

# 미국선녀벌레(*Metcalfa pruinosa*) (Hemiptera: Flatidae) 월동난 부화 예측 모델 개발

이원훈 · 박창규<sup>1\*</sup> · 서보윤<sup>1</sup> · 이상구<sup>1</sup>농림축산검역본부, <sup>1</sup>국립농업과학원 작물보호과

## Development of an Emergence Model for Overwintering Eggs of *Metcalfa pruinosa* (Hemiptera: Flatidae)

Wonhoon Lee, Chang-Gyu Park<sup>1\*</sup>, Bo Yoon Seo<sup>1</sup> and Sang-Ku Lee<sup>1</sup>

Animal and Plant Quarantine Agency, 177, Hyeoksion 8-ro, Gimcheion-si, Gyeongsangbuk-do, 39660, Republic of Korea

<sup>1</sup>Crop protection Division, Department of Crop Life Safety, National Academy of Agricultural Science, Wanju 55365, Republic of Korea

**ABSTRACT:** The temperature-dependent development of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs was investigated at ten constant temperatures (12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, and 35±1°C, Relative Humidity 20~30%). All individuals collected before April 13, 2012 failed to develop into first instar larvae. In contrast, some individuals that were collected on April 11, 2013 successfully developed when reared under 20~32.5°C temperature regimes. The developmental duration was shortest at 30°C (13.3 days) and longest at 15°C (49.6 days) in the fourth collected colony (April 26 2013). Developmental duration decreased with increasing temperature up to 30°C and development was retarded at high-temperature regimes (32.5°C). The lower developmental threshold was 10.1°C and the thermal constant required to complete egg overwintering was 252DD. The Lactin 2 model provided the best statistical description of the relationship between temperature and the developmental rate of *M. pruinosa* overwintering eggs ( $r^2 = 0.99$ ). The distribution of the developmental completion of overwintering eggs was well described by the 2-parameter Weibull function ( $r^2 = 0.92$ ) based on the standardized development duration. However, the estimated cumulative 50% spring emergence dates of overwintering eggs were best predicted by poikilotherm rate model combined with the 2-parameter Weibull model (average difference of 1.7 days between observed and estimated dates).

**Key words:** *Metcalfa pruinosa*, Overwintering egg, Temperature-dependent development, Model, Forecasting

**초록:** 채집 시기에 따른 미국선녀벌레(*Metcalfa pruinosa*) 월동난 발육을 다양한 항온조건에서 조사하였다. 2012년의 경우 4월 13일 이전에 채집된 월동난은 부화에 실패하였으나, 2013년 4월 11일 채집한 개체들이 일부 온도 조건에서 성공적으로 부화하였다. 온도에 따른 월동난의 발육 조사 결과 12.5°C와 35°C를 제외한 모든 온도 조건에서 발육이 가능하였다. 2013년 4월 26일 채집하여 가온한 결과 15°C에서 49.6일로 발육기간이 가장 길었고 30°C에서 13.3일로 가장 짧았다. 온도가 증가함에 따라 발육기간이 짧아지는 경향을 보였으나 32.5°C에서는 30°C에서 보다 발육기간이 길어 고온에서 발육이 지연되는 현상을 보였다. 온도와 발육율과의 관계를 설명한 선형 모형을 이용하여 추정된 미국선녀벌레의 발육 영점온도는 10.1°C, 유효적산온도는 252.5DD였다. 온도 의존적인 발육율을 설명하기 위하여 사용된 선형 및 비선형 5개 모델 중 Lactin 2 모델이 가장 높은 해석력을 보여주었다. 월동난 개체군의 발육 완료율을 설명하기 위해 사용된 Two-parameter Weibull 함수는 발육기간을 기반으로 하였을 경우 결정계수 0.92로 높은 결정력을 보였다. 개발된 발육율, 발육완료 모델들을 이용하여 추정된 50% 누적 우화일과 실측된 우화일의 차이를 보면 Poikilotherm rate 모델을 이용하여 추정된 결과가 세 지역 편차일의 평균이 1.7일로 상대적으로 다른 모델들 보다 가장 정확하게 50% 누적 부화일을 예측할 수 있었다.

**검색어:** 미국선녀벌레, 월동난, 온도의존적 발육, 모델, 예측

\*Corresponding author: changgpark@korea.kr

Received October 7 2015; Revised December 29 2015

Accepted February 4 2016

미국선녀벌레는 노린재목, 선녀벌레과에 속하는 해충으로 북미지역인 신북구 지역이 원산으로 알려져 있으며(Dean and

Bailey, 1961), 기주로는 미국에서 50개과 102종 식물어(Wilson and Lucchi, 2000), 유럽에서는 78과 330종 이상의 광범위한 목본 및 초본식물류기(Bagnoli and Lucchi, 2000; Alma et al., 2005), 한국에서는 아까시나무 등 41과 74종이 보고되었다(Kim et al., 2011). 기주 식물 중 농작물로는 포도, 사과, 배, 단감, 감귤류, 핵과류, 무화과, 올리브, 참다래, 감 등에서 미국선녀벌레의 발생이 보고되어 있다(CABI, 2007; Wilson and Lucchi, 2001). 한국에서 미국선녀벌레의 최초 발생 및 농작물 피해 보고로는 2009년 김해지역의 단감 농가에서였으며(Lee and Wilson, 2010), 성충 및 약충들의 흡즙 및 배설 활동으로 인해 포도의 품질저하가 일어날 수 있고, 콩의 경우 30~40%의 수량 감소 결과가 있다고 보고되었다(Strauss, 2010; Ciampolini et al., 1995).

