of natural enemy

서 론

미국선녀벌레는 노린재목 선녀벌레과에 속하는 해충으로 북미 지역인 신북구 지역이 원산이다(Dean and Bailey 1961). 미국에서는 50개과 102종, 유럽에서는 78과 330종 이상의 광범위한 기주범위를 보이는 것으로 알려져 있다(Bagnoli and Lucchi 2000; Wilson and Lucchi 2001; Alma et

al. 2005). 한국에서는 2009년 김해 단감 농가에서의 최초 발생 및 피해가 보고된 이후로 발생 면적이 매년 증가하면서 2011년 이후 전국적으로 급격히 확산되었다. 하지만 미국선녀벌레 월동난의 생태 및 발육특성에 관한 정보 부족으로 해충의 정착 및 분포 가능 지역 예측 및 약충 출현 시기 추정이 어려워 방제 전략 수립에 어려움을 겪었다(Lee et al. 2016). 국내에 침입한 대부분의 외래 해충들이 그렇

듯이 미국선녀벌레 또한 생태나 방제에 관한 정보가 부족했기 때문에 침입 후 국내 환경에 적응하고 나서 2, 3년 후에 개체군이 폭발적으로 증가하여 산림뿐만 아니라 농작물까지 극심한 피해가 나타나기 시작했던 것으로 판단된다. 이 시점까지 국내에는 미국선녀벌레를 제어할 수 있는 등록된 농약이나 천적류가 없던 상황이었으며, 산림지에서 농경지로 지속적으로 유입됨에 따라 미국선녀벌레를 제어할 수 있는 천적 도입의 필요성이 제기되었다. 물론 천적을 도입하는 과정에서 방제 대상 해충을 분명하게 선정하고 평가하여 어떤 천적 종을 도입할 것인지 결정함과 동시에 국내 도입 시 생태계에 미칠 영향을 분석하여 신중하게 판단해야 할 어려움이 있다. 사실상 외국으로부터 천적을 도입해서 침입해충을 방제하는 사례들이 많고 성공률도 높은 것으로 알려져 있다(van Driesche and Bellows 1996). 우리나라에서도 사과면충(*Eriosoma lanigerum*)을 방제하기 위해 1934년에 일본에서 도입하여 정착시킨 사례가 있고, 1975년에 제주도에서 감귤 해충인 루비깍지벌레(*Ceroplastes rubens*) 방제를 위해 루비붉은깡충좀벌(*Anicetus beneficus*)을 일본에서 도입하여 방제에 성공한 사례가 있다(Kim *et al.* 1979). 2011년에는 농촌진흥청 국립농업과학원이 외래해충인 꽃매미를 방제하기 위해 중국 산림과학연구원으로부터 꽃매미벼룩좀벌을 도입하여 꽃매미 생물적 방제용 천적으로서의 활용 가능성을 검토하고 산누에나방 미성숙알을 이용한 실내에서의 대량사육 가능성을 보고하기도 하였다(Seo *et al.* 2018).

이탈리아나 프랑스 등 유럽지역에서는 미국선녀벌레에 의해 포도의 품질이 저하될 뿐만 아니라 작물의 활력을 떨어뜨려 시들게 하며, 콩 수확량의 30~40%가 감소하는 심각한 피해가 보고되기도 했다(Ciampolini *et al.* 1987; Strauss 2010). 이러한 상황에서 토착천적으로도 방제가 불가능해서 1987년에 미국 북동부 지역으로부터 선녀벌레집게벌 고치를 도입하여 이탈리아 11개 지역 약 600여 곳에 지속적으로 방사하였다. 이후 선녀벌레집게벌 정착에 의해 해충개체군 밀도를 성공적으로 조절되는 것으로 확인되었다(Frilli *et al.* 2001; Girolami and Mazzon 2001). 우리나라는 2017년부터 미국선녀벌레 방제를 위해 이탈리아와 국제농업기술협력사업을 추진하여 선녀벌레집게벌을 도입하였다. 본 연구에서는 도입된 미국선녀벌레 약충의 포식 및 기생성 천적인 선녀벌레집게벌의 대량사육 가능성을 검토하고 생산 체계를 정리하고자 하였다. 증식시설에 기주식물의 식재부터 준비하여 증식을 통해 확보가능한 선

녀벌레집게벌 고치 생산량을 파악하고, 증식을 위한 선녀벌레집게벌 방사비율 및 고치상태에서 미리 암수를 확인 할 수 있는 기준을 제시하고자 하였다. 추가적으로 기주인 미국선녀벌레 영기가 선녀벌레집게벌 성비 및 이화성에 미치는 영향을 조사함으로써 접종기주의 영기 조절을 통한 실내대량사육 조절 가능성도 검토하였다. 확립된 선녀벌레집게벌 실내사육 체계를 통해 미국선녀벌레 발생 및 피해지에 지속적인 방사가 가능하도록 개체를 확보하고 방사를 통해 천적이 적응하도록 함으로써 미국선녀벌레 발생밀도를 줄여 농작물 피해를 최소화하고자 한다.

재료 및 방법

1. 시험곤충

선녀벌레집게벌은 2017년부터 농촌진흥청과 파도바대학 간 국제기술협력사업을 통해 미국선녀벌레의 생물적 방제용 천적으로 이탈리아에서 도입하였으며, 국립농업과학원 작물보호과(전북 완주군 이서면) 야외 대형 망실하우스(16m×8m)에 방사하여 연중 고치 수확을 통해 누대사육 중이다. 망실하우스에는 미국선녀벌레 기주식물로 2~3년생 뽕나무 묘목을 1m 간격으로 식재하였다. 6월부터 선녀벌레고치벌 대량사육을 위해 미국선녀벌레 약충을 야외에서 대량으로 채집하여 뽕나무가 식재된 망실에 접종하고 선녀벌레집게벌 암컷과 수컷을 방사하여 기생된 선녀벌레고치를 수확하여 실험에 이용하였다.

