

RCP8.5 기후변화 시나리오에 따른 애멸구 월동 개체군의 성충 발생시기 및 연간 세대수 변화 예측

정명표 · 박흥현¹ · 이상계¹ · 김광호^{1*}

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ¹국립농업과학원 농산물안전성부 작물보호과

Prediction of Adult Emergence Time and Generation Number of Overwintered Small Brown Planthopper, *Laodelphax striatellus* According to RCP8.5 Climate Change Scenario

Myung-Pyo Jung, Hong-Hyun Park¹, Sang-Guei Lee¹ and Kwang-Ho Kim^{1*}

Climate change & Agroecology Division, National Academy of Agricultural Science, Suwon, 441-853, Korea

¹Crop Protection Division, National Academy of Agricultural Science, Suwon, 441-853, Korea

ABSTRACT: Recently, climate change scenarios were substituted by the Special Report on Emission Scenarios (SRES) for Representative Concentration Pathway (RCP). Using the RCP scenario, the World Meteorological Organization (WMO) produced new climate change scenarios. Further, the National Institute of Meteorological Research (NIMR) of Korea produced new climate change scenarios for the Korean Peninsula. In this study, emergence time of small brown planthopper (SBPH), *Laodelphax striatellus* and the number of generations a year were estimated during climatic normal year (1981-2010) with previous studies and they were predicted during 2050s (2045-2054) and 2090s (2085-2094) by means of RCP8.5 climate change scenario. In comparison with 176.0±0.97 Julian data in the climatic normal year, the emergence time of overwintering SBPH was predicted to be 13.2±0.18 days (162.8±0.91 Julian date) earlier in 2050s and 32.1±0.61 days (143.9±1.08 Julian date) earlier in 2090s. The SBPH was expected to produce an additional 2.0±0.02 generations in 2050s and 5.2±0.06 generations in 2090s.

Key words: Climate change scenario, Representative Concentration Pathway (RCP), *Laodelphax striatellus*, Emergence time, Number of generation

초록: 최근 WMO는 온실가스 배출량 시나리오(SRES)를 대신하여 대표농도경로(RCP)를 바탕으로 새로운 기후변화 시나리오를 생산하였으며 기상연구소는 RCP 시나리오를 바탕으로 한반도의 새로운 기후변화 시나리오를 생산하였다. 본 연구에서는 과거 관측값을 바탕으로 평년(1981-2010)의 애멸구의 우화시기와 세대수를 추정하였으며, RCP 8.5 시나리오를 바탕으로 2020년대(2015-2024), 2050년대(2045-2054)와 2090년대(2085-2094) 애멸구의 우화시기와 세대수를 예측하였다. 평년 애멸구 월동 1세대수의 우화일인 176.0±0.97일과 비교하여 2050년대에서는 13.2±0.18일(162.8±0.91일), 2090년대에는 32.1±0.61일(143.9±1.08일) 앞당겨질 것을 예측되었다. 그리고 애멸구의 연간 세대수는 2050년대에서는 현재보다 2.0±0.02세대, 2090년대에는 5.2±0.06세대 증가할 것으로 예측되었다.

검색어: 기후변화 시나리오, 대표농도경로(RCP), 애멸구, 우화시기, 세대수

한반도의 기온은 1912-2010년 기간 동안 지구온난화와 도시화의 영향으로 1.8°C 상승하였으며, 같은 기간 강수량은 210 mm

증가하였다(NIMR, 2011). 이로 인해 최근 기후변화로 인한 농작물의 영향 평가 및 농작물 생산성에 미치는 연구들이 폭넓게 진행되고 있지만 농작물 병해충에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

기온은 냉혈생물인 곤충의 행동, 분포, 발육, 생존, 산란 등에 영향을 미치는 주요 환경 요인이다. 일반적으로 기온 상승은 곤충의 생물계절(phenology) 및 분포지역 변화, 개체군 성장률

*Corresponding author: ecomanager@korea.kr

Received November 13 2013; Revised November 15 2013

Accepted November 20 2013

변화, 세대수 증가, 활동가능시기 증가 등에 영향을 미친다 (Kiritani, 2006; Parmesan, 2007; Trnka et al., 2007). 이미 여러 곤충에서 봄철 월동 성충의 출현일이 당겨지는 현상이 빈번히 발견되고 있다(Collier et al., 1991; Sparks and Yates, 1997; Forister and Shapiro, 2003; Stefanescu et al., 2003; Kim and Lee, 2005; Kiritani, 2006).