미국선녀벌레는 알로 월동하는데, 알은 기주식물의 수피 아래 갈라진 틈 사이에 날개로 산란되며, 240일 이상 알로 경과한다(Lucchi, 1994). 월동한 알은 5월 중, 하순경에 부화한 후 5령 약충을 거쳐 7월에서 10월까지 성충으로 발육하며, 년 1세대 발생한다(CABI, 2007). 미국선녀벌레는 한국에서 2011년 이후 전국적으로 분포 지역이 급격히 확산되었으나, 월동난의 생태 및 발육 특성에 관한 기초 정보들이 알려지지 않아 본 해충의 정착, 분포 가능 지역 예측 및 약충 출현 시기 추정과 살충제 사용을 기반으로 한 밀도 억제 전략 수립에 어려움을 겪고 있다. 해충의 발육에 가장 큰 영향을 미치는 기상요소는 온도이며, 온도에 따른 발육율을 해석하기 위한 다양한 선형, 비선형 모델들이 개발되어져 왔다(Campbell et al., 1974; Logan et al., 1976; Sharpe and DeMichele, 1977; Schoolfield et al., 1981; Lactin et al., 1995; Briere et al., 1999). 아울러 이들 수리 모델들을 이용한 해충의 발생 시기를 예측하기 위한 다양한 시도들이 진행되어 왔는데 가장 간단하며 현실적으로 광범위하게 사용되는 수단이 발육영점온도를 이용한 Degree-Day 모델을 이용한 방법이다(Blomefield and Giliomee, 2014; Evans et al., 2014; Akotsen-Mensah et al., 2011). 한편 Degree-Day 모델을 적절하게 사용하기 위해서는 발육이 개시되는 시점인 biofix를 규명하여야 하며(Flint and Gouveia, 2001), 특히 우리나라와 같은 온대지방에서 월동하는 해충의 경우 월동 후 발육을 정확하게 예측하기 위해서는 정확한 월동 후 발육개시 시기를 규명하는 것이 전제 조건이 될 것이다.

따라서 본 연구는 미국선녀벌레 월동난의 (1) 발육 개시 시기 추정 (2) 온도에 따른 발육 특성 규명 (3) 약충 발생 추정을 위한 수학적 모델 개발 및 평가 연구를 수행함으로써, 보다 정확한 미국선녀벌레 약충 출현 시기를 예측할 수 있는 수단을 제공하고, 효과적인 개체군 밀도 억제 및 분포 확산 저지를 위한

전략 수립의 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 월동난 채집

미국선녀벌레 월동난의 경우 직접 육안으로 관찰이 어려워 이전 해에 약충 및 성충이 다량 발생하였던 식물체의 가지를 절단해 오는 방법으로 채집하였다. 월동난 채집을 위해 충북 청원군 오창읍(36°45'30.0"N, 127°28'50.3"E) 인근 야산에서 자생하고 있는 꽃사과(*Malus prunifolia*, 2011년)와 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*, 2012; 2013년)의 사방에서, 지상으로부터 1.5-4 m 높이에 있는 직경 0.7~3.0 cm 굵기의 가지를 임의로 선정하여 고지(extendable) 전정가위(tree pruner)를 이용하여 자른 후 수거하였다. 미국선녀벌레 월동난 휴면 종료에 관한 정보가 없었기 때문에 먼저 월동난의 휴면 종료 시점 파악을 위해 2011년 2회(2월 22일, 3월 10일), 2012년은 8회(1월 11일, 26일, 2월 8일, 20일, 3월 16일, 28일, 4월 13일, 27일) 채집하였다. 2013년은 이전의 실험 결과를 바탕으로 보다 정밀한 휴면 종료 시점을 파악하고 온도에 따른 발육 특성 조사를 위해 5일 간격으로 5회(4월 11일, 16일, 22일, 26일, 5월 2일) 채집하였다.

### 월동난 발육 조사

2011년 실험은 채집된 가지를 3~5 cm 크기로 자른 후 현미경 하에서 월동난의 존재 유무를 확인한 후 월동난이 발견된 가지를 물을 적신 필터페이퍼가 깔린 직경 10 cm 높이 4 cm 원통형 사육용기(SPL Life sciences Cat. No. 310102, Korea)에 넣은 후 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35°C, L:D=14:10 조건의 향온기(NK-system TG-100-ADCT, ±1.0°C, RH 20~30%, L:D=14:10)에 옮겨 부화시기를 조사하였다. 2012년 실험은 채집된 나무 가지를 15 cm 정도의 크기로 자른 후 분무기로 적당히 물이 흐르지 않을 정도로 적신 키친타올을 2~3장 넣은 플라스크 용기(가로 × 세로 × 높이 = 18 × 24 × 8 cm)에 넣은 후 25, 27.5°C, L:D=12:12, 14:10 두 가지 광조건의 향온기로 옮겨 부화시기를 조사하였으며, 2013년 실험은 채집된 나무 가지를 길이 10~15 cm 크기의 토막으로 자른 후 5~8개의 토막을 키친타올로 수분을 공급한 사각형의 용기(SPL Life sciences Cat. No. 310075, 301176결합, Korea)에 넣은 후 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35°C, L:D=14:10 조건의 향온기(NK-system TG-100-ADCT, ±1.0°C, RH 20~30%, L:D=14:10)로 옮겨 부화시기를 조사하였다. 모든 연도에서 월동난의 부화 시기는 24

시간 간격으로 부화되는 약충의 수를 조사하는 방법으로 수행하였다.

### 월동난 온도 발육 및 발육완료 분포 모델

2013년 4월 26일에 채집하여 가온한 개체군 발육자료를 이용하여 온도와 월동난 발육율과의 관계를 분석하였다. 선형 모델은 최소자승법(Campbell et al., 1974)을 사용하여 구하였으며(수식 1), 월동난 발육율은 평균 발육기간의 역수로 표현하였다.

$$r(T_c) = aT_c + b \quad (\text{수식 1})$$

수식 1에서  $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율이며,  $T_c$ 는 온도(°C)  $a$ 는 직선회귀식의 기울기이며,  $b$ 는 0°C에서 발육율이다. 월동난의 발육영점온도는 회귀직선식의 X절편(-b/a) 값이 되고, 발육완료에 필요한 유효적산온도(Degree-day)는 기울기의 역수(1/a) 값이 된다.