2. 선녀벌레집게벌 대량사육 체계

선녀벌레집게벌 대량사육 체계는 다섯 단계로 나누어 정리하였다. 첫 번째 단계는 사육시설 및 기주식물 준비단계로 선녀벌레집게벌 실내대량사육을 위해 4월부터 농과원 내 대형 망실하우스(16.0m×8.0m) 한 곳과 유리온실(7.8m×4.7m×3.5m) 두 곳에 2, 3년생 뽕나무 묘목, 칠엽수, 두릅나무를 식재하였다. 사육시설 및 기주식물 준비를 마친 후 두 번째 단계로 미국선녀벌레 약충을 야외에서 채집하여 사육시설 내 기주식물에 접종하고 정착하도록 하였다. 정착이 확인되면 세 번째 단계로 선녀벌레집게벌 암수를 1:2 비율로 시설 내 접종하였다. 네 번째 단계는 접종 후 기생낭 및 고치 생성 여부를 확인하고 마지막 다섯 번째 단계로 선녀벌레집게벌 고치를 수거하여 이듬해 사용하기

위한 월동 보관 방법을 제시하고자 했다.

3. 선녀벌레집계별 대량사육 체계에 따른 고치 수확량 조사

4월에 대형 망실하우스(16.0 m×8.0 m) 1곳과 유리온실(7.8 m×4.7 m×3.5 m) 2곳에 2, 3년생 뽕나무 묘목을 1 m 간격으로 식재하였다. 6월 상순에 미국선녀벌레 약충을 야외에서 대량으로 채집하여 뽕나무가 식재된 망실하우스와 유리온실에 접종하였다. 접종 후 두 차례에 걸쳐 망실하우스에는 선녀벌레집계별 암컷 80마리와 수컷 350마리 총 430마리를, 유리온실에는 암컷 80마리와 수컷 250마리 총 330마리를 방사하였다. 두 개의 선녀벌레집계별 대량증식장소인 망실하우스와 유리온실은 각각 약 38.8평과 11.1평 규모로 차이가 있어 선녀벌레집계별 방사 마리수를 다르게 하였으나, 암컷은 동일하게 80마리를 방사하였다. 방사 60일 후 뽕나무 앞에 형성된 선녀벌레 집계별 외부기생낭 및 고치 생성 여부를 조사하여 증식장소, 식재된 기주식물의 밀도 및 방사 마리수에 따른 고치별 고치 수확량을 비교하였다.

4. 선녀벌레집계별 고치상태에서의 암수 구분

선녀벌레집계별 대량증식시설인 온실에서 뽕나무 잎 뒷면에 만들어진 고치를 낙엽이 되기 전 잎을 수거하여 선녀벌레집계별 고치를 확보하였다. 확보된 고치는 환기가 잘 되는 곳에서 말려준 다음 용기에 담아 월동에 들어 가는데, 월동 전에 선녀벌레집계별 고치의 길이와 폭을 Dinocapture 2.0 (Dunwell Tech. Inc., USA)을 이용하여 측정하였다. 고치 우화 후 성별을 조사하여 성별에 따른 고치 크기를 비교하였다. 선녀벌레집계별의 경우 고치당 크기가 암컷이 수컷보다 큰 것으로 알려져 있어, 우화 전에 암수를 구분할 수 있었다(Mazzon *et al.* 2001). 또한 야외에서 채집한 선녀벌레집계별 고치의 폭과 길이도 측정하여 증식시설과 야외에서의 고치당 크기의 차이도 확인하였다. 실내 증식시설에서 확보한 고치 총 876개(암컷 136개체, 수컷 740개체), 안동 지역 야외에서 채집한 고치 총 1,034개(암컷 416개, 수컷 618개)를 고치 크기 측정에 이용하였다.

5. 선녀벌레집계별 방사 마리수에 따른 기생효과 조사

6월 초 야외에 설치한 대형망사케이지(1.8 m×1.8 m×2.0 m)에 음나무 묘목(묘목크기 약 1 m) 포트 한 개를 넣고

미국선녀벌레 월동 후 부화 약충을 채집하여 케이지당 300 마리씩 접종하였다. 미국선녀벌레 접종 7일 후 선녀벌레집계별 성충을 암수 비율 각각 1:2, 2:4, 4:8로 방사하였다. 방사 50일 후 망사케이지 내에 미국선녀벌레 약충 및 성충의 밀도를 조사하여 개체군증가율을 구한 후 선녀벌레집계별 방사밀도에 따른 방사효과를 확인하고자 하였다. 개체군증가율은 천적 방사 전 미국선녀벌레 밀도와 천적인 선녀벌레집계별 방사 마리수별로 방사한 케이지당 방사 50일 후 살아있는 미국선녀벌레 마리수를 조사하여 Chau *et al.* (2005)과 Hosseini *et al.* (2010)이 사용한 공식을 이용하여 산정하였다. 또한 기생낭이 보이는 약충과 고치를 모두 포함한 기생률을 산정하고 선녀벌레집계별 고치 수확량을 조사하여 비교하였다. 모든 실험은 방사 마리수별로 각각 3반복 수행되었다.

6. 기주인 미국선녀벌레 약충 영기에 따른 선녀벌레집계별의 성비 및 이화성 비율

대형망사케이지에 케이지당 500마리 정도의 미국선녀벌레 약충을 2, 3령기, 4, 5령기로 구분하여 각각 접종하고, 접종 2일 후 선녀벌레집계별 암컷 3마리, 수컷 6마리를 방사하고 30일 후 고치를 망사케이지당 형성된 선녀벌레집계별 고치를 수거하였다. 본 실험은 영기별로 5반복 수행하였으며, 고치 수거 후 길이 측정을 통해 6 mm 이상의 개체들을 암컷으로 구분하였다. 고치로부터 우화한 선녀벌레집계별은 암수 구분과 함께 마리수를 조사하여 이화성 비율을 산정하였다. 미국선녀벌레 접종 영기에 따른 선녀벌레집계별 기생 후 우화한 자손세대 성충의 성비 및 이화성 차이를 확인하고자 하였다.