온도와 월동난의 발육율과의 관계를 분석하기 위해 사용된 비선형 모델은 Briere 1 (Briere et al., 1999)(수식 2), Lactin 2 (Lactin et al., 1995)(수식 3), Logan 6 (Logan et al., 1976)(수식 4), Sharpe 와 DeMichele (1977)이 제안하고 Schoolfield et al. (1981)이 수정한 Poikilotherm rate 모델(수식 5)을 사용하였다.

$$r(T_c) = aT_c(T_c - T_0)(T_L - T_c)^{1/2} \quad (\text{수식 2})$$

수식 2에서  $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율,  $T_c$ 는 온도(°C),  $a$ 는 매개변수,  $T_0$ 는 발육영점온도,  $T_L$ 는 치사 상한온도를 의미한다.

$$r(T_c) = e^{(\rho T_c)} - e^{(\rho T_L - (T_L - T_c)/\Delta T)} + \lambda \quad (\text{수식 3})$$

수식 3에서  $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율,  $T_c$ 는 온도(°C),  $\rho$ 는 최적온도에서 발육율 상수,  $T_L$ 는 치사 상한온도,  $\Delta T$ 는 고온부분 경계지역의 온도 범위로서 생리적인 장애가 최우선 영향이 되는 온도 범위를 의미하며,  $\lambda$ 는 이 식에서 음의 y절편 값을 가지게 만듦으로써 발육영점온도를 추정할 수 있도록 해주는 값이다.

$$r(T_c) = \psi(e^{(\rho T_c)} - e^{(\rho T_L - (T_L - T_c)/\Delta T)}) \quad (\text{수식 4})$$

수식 4에서  $r(T_c)$ 은 온도에 따른 발육율,  $\psi$ 는 최대발육율,

$T_c$ 는 온도(°C),  $\rho$ 는 최적온도에서 발육율 상수,  $T_L$ 는 치사 상한온도,  $\Delta T$ 는 고온부분 경계지역의 온도 범위로서 생리적인 장애가 최우선 영향이 되는 온도 범위를 의미한다.

$$r(T_c) = \frac{RH025 \frac{T}{298.15} \cdot \exp\left[\frac{HA}{R}\left(\frac{1}{298.15} - \frac{1}{T}\right)\right]}{1 + \exp\left[\frac{HL}{R}\left(\frac{1}{TL} - \frac{1}{T}\right)\right] + \exp\left[\frac{HH}{R}\left(\frac{1}{TH} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (\text{수식 5})$$

수식 5에서  $r(T_c)$ 은 절대 온도(°K)에서의 발육율이며,  $R$ 은 기체상수(1.987 cal·deg<sup>-1</sup>·mole<sup>-1</sup>)이고,  $RH025$ 는 25°C에서의 발육율로 이 온도는 발육에 어떤 영향도 미치지 않는다는 가정을 포함한다.  $HA$ 는 모형에서 가정한 속도조절효소가 촉매하는 반응의 활성화 엔탈피이며,  $TL$ 은 속도조절효소가 저온에 의해 50% 활성을 나타내는 온도이고,  $HL$ 은 속도조절효소의 저온에 의해 50% 활성화되는 것과 관련된 엔탈피의 변화이다. 한편  $TH$ 는 속도조절효소가 고온에 의해 50% 활성을 나타내게 되는 온도이며,  $HH$ 는 이와 관련된 엔탈피의 변화를 의미한다.

월동난의 발육완료 분포는 2013년 4월 26일에 채집하여 가온한 개체군 발육자료를 이용하여 분석하였으며, two-parameter weibull 모델을 사용하였다(Wagner et al., 1984)(수식 6).

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/\eta)^\beta] \quad (\text{수식 6})$$

수식 6에서  $F(x)$ 는 표준화된 시간  $x$  (발육기간/평균발육기간 또는 유효적산온도/평균유효적산온도)에서 동일한 연령집단의 개체들 중에 다음 연령단계로 발육이 완료된 누적 개체수들의 비율을 의미한다.  $\eta$ ,  $\beta$ 는 비선형 회귀식의 매개변수이며, 분석에 사용된 모든 모델들의 매개변수 추정을 위하여 윈도우용 TableCurve 2D ver. 5.01 (SYSTAT, 2002)의 사용자 정의 선형, 비선형 모델 분석 모듈을 사용하였다.

### 월동난 부화 예측 모델 평가

모델 평가 자료의 수집은 경기 화성시, 충남 당진군, 충북 음성군에서 전년도에 미국선녀벌레의 발생이 많이 관측되어 월동난이 산란되어 있을 것으로 생각되는 아까시나무를 임으로 선정하여 수행하였다. 2014년 5월 15일부터 16일까지 선정된 아까시나무의 지상으로부터 1.5~4 m 높이에 있는 직경 0.7~3.0 cm 굵기의 가지를 고지(extendable) 전정가위(tree pruner)를 이용해 50~80 cm 길이로 임으로 자른 후 수거하여 수원에 있는 국립농업과학원 작물보호과 포장(경기도 수원시 권선구 서둔동)으로 옮겼다. 옮긴 가지는 물이 담겨있는 원통형의 용기에

넣어 가지 기부에 수분이 공급될 수 있도록 한 후 그들이 있는 야외에 보관하면서 매일 부화하는 약충 수를 조사하였다.

부화 예측 모델의 평가는 선형 모델의 경우 두 가지 방법으로 월동난의 누적 부화율을 추정하였다. 첫 번째는 발육영점온도를 이용하는 방식으로 매일의 유효적산온도를 구한 후 당일까지 누적된 유효 적산온도에 해당하는 누적 부화율을 월동난 발육완료 모델을 이용하여 추정하였다. 두 번째는 발육율을 이용하는 방식으로 매일의 평균 온도에 해당하는 발육율을 계산한 후 당일까지 누적된 발육율에 해당하는 누적 부화율을 월동난 발육완료 모델을 이용하여 추정하였다. 비선형 모델의 경우는 선형 모델의 두 번째 방법과 같은 발육율을 누적하는 방법을 사용하여 누적 부화율을 추정하였으며, 이들의 추정에 사용된 발육완료 모델은 two-parameter weibull 함수를 사용하였으며 (Table 5) 누적 부화 완료 비율은 수식 7과 같은 방법으로 계산하였다.

$$F(\sum r(T)) = 1 - \exp[-(\sum r(T)/\eta)^\beta] \quad (\text{수식 7})$$

여기에서  $F(\sum r(T))$ 는 누적 부화 완료율,  $\sum r(T)$ 는 당일까지의 누적 발육율이나 누적 유효적산온도이고,  $T$ 는 당일의 평균온도,  $\eta$ 와  $\beta$ 는 수식 6으로부터 추정된 매개변수이다. 유효적산온도와 일일 발육율 계산에 사용된 경기 화성, 충남 당진, 충북 음성 의 온도자료는 농촌진흥청 농업기상관측 시스템 (<http://weather.rda.go.kr/awsadm/index.jsp>)에서 제공하는 지역별 일평균 기온을 사용하였고, 경기 수원 의 온도자료는 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>)에서 제공하는 일평균기온을 사용하였다. 유효적산온도 및 발육율의 누적은 4월 1일부터 누적하는 것으로 하였다. 모델의 평가는 추정된 누적 부화율과 실제 조사된 지역별, 일별 누적 부화율과의 차이로 비교하였다.

## 결과

### 월동난 발육

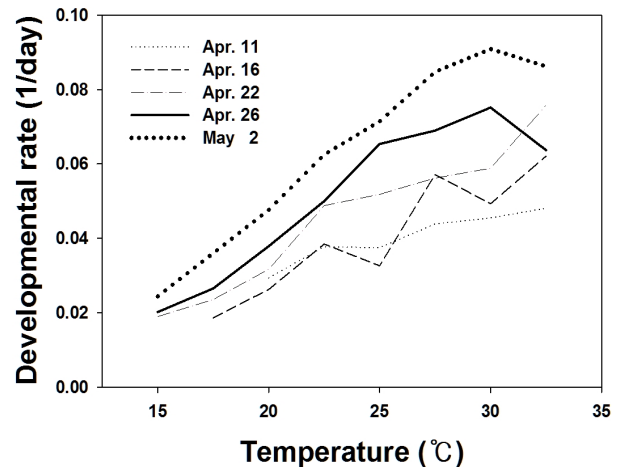
2011년 2월과 3월에 채집된 미국선녀벌레 월동난 발육 조사 결과 모든 온도 조건에서 부화 약충을 얻을 수 없었다. 2012년 조사 결과 4월 13일까지 채집된 월동난에서는 부화 약충을 얻을 수가 없었으나 4월 27일 채집 월동난에서는 27.5°C L:D=12:12 조건에서 가온 10일 이후에 11마리가, 25°C L:D=12:12 조건에서는 가온 10일 이후에 38마리가, 25°C L:D=14:10 조건에서는 26마리가 부화하였다 (Table 1, 2). 2013년 조사 결과 채집 시기와 관계없이 12.5°C와 35°C 조건에서는 한 마리도 부화하지 못

**Table 1.** Numbers of newly emerged first instar larvae from *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs at constant temperature (25°C) and two photo periods (L:D=12:12, L:D=14:10)

Sampling date of overwintering eggs	L:D=12:12					L:D=14:10				
	Days after incubation									
	1	3	7	10	10<	1	3	7	10	10<
Jan. 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jan. 26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feb. 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feb. 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mar. 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mar. 28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apr. 13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apr. 27	-	-	-	-	38	-	-	-	-	26

**Table 2.** Numbers of newly emerged first instar larvae from *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs at constant temperature (27°C) and two photo periods (L:D=12:12, L:D=14:10)

Sampling date of overwintering eggs	L:D=12:12					L:D=14:10				
	Days after incubation									
	1	3	7	10	10<	1	3	7	10	10<
Jan. 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jan. 26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feb. 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feb. 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mar. 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mar. 28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apr. 13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apr. 27	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-



**Fig. 1.** Relationship between temperature and developmental rate of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs collected on various dates.

**Table 3.** Development duration (days, mean  $\pm$  S.D) of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs at various constant-temperature regimes (L:D = 14:10)

Temperatures	Sampling date of overwintering eggs				
	Apr. 11	Apr. 16	Apr. 22	Apr. 26	May 2
12.5°C	-	-	-	-	-
15.0°C	-	-	52.8 $\pm$ 1.71 (4)	49.6 $\pm$ 1.52 (5)	41.0 $\pm$ 0.00 (1)
17.5°C	-	53.8 $\pm$ 3.31 (89)	42.5 $\pm$ 4.76 (89)	37.7 $\pm$ 3.55 (139)	27.8 $\pm$ 3.22 (180)
20.0°C	34.1 $\pm$ 4.02 (51)*	38.1 $\pm$ 8.51 (13)	31.6 $\pm$ 4.32 (84)	26.4 $\pm$ 6.73 (178)	21.0 $\pm$ 4.40 (154)
22.5°C	26.5 $\pm$ 5.84 (11)	26.0 $\pm$ 6.88 (74)	20.5 $\pm$ 2.18 (152)	20.0 $\pm$ 2.66 (173)	16.0 $\pm$ 1.65 (157)
25.0°C	26.7 $\pm$ 6.80 (25)	30.7 $\pm$ 11.66 (106)	19.3 $\pm$ 5.84 (61)	15.3 $\pm$ 1.80 (238)	14.0 $\pm$ 2.39 (143)
27.5°C	22.8 $\pm$ 4.92 (19)	17.5 $\pm$ 2.99 (126)	17.8 $\pm$ 5.84 (88)	14.5 $\pm$ 2.06 (138)	11.8 $\pm$ 1.14 (79)
30.0°C	22.0 $\pm$ 9.96 (6)	20.3 $\pm$ 6.27 (12)	17.0 $\pm$ 0.00 (3)	13.3 $\pm$ 0.75 (13)	11.0 $\pm$ 1.07 (27)
32.5°C	20.8 $\pm$ 2.82 (8)	16.1 $\pm$ 1.21 (7)	13.2 $\pm$ 2.64 (9)	15.7 $\pm$ 2.28 (40)	11.6 $\pm$ 2.27 (23)
35.0°C	-	-	-	-	-

하였으며, 4월 11일 채집 월동난은 20~32.5°C, 4월 16일 채집 월동난은 17.5~32.5°C, 4월 22일 이후 채집 월동난은 15~32.5°C 온도 조건에서 한 마리 이상 부화하였다(Table 3). 2013년 4월 11일부터 4월 22일까지 채집된 월동난의 경우에는 온도가 증가함에 따라 발육기간이 계속 짧아졌으나, 4월 26일 및 5월 2일 채집난의 경우 32.5°C 온도 조건에서 30°C 보다 발육기간이 길어져 고온에서 발육율이 둔화되는 경향을 보였다(Table 3, Fig. 1). 4월 26일 채집된 월동난의 경우 15°C에서 49.6일로 발육기간이 가장 길었고 30°C에서 13.3일로 가장 짧았다.