7. 통계분석

증식시설 내에서 수확한 선녀벌레집계별 고치와 안동지역에서 수거한 고치의 길이와 폭을 측정하고 우화 후 암수를 확인한 후 성별 및 고치수확지역에 따른 고치 길이 및 폭 간의 차이를 독립표본 *t*-검정을 통해 평균값을 분석하여 5% 유의수준에서 비교하였다. 선녀벌레집계별 방사 마리수에 따른 미국선녀벌레 기생률 및 해충개체군 증가율은 평균값을 일원배치 분산분석 후 사후검정방법으로 Tukey HSD (Honest significant difference) test를 통해 5% 유의수준에서 비교되었다. 모든 통계분석은 IBM SPSS statistics 25를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 선녀벌레집계별 대량사육 체계

1) 사육시설 및 기주작물 준비

3~4월 중 하우스형 망실이나 측창과 천창이 있는 유리 온실을 준비한다. 망실 또는 유리온실 모두 방충망을 설치하여 외부로부터의 해충 유입을 철저히 차단해야 한다. 미국선녀벌레 기주식물로 주로 사용하는 뽕나무의 경우, 잎이 무성하게 자라기 때문에 미국선녀벌레 사육기주로서 우수하나 뽕나무명나방이 외부로부터 유입될 경우, 잎을 가해하기 때문에 미국선녀벌레가 식이할 잎이 없을 뿐만 아니라 추후 선녀벌레집계별을 방사하여 사육해야 하기 때문에 약제 방제도 불가능하다. 미국선녀벌레가 망실이나 온실에서 이탈하는 것을 막기 위해서라도 철저한 차단이 필요하다. 사육시설 및 기주식물은 미국선녀벌레 접종이 시작되는 5월 중순까지 준비되도록 한다(Fig. 1). 미국선녀벌레 약충과 성충의 발생밀도 조사를 통해 선호 기주를 조사한 Seo *et al.* (2019)의 연구 결과에 의하면, 약충은 삼과(Cannabaceae)의 환삼덩굴, 국화과(Compositae)의 해바라기, 때죽나무과(Styracaceae)의 때죽나무, 두릅나

무과(Araliaceae)의 두릅나무 등이 확인되었고, 성충은 두릅나무과의 독활, 두릅나무, 음나무, 콩과(Leguminosae)의 아까시나무, 아욱과(Malvaceae)의 무궁화, 뽕나무과(Moraceae)의 꾸지뽕나무, 때죽나무과의 때죽나무, 느릅나무과(Ulmaceae)의 느릅나무 등이 확인되었다. 선녀벌레집계별의 대량생산을 위해서는 기주인 미국선녀벌레의 증식에 적합한 기주식물의 선발이 중요한데, 약충의 흡즙과 성충의 산란 및 고치 수거에 가장 적합한 기주를 재식하는 방법이 추후 이루어져야 할 것으로 보인다. 본 연구에서는 약충과 성충 모두에 적합한 뽕나무를 이용하였고, 두릅나무를 뽕나무 사이에 식재하여 최근 대량사육 연구를 진행 중에 있다.

2) 미국선녀벌레 약충 야외채집 및 사육시설 내 방사

미국선녀벌레는 알 상태로 뽕나무, 아까시나무, 칠엽수 등의 나무껍질 틈새에서 월동한다. 월동한 알은 이듬해 5월 중하순부터 부화하기 시작하며, 이전에 발생이 많았던 지역의 나무 밑 식물들을 살펴 부화한 1, 2령 약충의 채집이 가능하다. 야외에서 미국선녀벌레를 채집할 경우, 3령기 이후 약충은 예민하여 살짝만 건드려도 튀는 경향을 보이기 때문에 채집이 용이하지 않다. 잎에 약충이 붙어있는 채

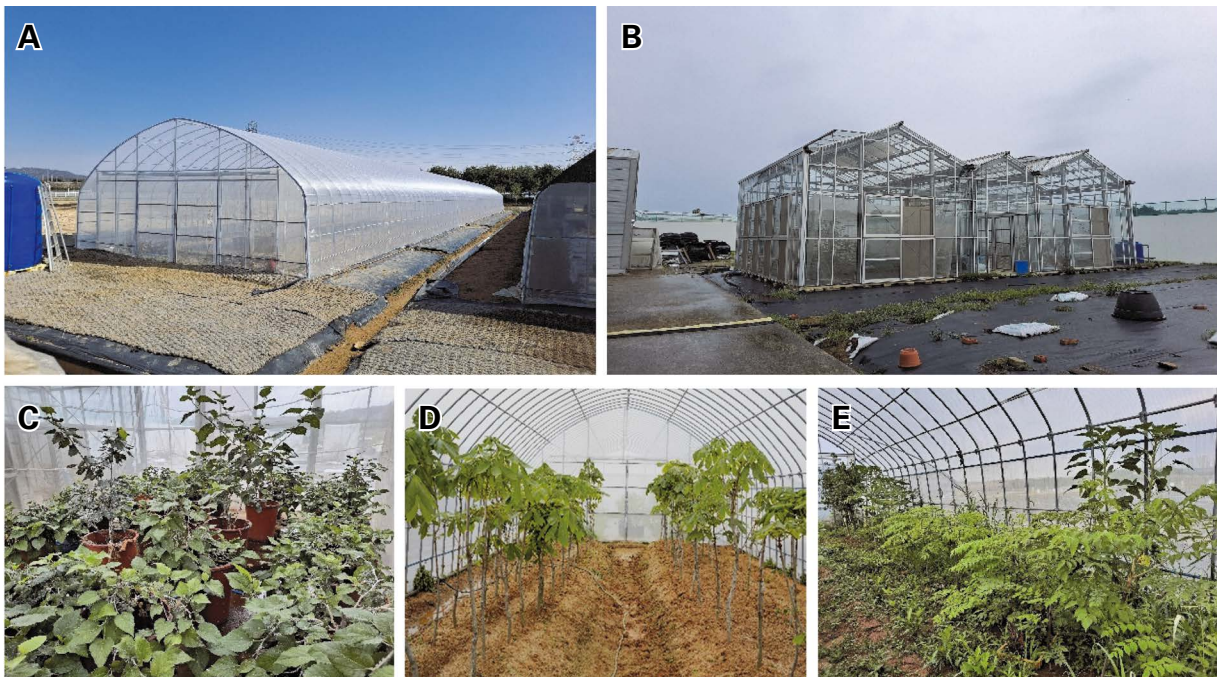


Fig. 1. Photos showing the preparation of facilities and planting of host plants for mass rearing of *Neodryinus typhlocybae*. (A) Net house, (B) glasshouse, (C) *Morus alba* (Mulberry), (D) *Aesculus hippocastanum* (Horse chestnut), and (E) *Aralia elata* (Japanese angelica tree).