### 월동난 온도 발육 및 발육완료 분포 모델

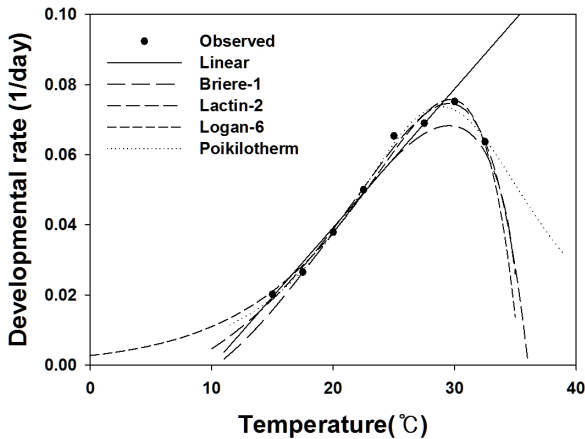
온도에 따른 발육율 분석에 사용된 모델은 선형, 비선형을 포함하여 5개 모델을 사용하였다. 선형모델은 결정계수 값이 0.98이었으며, 모든 비선형 모델들의 결정계수 값은 0.99로 높은 모델 적합성을 보여주었다(Table 4, Fig. 2). 선형 모델을 이용하여 추정된 발육 영점온도는 10.1°C, 발육완료에 필요한 유효적산온도는 252.5DD 였다. 월동난 집단의 발육완료 분포를 알아내기 위하여 사용된 two parameter weibull 함수의 경우 발육기간을 기초로 하여 추정하였을 경우에는 결정계수가 0.92로 높은 모형 적합성을 보였으나 유효적산온도를 이용하여 추정하였을 경우에는 결정계수가 0.76으로 낮았다(Table 5, Fig. 3).

### 월동난 발육 예측 모델 평가

개발된 미국선녀벌레 월동난 발육모델 다섯 가지와 발육완료 모델을 사용하여 2014년 월동난의 부화시기를 예측하였다(Table 6). 유효적산온도를 기반으로 한 Degree day 모델의 경우 50% 예측 누적부화일이 화성 5월 23일(-3일), 당진 5월 26일(+1일) 음성 5월 25일(+2일)로 추정되었다. 발육율을 기반으로 한 모델들을 이용하여 50% 누적 부화일을 예측한 경우 화성 지역은 Briere 1 모델의 5월 25일(-1일)로 가장 실측치와 편차가 적었고 Logan 6 모델이 5월 18일(-8일)로 가장 편차가 컸다. 당진지역은 Poikilotherm rate 모델이 5월 25일(0일)로 가장 편차가 적었고 Logan 6 모델이 5월 21일(-4일)로 가장 편차가 컸다. 또한 음성지역은 Linear, Lactin 2, Poikilotherm rate 모델이 모두 5월 24일(+1일)로 가장 편차가 적었고 Briere 1 모델이 5월 27일(+4일)로 가장 실측치와 편차가 크게 예측 되었다.

### 고찰

미국선녀벌레는 미국 Florida주에서부터 캐나다의 온타리오 지방까지 넓은 지역에 분포가 보고된 종이다. 월동난의 부화시기는 3월 중하순(미국 텍사스주)(Dean and Bailey, 1961), 4월(미국 플로리다주)(Mead, 1969), 5월(이탈리아)(Lucchi, 1994) 등 지역에 따라 다르게 부화하는 것으로 알려져 있으나 월동기



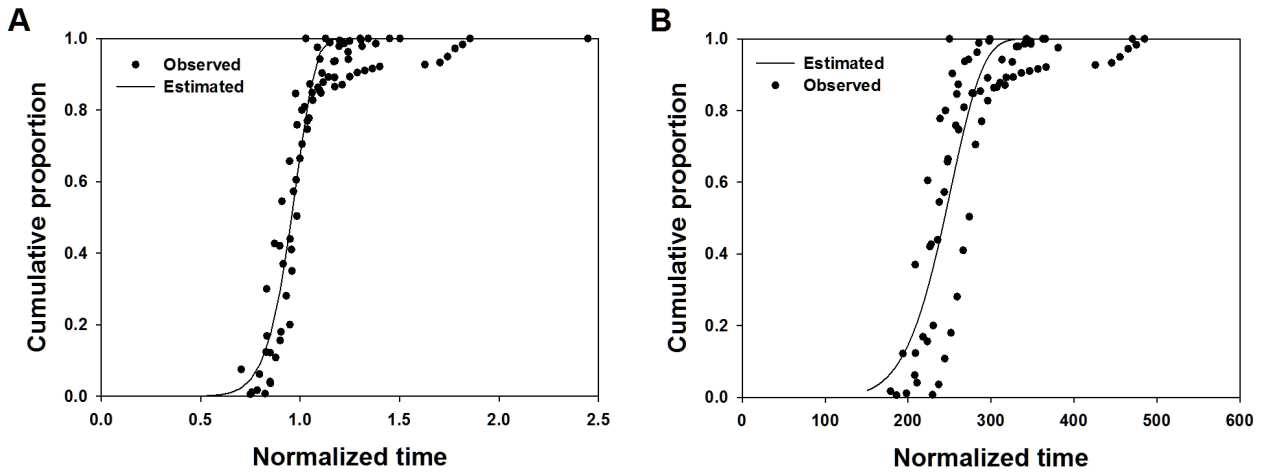
**Fig. 2.** Various developmental rate curves describing the relationship between temperature and temperature-dependent development of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs collected on April 26, 2013.

**Table 4.** Parameter estimates for temperature-dependent development models describing the relationship between the temperature and developmental rate of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs collected on April 26, 2013

Model	Parameter & $r^2$	Estimated value
Linear	a	0.00396
	b	-0.0400
	$r^2$	0.98
Briere 1	a	0.00005
	$T_0$	10.38
	$T_L$	35.36
	$r^2$	0.99
Lactin 2	$\rho$	0.14160
	$T_L$	36.59
	$\Delta T$	7.05
	$r^2$	0.99
Logan 6	$\psi$	0.00665
	$\rho$	0.16684
	$T_L$	35.41
	$\Delta T$	5.51
	$r^2$	0.99
Poikilotherm rate model	RH025	0.0794
	HA	23560.7
	HL	-7168958.7
	TL	284.18
	HH	53448.8
	TH	302.71
$r^2$	0.99	

작에 대하여 구체적으로 보고 된 적은 없다. 온도에 따른 발육 모델을 개발하고 이를 활용하기 위해서는 해당 개체군이 발육을 개시하는 시기(Biofix)를 정확하게 규정하는 것이 예측의 정

확성을 높이기 위한 첫 번째 전제 조건이 될 것이다. 특히 우리나라와 같이 추운 겨울을 월동한 후 이듬해에 온도가 올라가는 봄에 발육을 시작하게 되는 경우 온도가 어느 시점부터 발육에 영향을 미치게 되는지를 알아야 온도 발육 모델을 이용한 발생 예측의 정확도를 높일 수 있을 것이다. 2011년과 2012년의 월동난 발육 조사 결과 4월 13일 이전에 채집된 월동난을 가온하였을 경우 월동 후 발육에 실패하였으나 2012년 4월 27일에 채집한 월동난의 경우에는 가온하여 부화 약충을 얻을 수 있었다 (Table 1, 2). 이상의 결과로 볼 때 2012년의 경우 우리나라에서 미국선녀벌레 월동난의 휴면 종료는 4월 14일부터 4월 27일 사이에 이루어 졌을 것으로 추정되었다. 즉 4월 13일까지 채집된 월동난의 경우 휴면이 완전히 종료되지 않아 가온에 의한 휴면 후 발육이 불가능하여 약충으로 발육하지 못하였을 것으로 추론되었다. 본 연구에서는 보다 정밀하게 휴면 종료 시기를 알아보기 위하여 2013년 4월 11일부터 5일 간격으로 5회 월동난을 채집하여 가온 실험한 결과 2013년에는 가장 이른 시기인 4월 11일에 채집된 월동난도 6개 항온 조건(20~32.5°C)에서 가온에 따른 난 발육이 정상적으로 진행되어 이미 이 시기에 휴면이 종료된 개체들이 존재하여 발육에 성공한 것으로 조사되었다 (Table 3). 조사 결과 4월 11일, 4월 16일 채집된 월동난의 경우 일부 개체들이 휴면이 종료되었지만 전체 개체군을 대표할만한 많은 개체들이 휴면이 종료된 것은 아닌 것으로 판단된다. 그 근거로는 1, 2차 가온시기까지는 대부분의 온도에서 상대적으로 부화수가 적었고, 발육영점온도보다 높은 15°C 항온 조건에서 발육이 진행된 개체들이 없었으며, 온도 증가에 따른 발육율의 증가가 빠르지 않았다는 점을 들 수 있겠다. 한편 4월 22일 채집되어 가온을 시작한 3차 가온 개체군의 경우에도 22°C 이하의 낮은 온도에서는 비교적 안정된 발육율 증가를 보여주었으나 발육속도가 급격히 빨라지는 최적온도 구간이 속한 25~30°C에서는 발육율의 증가가 완만하게 상승하고 있고, 일반적으로 곤충의 발육이 억제되는 30°C 이상에서 발육율이 둔화되지 않고 증가하는 것으로 볼 때(부화에 성공한 개체수도 이 시기 이후보다 적었음) 이 시기 또한 정상적으로 휴면을 종료한 개체들이 아직 일정 비율에 도달하지 못한 것으로 판단되었다 (Fig. 1). 4월 26일과 5월 2일에 채집된 월동난이 가온된 4, 5차 실험에서는 부화가 확인된 전체 온도 구간에서 온도별 발육속도의 증가가 온도 의존적 발육율의 전형적인 모양을 보여주고 있다. 그러나 5차 가온 개체군의 경우 온도별 발육율을 보면 4차 가온 개체군보다 모든 온도조건에서 일정하게 높은 발육율을 나타내고 있는데 이는 월동난을 채집하기 전 이미 야외 조건에서 일정 부분 휴면 후 발육이 진행되었음을 의미한다고 할 수 있겠다. 이상의 결과들을 종합해 볼 때 온도에 따른 미국선녀벌



**Fig. 3.** Development completion curve of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs collected on April 26, 2013. The 2-parameter Weibull function was used (normalized by average development duration [A] and average degree days [B]).

**Table 5.** Estimated parameters of stage emergence models for *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs that were collected on April 26, 2013

Model	Normalization method	Parameter	Estimated value	SEM	r <sup>2</sup>
Two parameter weibull	Development duration <sup>a)</sup>	$\beta$	11.046	0.8765	0.92
		$\eta$	0.990	0.0051	
	Degree day <sup>b)</sup>	$\beta$	7.435	0.9824	0.76
		$\eta$	256.321	2.9305	

<sup>a)</sup>Normalization was operated in a manner dividing development duration by average development duration

<sup>b)</sup>Normalization was operated in a manner dividing degree days by average degree days

**Table 6.** Deviations (days) between observed and estimated dates of 50% cumulative emergence of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs

Location	Model	Observed	Estimated	Deviations (days)
Hwaseong	Linear	May 26	May 22	-4
	Briere 1		May 25	-1
	Lactin 2		May 22	-4
	Logan 6		May 18	-8
	Poikilotherm rate		May 22	-4
	Degree day		May 23	-3
Dangjin	Linear	May 25	May 26	+1
	Briere 1		May 28	+3
	Lactin 2		May 26	+1
	Logan 6		May 21	-4
	Poikilotherm rate		May 25	0
	Degree day		May 26	+1
Eumseong	Linear	May 23	May 24	+1
	Briere 1		May 27	+4
	Lactin 2		May 24	+1
	Logan 6		May 20	-3
	Poikilotherm rate		May 24	+1
	Degree day		May 25	+2

레의 월동난 발육 예측 모델 개발을 위하여 가장 적합한 분석 자료로는 4월 26일 채집되어 가온된 4차 가온 개체군 자료로 보이며, 휴면 후 발육을 개시하는 시기는 연도 간에 다소 차이

는 있을 수 있으나 빠르면 4월 초순에도 가능할 것으로 판단된다.