Fig. 2. Photos showing the field collection and inoculation of *Metcalfa pruinosa* nymphs into mass rearing facilities. *M. pruinosa* nymphs on (A) horse chestnut and (B) Japanese angelica. (C) *M. pruinosa* inoculated in the rearing facility.

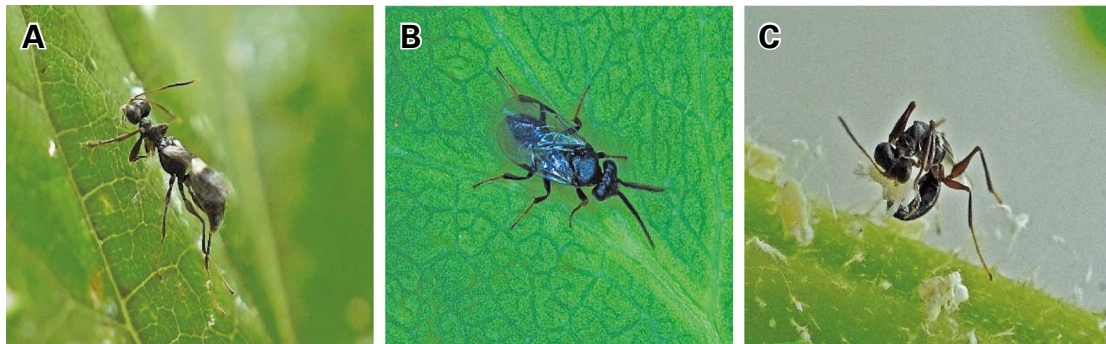


Fig. 3. Photos showing a (A) female and (B) male *Neodryinus typhlocybae* released, and (C) a nymph of *Metcalfa pruinosa* feeding on female *N. typhlocybae*.

로 채집한 미국선녀벌레 약충은 망사케이지에 넣어 기주 식물의 잎과 약충이 압력을 받지 않도록 운반한다. 채집한 미국선녀벌레 약충을 망실이나 온실에 식재된 기주식물에 옮겨가 정착하도록 한다. 미국선녀벌레는 햇빛이 강한 밝은 곳보다는 직사광선이 들어오지 않는 그늘진 하엽을 선호하는 경향을 보인다(Fig. 2).

3) 선녀벌레집계별 접종

선녀벌레집계별 암컷은 단위생식이 가능하며 교미하지 않은 암컷은 수컷만을 생산한다(Alma *et al.* 2005). 암컷은 산란 이외에도 어린 미국선녀벌레 약충을 포식하여 산란을 위한 영양을 섭취한다. 선녀벌레집계별은 5월 말부터 월동 고치가 우화하는데, 암컷과 수컷 비율이 약 1:3으로 암컷의 비율이 낮은 경향을 보인다. 이러한 원인은 선녀벌레집계별이 단위생식하고, 미국선녀벌레 약충 3령기 이하 어린 약충에 산란할 경우 수컷의 비율이 높은 반면, 4~5령기 약충에 산란하였을 때 암컷 비율이 높기 때문인 것으로

판단된다. 미국선녀벌레는 선녀벌레집계별보다 약 10~15일 정도 먼저 부화하기 때문에 천적의 방제효과를 높이기 위해서는 선녀벌레집계별 우화 시기를 조절해야 한다. 선녀벌레집계별의 우화 시기를 미국선녀벌레 4~5령기 약충 시기에 맞추기 위해서는 선녀벌레집계별의 우화 시기를 6월 20일 이후로 늦춰서 방사해야 한다. 2022년 올해 미국선녀벌레 부화는 충남 금산이 5월 23일, 충북 충주는 5월 22일, 경북 안동은 5월 19일로 지역 간 부화 시기의 차이가 크지 않았던 점을 고려하면, 지역에 따른 미국선녀벌레의 부화 후 약충의 발육단계에 따른 천적의 방사 시점을 고려하는 것이 중요하지만 그에 앞서 천적인 선녀벌레집계별의 우화 시기를 조절하는 문제가 방제 성공의 관건으로 판단된다. 야외에 보관한 선녀벌레집계별 월동 고치를 5월부터 6월 상순까지 야외 온도가 20°C 이상이 되면 20°C 향으로 옮겨 보관하고 낮아지면 다시 야외로 옮겨 보관하는 방법으로 우화를 지연시키도록 한다. 선녀벌레집계별 우화 후에는 꿀물을 제공하면 암컷은 1개월까지 생존가능하였

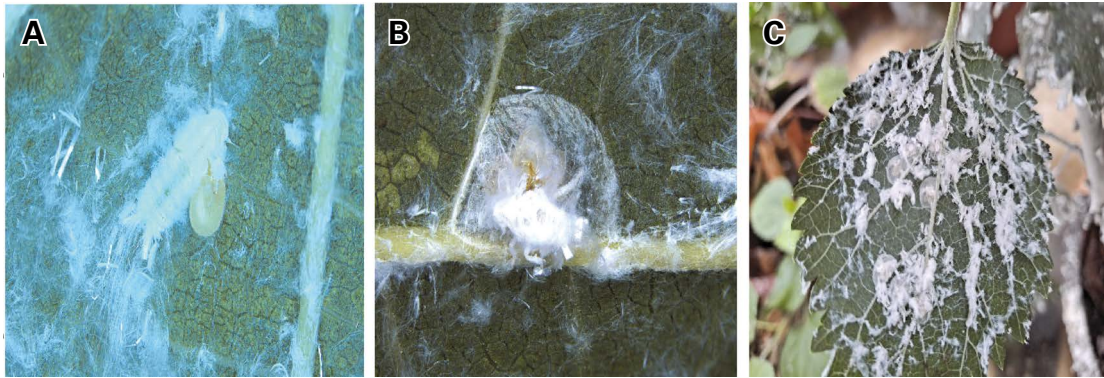


Fig. 4. Photos showing (A) *M. pruinosa* nymph with thylacium (abdominal sac) parasitized by *N. typhlocybae*, (B) silky cocoon, and (C) cocoons fixed on the underside of the leaf.



Fig. 5. Photos showing harvesting and overwintering processes of *Neodryinus typhlocybae* cocoons. (A) Removing leaves with cocoons, (B) cocoons are cut out of the leaves and placed in a ventilated plastic box. (C) The plastic container was kept in shadow outdoors for overwintering.

다. 반면 수컷의 수명은 1주일 이내였으며, 이를 토대로 고치 생산을 위해 미국선녀벌레 약충이 있는 시설 내 선녀벌레집게벌 방사 시 암수 접종 비율은 1:2로 정하였다. 방사한 선녀벌레집게벌 성충은 우화 후 2일 이내의 개체를 사용하였다(Fig. 3).

4) 선녀벌레집게벌 접종 후 기생낭 및 고치 확인

선녀벌레집게벌이 미국선녀벌레에 기생하면 약 10~15일 경에는 기생낭(집게벌 유충)이 생기고 약 15~20일경에는 고치가 형성되는데 외기 온도에 따라 약간의 차이는 있다. 선녀벌레집게벌은 일년에 한 번 우화하는 일화성과 두 번 우화하는 이화성이 있으며, 이화성은 7월 하순부터 우화하여 발육이 부진하여 성충이 미처 되지 못한 약충에 기생한다. 주로 미국선녀벌레 3령 이하의 약충에 기생하면 수컷이 비율이 높고, 이화성 개체 비율이 증가하는 경향을

보인다(Fig. 4).

5) 선녀벌레집게벌 고치 수확 및 월동 보관

선녀벌레집게벌 고치 수확은 9~10월에 낙엽이 되기 전 수확하는 것이 좋다. 집게벌 고치가 있는 잎을 따서 실내에서 고치 있는 잎 부분만 잘라내어 별도의 용기에 보관한다. 고치에 구멍이 뚫린 것은 이미 우화한 이화성 개체이다. 수확한 고치상태로도 암수 구분이 가능한데, 일반적으로 고치 길이가 6mm 이상인 개체는 암컷일 가능성이 높다. 환기구가 있는 플라스틱 용기에 바닥에 키친타월을 깔아 물방울이 생기는 것을 막도록 한 상태에서 고치가 붙어있는 잎 조각을 넣어 고치를 보관한다. 고치는 바람이 잘 통하고 햇빛이 들지 않는 그늘진 곳에서 겨울을 나도록 보관한다(Fig. 5).

Table 1. Cocoon production by different indoor mass rearing systems of *Neodryinus typhlocybae*

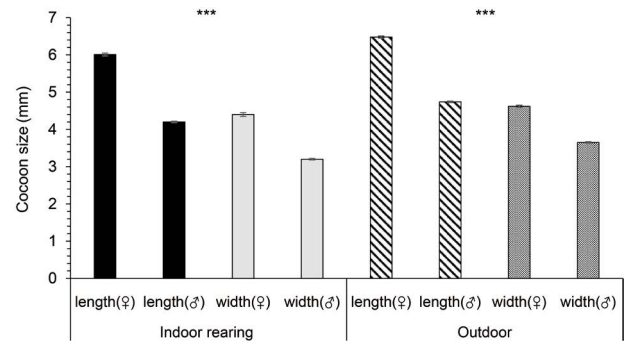
Mass rearing facilities (Total No. of sampling)	Total No. of <i>N. typhlocybae</i> released		No. of cocoons (mean \pm SE) (max.)		Total No. of cocoons per house
	Female	Male	per leaf	per sapling	
Net house A (16)	80	350	6.1 \pm 0.35 (31)	101.7 \pm 32.63 (280)	1,627
Net house B (26)	80	350	6.3 \pm 0.22 (25)	113.4 \pm 19.19 (333)	2,949
Glass house A (23)	80	250	7.6 \pm 0.33 (60)	148.4 \pm 19.49 (319)	3,811
Glass house B (16)	80	250	4.9 \pm 0.44 (53)	68.4 \pm 19.78 (249)	1,147

2. 선녀벌레집게벌 사육 체계에 따른 시설 내 고치 수확량

선녀벌레집게벌 방사 60일 후 선녀벌레집게벌 대량증식 시설 4곳의 시설당 뽕나무 잎에 형성된 선녀벌레집게벌 고치는 잎당 평균 4.9~7.6개, 주당 평균 68.4~148.4개가 수거되었다. 시설당 선녀벌레집게벌 고치 총 생산량은 최대 3,811개였다(Table 1). 선녀벌레집게벌 고치 생산량은 대량증식장소에 따른 차이보다는 증식시설 내 식재되어 있는 기주식물의 밀도에 따른 차이가 큰 것으로 보인다. 동일한 망실에서 동일한 마리수의 선녀벌레집게벌을 방사했음에도 뽕나무 묘목수가 많은 시설에서 상대적으로 고치 수확량이 높게 나타났다. 선녀벌레집게벌 방사 마리수에 따른 고치별 고치 수확량도 암컷 80마리에 수컷 250마리와 350마리를 각각 방사했을 때 오히려 수컷 방사 마리수가 적은 유리온실에서 천 개 이상의 고치가 많이 생산되는 것이 확인되었다(Table 1).

3. 선녀벌레집게벌 고치상태에서의 암수 구분

선녀벌레집게벌 고치의 크기는 실내증식이나 야외에서 수확한 고치 모두 암수 간 통계적으로 현저한 차이를 보였다(indoor rearing: length $F=8.625$, $t=36.644$, $p<0.0001$; width $F=0.223$, $t=20.456$, $p<0.0001$; outdoor: length $F=2.464$, $t=46.150$, $p<0.0001$; width $F=7.293$, $t=23.738$, $p<0.0001$) (Fig. 6). 실내증식개체보다는 야외개체가 고치 길이나 폭 모두 현저히 컸으며, 암컷의 평균 고치 길이는 6.01~6.48 mm, 수컷은 4.20~4.62 mm로 확인되었다. 따라서 우화하기 전 고치상태로도 암수의 구분이 가능할 것으로 판단되었다. 성충의 총체 크기와 특징에 의해서도 암수 구분이 가능하다. 선녀벌레집게벌 암컷 성충은 몸길이가 4~5 mm이며, 몸은 전체적으로 흑색으로 앞다리 발마디에