곤충의 발육속도와 온도와의 관계를 해석하기 위하여 많은 선형 및 비선형 모델들이 개발되었다. 발육속도와 온도와의 관

**Table 7.** Values of model selection methods of four non-linear models describing relationship between the temperature and post-diapause development of *Metcalfa pruinosa* overwintering eggs

Selection Method	Model	Values
Adjusted $r^2$	Linear	0.97
	Briere 1	0.98
	Lactin 2	0.98
	Logan 6	0.97
	Thermodynamic	0.95
AIC*	Linear	-97.367
	Briere 1	-97.418
	Lactin 2	-100.219
	Logan 6	-82.184
	Thermodynamic	-96.032
AICc**	Linear	-84.033
	Briere 1	-91.418
	Lactin 2	-86.886
	Logan 6	-79.184
	Thermodynamic	-12.032
BIC***	Linear	-88.970
	Briere 1	-89.100
	Lactin 2	-91.822
	Logan 6	-75.347
	Thermodynamic	-87.476

\* Akaike information criterion

\*\* Small sample unbiased Akaike information criterion

\*\*\* Bayes-Schwarz information criterion

계를 직선적으로 해석하는 방식에는 근본적인 한계가 있기 때문에 이러한 한계를 해결하기 위하여 발육속도와 온도와의 관계를 비선형 모델로 설명하려는 노력들이 있었다. 미국선녀벌레 월동난은 휴면 후 발육 초기에 평균온도가 낮고 일교차가 심한 이른 봄의 온도조건을 경험하게 되므로 낮은 온도 조건에서의 발육을 보다 잘 해석할 수 있는 모델을 찾기 위하여 비선형 모델들을 사용하여 분석하였다. 본 연구의 분석에 사용된 모든 비선형 모델에서 결정계수( $r^2$ ) 값이 0.99 이상으로 높은 모형 적합성을 보여 비선형 모형으로 미국선녀벌레 월동난의 온도에 따른 발육율을 예측하는 것이 유용하리라 판단되었다(Table 5). 비선형 모델들 중에 매개변수의 개수를 고려하여 관측치를 가장 잘 설명하는 모델을 통계적으로 선별할 수 있는 지수들로 조정된 결정계수(adjusted  $r^2$ ), AIC, AICc 그리고 BIC 등이 있다(Johnson and Omland, 2004). 이들 지수들을 계산해 본 결과 모형의 적합성은 조정된 결정계수(adjusted  $r^2$ ), AIC, BIC 값

에서는 Lactin 2 모델이 가장 높았으나 AICc 값으로는 Briere 1 모델이 가장 좋았다(Table 7). 온도에 따른 곤충 개체군 집단의 발육 패턴을 보면 특정 일시에 태어난 동일 연령의 모든 개체가 시간의 흐름에 따라 일정한 비율의 개체들이 순차적으로 발육이 완료되는 분포 패턴을 가지게 된다. 이와 마찬가지로 월동 개체군의 휴면이 완료되는 현상도 하나의 생리적 발육 현상으로 겨울 기간 동안 경험하게 되는 일장 및 온도에 의존하여 개체별로 휴면의 종료시기가 다르게 되는 특정한 휴면 완료 패턴을 가질 것으로 추정할 수 있고 월동 후 발육도 유사한 방식으로 발육이 완료될 것이다. 동일한 발육단계, 동일한 연령집단의 발육완료를 추정하는 이론은 Curry et al. (1978)에 의하여 개발되어 졌는데, 본 연구에서도 위의 방법과 유사하게 각각의 온도 조건에서 개체들의 발육에 필요한 유효적산온도를 발육에 필요한 평균 유효적산온도로 나누는 방법으로 발육기간을 정규화 시킨 후 Weibull 함수에 적용시킨 결과 모델의 해석력( $r^2$ )은 0.76로 비교적 낮았고 발육기간을 평균 발육기간으로 나누는 방법으로 정규화 시킨 후 Weibull 함수에 적용시킨 경우 해석력은 0.92로 전자보다 상대적으로 높았다(Table 5). 이러한 결과를 얻게 된 이유는 발육기간보다 유효적산온도 값이 커서 평균 유효적산온도로 표준화 시킨 경우 표준화 이후에도 낮은 온도와 높은 온도에서 발육된 개체들의 유효적산온도 값의 편차가 크기 때문으로 추정된다.

모델을 이용한 미국선녀벌레 월동난의 발육 시기 예측은 지역별로 부화 약충의 출현 시기를 정확하게 추정하여 이에 따른 적절한 방제 시기를 결정하기 위한 중요한 도구가 될 수 있을 것이다. 각각의 모델로 예측된 50% 누적 부화일과 월동난의 발육이 조사된 3개 지역별 실측 부화일과의 편차에 대한 절대값의 평균을 보면 Poikilotherm rate 모델이 1.7일로 가장 작았고, 다음이 Linear 모델, Lactin 2 모델, Degree day 모델 등이 모두 같은 2.0일이었으며 Briere 1 모델, Logan 6 모델 순으로 편차가 커졌다. 상기한 바와 같이 항온조건에서 월동난 발육 조사 결과를 바탕으로 추정된 발육 모델 중에 해석력이 가장 좋았던 모델은 Lactin 2 모델이었으나 야외 변온조건에서 실측된 50% 누적 부화일을 가장 편차가 적게 예측한 모델은 Poikilotherm rate 모델이었다. 월동난의 발육이 조사된 3개 지역 중 화성지역은 Briere 1 모델을 제외한 모든 모델들의 50% 부화 예측일이 실측일과 3일 이상 편차를 보여 다소 부정확하였는데 이는 분석에 사용된 온도 자료가 조사 지역의 실제 온도 자료를 대변해 주지 못하였기 때문이었을 것으로 추정하고 있으나 정확한 원인 규명을 위해서는 추후 보다 정밀한 실험이 요구될 것이다. 이상의 결과들을 종합해 볼 때 야외 포장에서 미국선녀벌레 월동난의 50% 부화일을 예측하는 방법은 Poikilotherm rate 모델



을 이용하여 4월 1일 이후 발육율을 누적하는 방법을 사용하는 것이 가장 정확할 것으로 보이나 복잡한 수식을 사용하지 않고 발육영점온도를 이용하여 유효적산 온도를 계산하는 방법으로 도 2일 이내의 오차로 추정이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 결과들을 활용하면 많은 지역에서 미국선녀벌레 부화 약충을 대상으로 한 방제 수단 동원 시기를 적절하게 추정할 수 있고 방제 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

본 연구는 농촌진흥청 시험연구사업 “외래해충 미국선녀벌레의 섭식생리, 이동생태 및 친환경적 방제 연구”(과제번호: PJ009338호)의 지원에 의하여 연구가 수행되었습니다. 조사에 많은 도움을 주신 윤미순 여사님께 감사드립니다.

## Literature Cited

- Alma, A., Ferracini, C., Burgio, G., 2005., Develonment of a sequential plan to evaluate *Neodryinus typhlocybae* (Ashmead) (Hymenoptera: Dryinidae) population associated with *Metcalfa pruinosa* (Say) (homoptera: Flatidae) infestation in Northwestern Italy. *Environ. Entomol.* 34, 819-824.
- Akotsen-Mensah, C., Boozer, R.T., Appel, A.G., Fadamiro, H.Y., 2011. Seasonal occurrence and development of degree-day models for predicting activity of *Conotrachelus nenuphar* (Coleoptera: Curculionidae) in Alabama peaches. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 104, 192-201.
- Bagnoli, B., Lucchi, A., 2000. Dannosita e misure di controllo integrato. In: Lucchi, A. (Ed.) *La Metcalfa negli ecosistemi italiani*. ARSIA Regione Toscana, Firenze, Italy, pp 65-88.
- Blomefield, T.L., Giliomee, J.H., 2014. Validation of the phenology model for the codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae), in South African pome fruit orchards. *Afr. Entomol.* 22, 30-48.
- Briere, J.F., Pracros, P., Le Roux, A.Y., Pierre, J.S., 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environ. Entomol.* 28, 22-29.
- CABI. 2007. Crop Protection Compendium (internet access at <http://www.cabicompendium.org/cpc/> (Sept. 9. 2010))
- Campbell, A., Frazer, B.D, Gilbert, N., Gutierrez, A.P., Markauer, M., 1974. Temperature requirements of some aphids and their parasites. *J. Appl. Ecol.* 11, 431-438.
- Ciampolini, M., dal Pane, M., Scaglia, M., 1995. *Metcalfa pruinosa*: piu problemi nella difesa delle colture frutticole. *L'Inf. Agar.* 51, 67-72.
- Curry, G.L., Feldman, R.M., Sharpe, P.J.H., 1978. Foundations of stochastic development. *J. Theor. Biol.* 74, 397-410.
- Dean H.H., Bailey, J.C., 1961. A flatid planthopper, *Metcalfa pruinosa*. *J. Econ. Entomol.* 54, 1104-1106.
- Evans, E.W., Carlile, N.R., Innes, M.B., Pitigala, N., 2014. Infestation of grain fields and degree-day phenology of the cereal leaf beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) in Utah: Long-term patterns. *J. Econ. Entomol.* 107, 240-249.
- Flint, M.L., Gouveia, P., 2001. IPM in practice: principles and methods of integrated pest management. University of California Press, Oakland, CA.
- Johnson, J.B., Omland, K. S., 2004. Model selection in ecology and evolution. *Trends Ecol. Evol.* 19, 101-108.
- Kim, Y.Y., Kim, M.Y., Hong, K.J., Lee, S.W., 2011. Outbreak of an exotic flatid, *Metcalfa pruinosa* (Say) (Hemiptera: Flatidae), in the capital region of Korea. *J. Asia Pac. Entomol.* 14, 473-478.
- 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., Wilson, S.W., 2010. First report of the nearctic flatid planthopper *Metcalfa pruinosa* (Say) in the Republic of Korea (Hemiptera: Fulgoroidea). *Entomological News* 121, 506-513.
- Logan, J.A., Wollkind, D.J., Hoyt, S.C., Tanigoshi, L.K., 1976. An analytical model for description of temperature dependent rate phenomena in arthropods. *Environ. Entomol.* 5, 1133-1140.
- Lucchi, A., 1994. The egg-burster of the flatid planthopper *Metcalfa pruinosa* (Say) (Homoptera, Fulgoroidea). *Proceedings of Entomological Society of Washington* 96(3), 548-552.
- Mead, F.W., 1969. Citrus flatid planthopper, *Metcalfa pruinosa* (Say) Homoptera: Flatidae. Florida Department of Agriculture, Division of Plant Industry, Entomology Circular No. 85. 2pp.
- Schoolfield, R.M., Sharpe, P.J.H., Mugnison, C.E., 1981. Nonlinear regression of biological temperature-dependent rate models based on absolute reaction-rate theory. *J. Theor. Biol.* 88, 719-731.
- Sharpe, P.J.H., DeMichele, D.W., 1977. Reaction kinetics of poikilotherm development. *J. Theor. Biol.* 64, 649-670.
- Strauss, G., 2010. Pest risk analysis of *Metcalfa pruinosa* in Australia. *J. Pest Sci.* 83, 381-390.
- SYSTAT software inc., 2002. TableCurve 2D Automated curve fitting analysis: version 5.01. Systat software. inc. San Jose, CA.
- Wagner, T.L., Wu, H., Sharpe, P.J.H., Coulson, R.N., 1984. Modeling distribution of insect development time: a literature review an application of Weibull function. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 77, 475-487.
- Wilson, S.W., Lucchi, A., 2000. Aspetti sistematici, corologici, ecologici. In: Lucci, A. (Ed.), *La Metcalfa negli ecosistemi italiani*. ARSIA Regione Toscana, Firenze, Italy, pp 13-28.
- Wilson, S.W., Lucchi, A., 2001. Distribution and ecology of *Metcalfa pruinosa* and associated planthoppers in North America (Homoptera: Fulgoroidea). *Attidell'Accad. Nazionale Ital. Entomolo., Rendiconti Anno XLIX*: 121-130.