**Fig. 6.** Comparison of female and male *Neodryinus typhlocybae* cocoons size.

집게 모양을 형성하고 있는 것이 특징이다. 암컷 성충은 미국선녀벌레 어린 약충을 앞다리 발마디의 집게로 붙잡아 포식하기도 한다. 수컷 성충은 몸길이가 2~3 mm로 암컷보다 작고 체색은 전적으로 흑색을 띠지만 포식행동은 보이지 않는다. 수컷 성충의 수명은 약 1주일로 암컷에 비해 매우 짧다(Olmi 1999; Strauss 2009). 선녀벌레집게벌은 유성생식뿐만 아니라 무성생식을 통해 수컷을 생산하는 생식 특성을 보이지만, 암컷이 미국선녀벌레 약충을 포식하거나 기생하기 때문에 반드시 암수를 함께 방사해야 미국선녀벌레를 효과적으로 방제할 수 있다(Guglielmino and Olmi 1997). 이러한 결과를 근거로 야외에서 선녀벌레집게벌 발생양상조사 시 고치 길이 6.0 mm 이상의 고치를 암컷으로 구분하여 미국선녀벌레 발생지에 선녀벌레집게벌을 암수 비율을 고려하여 방사하는 데 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 대부분의 천적 방사에 있어 성충으로 방사하는 것보다는 고치로 방사하는 것이 운송과 방사에 있어 훨씬 효율적이기 때문에 이러한 점을 고려한다면 우화 전 고치상태에서 암수를 구분할 수 있는 것도 천적에 의한 방제효율을 높일 수 있는 좋은 방법이 될 수 있다.

4. 선녀벌레집게벌 방사 마리수에 따른 기생효과 조사

대형망사케이지의 음나무 묘목당 미국선녀벌레 접종 후 기생천적인 선녀벌레집게벌 성충의 방사 마리수에 따른 미국선녀벌레 기생률을 조사한 결과, 기생양이 확인되는 약충과 고치를 모두 포함한 기생률은 방사 마리수와 상관 없이 방사한 케이지에서는 평균 13.0~17.0%의 기생률을 나타내며 통계적으로 유의한 차이를 확인할 수 없었다 ($F_{3,8} = 1.015, p = 0.435$). 하지만, 방사 50일 후 케이지 내에 존재하고 있는 미국선녀벌레 밀도를 조사하여 개체군증가율로 비교했을 때 방사 마리수가 많을수록 해충인 미국선녀벌레 개체군밀도증가율은 낮아지는 경향을 보였다. 가장 많은 수인 12마리(암: 수=4:8)를 방사한 망사케이지 내의 개체군증가율이 통계적으로 유의성 있는 차이를 보이며 현저히 낮은 것으로 확인되어 확실히 선녀벌레집게벌에 의해 밀도가 감소한 것을 확인할 수 있었다($F_{3,8} = 4.654, p = 0.036$). 하지만 6마리(암: 수=2:4)나 3마리(암: 수=1:2)를 방사한 후 해충의 밀도는 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다(Table 2). Queiroz *et al.* (2017)은 열대거세미나방 알수가 많을수록 알기생봉인 *Telenomus remus*의 기생률이 높아진다고 보고하고 있고, 기주 밀도와 기생률과의 관계는 공간 크기에 따라 달라질 수 있다는 연구 결과도 있다(Doak 2000; Stireman and Singer 2002). 본 연구에서도 한 평 정도의 망케이지 내에 기주식물 묘목이 제한된 상태에서 기생률 조사가 이루어졌기 때문에 기주 밀도와와의 정확한 상관관계를 구명하는 것이 어려울 수 있다. 하지만 망케이지 내에서의 기생률 정도를 확인하였고

이를 근거로 야외에서의 미국선녀벌레의 발생면적과 밀도를 파악하여 선녀벌레집게벌의 방사량을 조절 가능할 것으로 기대한다.

5. 기주인 미국선녀벌레 약충 영기가 선녀벌레집게벌 성비 및 이화성에 미치는 영향

선녀벌레집게벌 초기 개체군은 이화성(bivoltine)으로 1세대를 더 경과하고, 후기 개체군은 일화성으로 월동한 다음 이듬해 우화하는 세대로 나타난다. 선녀벌레집게벌의 이화성은 지역별 개체군에 따른 차이를 보이며, 텍사스 개체군이 코네티컷 개체군보다 이화성 경향이 높다고 보고되어 있다(Mazzon *et al.* 2001). 이러한 이화성은 자연상태에서 매우 다양하게 나타나고 있지만, 이화성을 결정하는 정확한 요인은 아직까지 불분명하다. 본 연구에서는 선녀벌레집게벌은 기주인 미국선녀벌레가 2~3령 약충일 때 기생하면 이화성 개체의 비율이 증가했으며, 4~5령 약충에 기생 시 이화성 비율은 현저히 낮아졌으나 일화성 개체군 암컷 비율이 증가하는 경향을 보였다(Fig. 7). Mazzon *et al.* (2001)이 헝가리 세 지역(북위 46~47도 사이) 간 선녀벌레집게벌 방사 이후 우화한 자손세대의 성비를 조사한 결과에서도 조사지역 모두에서 수컷의 비율이 현저히 높았으며 이화성 비율도 지역 간 차이를 보였다. 하지만 전체적으로 생산되는 집게벌 생산량에 있어 기주의 영기에 따른 차이를 볼 수 없었다. 결과에 제시하지 않았지만 본 연구에서도 선녀벌레집게벌의 대량사육 체계를 구축하는 과정에서 기주의 영기와 상관 없이 수컷의 비율이 암컷에 비해 훨씬

Table 2. Parasitism (%) of *Neodryinus typhlocybae* in relation to the different number of released of *Metcalfa pruinosa*

<i>Neodryinus typhlocybae</i>		<i>Metcalfa pruinosa</i>	
Total release No. (female : male)	Total No. of host per net cage	Parasitic rate (%) ^a	Population growth rate (r) ^b
12 (4 : 8)	300	13.0 ± 4.1 ^a	-0.013 ± 0.01 ^b
6 (2 : 4)	300	13.3 ± 9.6 ^a	0.030 ± 0.02 ^{ab}
3 (1 : 2)	300	17.0 ± 10.4 ^a	0.040 ± 0.01 ^{ab}
0 (No release)	300	0.0 ± 0.0 ^a	0.043 ± 0.00 ^a
<i>F</i>		$F_{3,8} = 1.015$	$F_{3,8} = 4.654$
<i>p</i>		0.435	0.036

^aMeans with different letters within a column indicate significant ($p < 0.05$) among different release ratio (One-way ANOVA, post hoc tests by Tukey's HSD test in IBM SPSS statistics 22).

^bPopulation growth rate, $r = \ln(N_{x+1}/N_x)/t$

(N_x = the population size at time x , N_{x+1} = population size at time $x+1$, t = the difference in days between time $x+1$ and x)

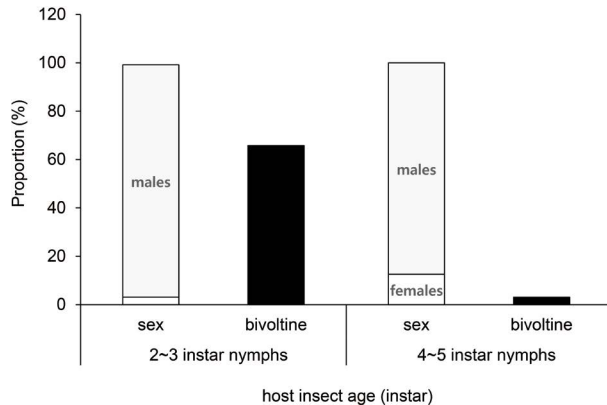


Fig. 7. Effect of host insect age on sex and bivoltine ratio of *Neodryinus typhlocybae* offspring population.

싨 높았는데, 전체 생산된 집계별 중 66~85%가 수컷이었다. 물론 야외개체군도 수컷 비율이 약 60% 정도로 확인되어 대량증식과정에서 수컷이 훨씬 많이 생산되는 것이 확인되었다. 선녀벌레집계별 암컷은 기주인 미국선녀벌레 1~2령 약충은 포식하고, 3령 이상의 약충에 기생하는 것으로 알려져 있기 때문에 (Mazzon *et al.* 2001; Strauss 2009), 사실상 암컷의 비율이 높은 것이 방제효과 측면에서는 효율적이다. 하지만, 기생성 벌목 곤충의 대량생산에 있어 수컷 개체의 과생산은 일반적인 현상으로 알려져 있다 (Ode and Heinz 2002). 본 연구 결과에서도 언급했듯이 기주의 연령, 밀도, 환경조건은 후대의 성비에 영향을 줄 수 있는 중요한 요소이며 (Ueno 1998; King 2002; Ode and Heinz 2002), 천적의 대량증식체계에서 암컷 개체의 생산을 조절할 수 있는 사육조건에 대한 정확한 정보를 확보하는 것이 성공적인 방제를 위한 필수조건이다. 우리의 연구에서도 대량증식시설에서의 성비와 야외에서 고치를 채집한 후 조사한 성비 차이는 이들의 주변 식생의 차이뿐만 아니라 기주곤충인 미국선녀벌레 발육태의 다양성, 밀도 및 환경조건에서의 차이에 기인한 것으로 추론할 수 있다. 이러한 결과로 볼 때, 점종기주의 영기를 조절함으로써 암컷 성충 생산량을 늘릴 수 있다는 우리의 연구 결과는 대량사육 시스템 구축에 있어 중요한 자료가 될 것으로 보인다. 본 연구는 도입 천적인 선녀벌레집계별 대량사육 체계를 구축하기 위해 수행되었으며, 현재도 대량사육 효율을 높이기 위한 기주식물 선발 및 방사방법 등에 관한 연구를 진행 중이다. 추후 구축된 대량사육 체계를 통해 확보된 선녀벌레 집계별을 미국선녀벌레 발생지에 방사하여 정착 및 방제 효과를 검토할 계획이다.

적 요

미국선녀벌레 생물적 방제를 위한 기생성 천적인 선녀벌레집계별 대량사육 체계를 구축하였다. 선녀벌레집계별 고치 생산은 기주인 미국선녀벌레 약충밀도와 기주식물의 재식밀도에 따른 차이를 보였지만, 뽕나무 기주식물 잎당 평균 5~8개, 주당 평균 70~150개가 생산되었다. 선녀벌레집계별 암컷 평균 고치 길이는 6.01~6.46 mm, 수컷은 4.20~4.62 mm로 암수 간 통계적으로 유의미한 차이를 보였으며, 우화 전 고치상태에서의 암수 구분으로 선녀벌레 집계별을 효과적으로 방사할 수 있을 것으로 보인다. 반야외조건에서 선녀벌레집계별 기생률은 평균 13~17%로, 방사 마리수에 따른 기생률 차이는 확인되지 않았으나 방사 마리수가 많을수록 미국선녀벌레 개체군밀도증가율이 낮아지는 경향을 보였다. 선녀벌레집계별의 성비나 이화성은 기주의 영기에 따라 달라졌다. 기주의 영기가 낮을수록 이화성 비율이 증가했고, 4~5령 약충에 기생시 암컷의 비율이 높게 나타나 대량사육 시 개체조절이 가능할 것으로 판단된다.

CRedit authorship contribution statement

Meeja Seo: Conceptualization, Methodology, Writing original draft preparation, Project administration. Jeong Hwan Kim: Methodology, Writing review. Hyeon Jung Noh: Methodology. Bo Yoon Seo: Conceptualization, Methodology. Jum Rae Cho: Conceptualization. Hong Hyun Park: Conceptualization, Methodology, Project administration, Writing review.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 (침입해충 방제제의 방제효율 증대 기술 개발, 과제번호: PJ014845) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Alma A, C Ferracini and G Burgio. 2005. Development of a sequential plan to evaluate *Neodryinus typhlocybae* (Ashmead) (Hymenoptera: Dryinidae) population associated with *Metcalfa pruinosa* (Say) (Hemiptera: Flatidae) infestation in Northwestern Italy. *Environ. Entomol.* 34:819–824. <https://>

- doi.org/10.1603/0046-225X-34.4.819
- Begnoli B and A Lucchi. 2000. Dannosita e misure di controllo integrato. pp. 65–88. In: La *Metcalfa negli* ecosistemi italiani (Lucchi A, ed.). ARSIA Regione Toscana. Florence, Italy.
- Chau A, KM Henz and FT Davies. 2005. Influences of fertilization on population abundance, distribution, and control of *Frankliniella occidentalis* on chrysanthemum. Entomol. Exp. Appl. 117:27–39. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2005.00326.x>
- Ciampolini M, A Grossi and G Zottarelli. 1987. Damage to soybean through attack by *Metcalfa pruinosa*. Inf. Agrar. 43:101–103.
- Dean HH and JC Bailey. 1961. A flatid planthopper, *Metcalfa pruinosa*. J. Econ. Entomol. 54:1104–1106.
- Doak P. 2000. The effects of plant dispersion and prey density on parasitism rates in a naturally patchy habitat. Oecologia 122:556–567.
- Frilli F, A Villani and P Zandigiaco. 2001. *Neodryinus typhlocybae* (Ashmead) antagonista di *Metcalfa pruinosa* (Say), Risultati di liberazioni pluriennali effettuate in Friuli-Venezia Giulia. Entomologica 35:27–38. <https://doi.org/10.15162/0425-1016/728>
- Girolami V and L Mazzon. 2001. Esperienze di lotta biologica e integrate a *Metcalfa pruinosa* con *Neodryinus typhlocybae*. Atti dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia 49:165–184.
- Guglielmino A and M Olmi. 1997. A host-parasite catalog of world Drynidae (Hymenoptera: Chrysidoidea). Contrib. Entomol. Int. 2:165–298. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1139.1.4>
- Hosseini M, A Ashouri, A Enkegaard, SH Goldansaz, M Nasiri Nahalati and V Hosseinaveh. 2010. Performance and population growth rate of the cotton aphid and associated yield losses of cucumber under different nitrogen fertilization regimes. Int. J. Pest Manag. 56:127–137. <https://doi.org/10.1080/09670870903248827>
- Kim HS, DY Moon, JS Park, SC Lee, PC Lippold and YD Chang. 1979. Studies on integrated control of citrus pests (2) control of ruby scales (*Ceroplastes rubens*) on citrus by introduction of a parasitic natural enemy, *Anicetus deneficus* (Hymenoptera, Encyrtidae). Korean J. Plant Prot. 18:107–110.
- King BH. 2002. Offspring sex ratio and number in response to proportion of host sizes and ages in the parasitoid wasp, *Spalangia cameroni* (Hymenoptera: Pteromalidae). Environ. Entomol. 31:505–508. <https://doi.org/10.1603/0046-225x-31.3.505>
- Lee WH, CG Park, BY Seo and SG Lee. 2016. Development of an emergence model for overwintering eggs of *Metcalfa pruinosa* (Hemiptera: Flatidae). Korean J. Appl. Entomol. 55:35–43. <https://doi.org/10.5656/KSAE.2015.12.0.064>
- Mazzon L, A Lucchi, V Girolami and L Santini. 2001. Investigation on voltinism of *Neodryinus typhlocybae* (Ashmead) (Hymenoptera: Dryinidae) in natural context. Frustula Entomol. 37:9–19.
- Ode PJ and KM Heinz. 2002. Host-size dependent sex ratio theory and improving mass-reared parasitoid sex ratios. Biol. Control 24:31–41. [https://doi.org/10.1016/S1049-9644\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S1049-9644(02)00003-8)
- Olmi M. 1999. Hymenoptera: Dryinidae-Embolemyidae. Fauna d'Italia. Vol. 37. Edizioni Calderini. Bologna, Italy.
- Queiroz AP, ADF Bueno, AP Fernandes, OC Bortolotto, AY Mikami and L Olive. 2017. Influence of host preference, mating and release density on the parasitism of *Telenomus remus* (Nixon) (Hymenoptera: Platygasteridae). Rev. Bras. Entomol. 61:86–90. <https://doi.org/10.1016/j.ebe.2016.12.004>
- Seo HY, DK Park, IS Hwang and YS Choi. 2019. Host plants of *Metcalfa pruinosa* (Say) (Hemiptera: Flatidae) nymphs and adult. Korean J. Appl. Entomol. 58:363–380. <https://doi.org/10.5656/KSAE.2019.10.0.044>
- Seo M, JH Kim, BY Seo, C Park, BR Choi, KH Kim, CW Ji and JR Cho. 2018. Mass-rearing techniques of *Anastatus orientalis* (Hymenoptera: Eupelmidae), as the egg-parasitoid of *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoroidea): An using method of *Antheraea pernyi* (Lepidoptera: Saturniidae) and *L. delicatula* eggs in laboratory. Korean J. Appl. Entomol. 57:243–251. <https://doi.org/10.5656/KSAE.2018.08.0.035>
- Stireman JO and MS Singer. 2002. Spatial and temporal heterogeneity in the parasitoid assemblage of an exophytic polyphagous caterpillar. Ecol. Entomol. 27:588–600. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2311.2002.00450.x>
- Strauss G. 2009. Host range testing of the nearctic beneficial parasitoid, *Neodryinus typhlocybae*. Biocontrol 54:163–171. <https://doi.org/10.1007/s10526-008-9176-7>
- Strauss G. 2010. Pest risk analysis of *Metcalfa pruinosa* in Austria. J. Pest Sci. 83:381–390. <https://doi.org/10.1007/s10340-010-0308-3>
- Ueno T. 1998. Adaptiveness of sex ratio control by the pupal parasitoid *Itopectis naranye* (Hymenoptera: Ichneumonidae) in response to host size. Evol. Ecol. 12:643–654. <https://doi.org/10.1023/A:1006577314205>
- Van Driesche RG and TS Bellows. 1996. Biological Control. Springer. Boston, MA.
- Wilson SW and A Lucchi. 2001. Distribution and ecology of *Metcalfa pruinosa* and associated planthoppers in North America (Homoptera: Fulgoroidea). pp. 121–130. In: *Metcalfa pruinosa*: Flatide di Interesse Agrario, Urbano e Apistico. Accademia Nazionale Italiana di Entomologia. Florence, Italy.