벼줄무늬잎마름병(Rice stripe virus, RSV)을 매개하는 애벌레구(*Laodelphax striatellus*)는 국내에서 연 5세대 발생하며(Bae et al., 1995), 4령 약충으로 논둑이나 휴반에서 월동한다(Hyun et al., 1977). 애벌레구에 의한 피해는 줄무늬잎마름병 매개로 인한 2차 피해가 대부분이며, 흡즙에 의한 직접 피해는 매우 드물다. 줄무늬잎마름병 발병 억제를 위한 애벌레구의 개체군 연령구조, 증식에 관한 연구가 많이 수행되었다(Chung, 1974; Chon et al., 1975; Hyun et al., 1977; Bae et al., 1995). 최근 유아동 자료를 활용한 지역별 애벌레구 월동세대 성충우화일 변화 연구가 수행되었으며(Kim, 2009), 수리적 모형을 이용한 애벌레구 월동세대의 발육예측 연구가 수행되었다(Park et al., 2011). 그러나 미래의 기후조건 혹은 기후변화 시나리오에 따른 애벌레구 개체군의 발생 예측을 시도한 연구는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 최근 기상청에서 발표한 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 8.5 기후변화 시나리오를 바탕으로 지역별 애벌레구 월동 후 1세대의 성충 발육 및 연간 세대수 변화를 예측하였으며, 이를 통해 기후변화 시나리오에 따른 애벌레구 및 줄무늬잎마름병 조기 관리 방안 마련을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

기후자료의 수집

기후변화정보센터로부터 한반도 상세 RCP8.5 기후변화 시나리오를 제공받았으며, 이 자료를 이용하여 2000년, 2020년대(2015-2024년), 2050년대(2045-2054), 2090년대(2085-0094)의 지점별 평균기온, 일최대기온 및 일최저기온을 추출하였다.

발생일 및 세대수 예측

각 지점 1월 1일부터 6월 30일까지의 최고 및 최저온도를 바탕으로 Pedigo (2002)에 의해 제안된 유효적산온도(Degree-day, DD) 및 발육율적산(Poikilotherm rate) 모형(Park et al., 2011, Stinner et al., 1974)을 사용하여 전국 19개 지역의 애벌레구 월동 후 1세대의 성충우화일의 관측치와 예측치를 비교하였

으며, 우화일 관측치와 예측치간 차가 3일 이내의 지역을 선정하여 연대별 비교하였다. 애벌레구의 발육영점온도는 11.01°C, 산란전기장은 4일로 설정하였으며, 애벌레구 월동 후 1세대의 성충우화에 필요한 유효적산온도는 4령 유충에서 성충까지 발육에 필요한 109.7DD이다(Park et al., 2011). χ^2 -검정을 이용하여 애벌레구 성충우화일 관측치와 예측치간 비교하였으며, 2000년, 2020년대, 2050년대, 2090년대의 애벌레구 성충우화일은 ANOVA 분석을 통해 비교하였다. 모든 통계 분석은 SYSTAT 9.0을 이용하였다.

Pedigo에 의해 제안된 유효적산온도 계산법은 다음과 같다.

(1) 일최고기온(Max) 및 일최저기온(Min)이 발육하한온도(LT)보다 높고 발육상한온도(UT)보다 낮을 때, $DD = [(Max + Min) / 2] - LT$.

(2) 일최고기온이 발육영점온도보다 높고, 일최저기온이 발육영점온도보다 낮을 때, $DD = [(Max + LT) / 2] - LT$.

(3) 일최고기온이 발육상한온도보다 높고, 일최저기온이 발육하한온도보다 높을 때, $DD = [(UT + Min) / 2] - LT$.

(4) 일최고기온이 발육하한온도보다 낮을 때, 유효적산온도를 누적하지 않음

애벌레구의 연간 세대수 변화를 계산하기 위하여 Yamamura and Kiritani (1998)에 의해 제시된 아래의 함수를 사용하였다. 유효적산온도(K)는 알부터 성충까지 발육에 필요한 유효적산온도인 358.4DD로 설정하였다(Park et al., 2011).

$$\Delta N = \frac{\Delta T [206.7 + 12.45(m - T_0)]}{K} \quad (1)$$

여기서, N=세대수, T=평균 온도, m=연평균기온, T₀=발육영점온도, K=유효적산온도, n=발육기간(일)이다.

결과 및 고찰

곤충 발육 및 발생에 대한 정확한 예측은 효과적인 해충 관리를 위해 필수적이다. 이를 위해 유효적산온도를 이용한 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 해충의 발생을 예측하고 방제하는데 유효적산온도가 성공적으로 사용되고 있다(Herms, 2004).

유효적산온도와 발육율적산 모형을 이용하여 예측된 두 애벌레구 월동세대의 성충 우화일은 실제 관측일과 유의한 차이를 보이지 않았으며(유효적산온도: $\chi^2=223.25$, $df=200$, $p=0.2528$; 발육율적산 모형: $\chi^2=190$, $df=180$, $p=0.2903$), 두 예측일 모두 관측일과 유의한 양의 상관관계를 보였다(유효적산온도: $r=0.58$, $p=0.009$; 발육율적산 모형: $r=0.59$, $p=0.008$) (Fig. 1). 하지만

유효적산온도에 의한 예측일과 발육율적산 모형에 의한 예측일 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보였다($x^2=207.42$, $df=168$, $p=0.02079$). 두 방법 모두 철원, 서산, 부안, 수원, 원주, 춘천, 청주, 울진, 울산, 대구의 10개 지역에서는 실제 관측일보다 빨리 성충이 우화하는 것으로 예측되었으며, 나머지 9개 지역에서는 관측일보다 늦게 우화하는 것으로 예측되었다. Kim (2009)은 1967년부터 전국 9개 지점의 유아등 자료 분석을 통해서 애

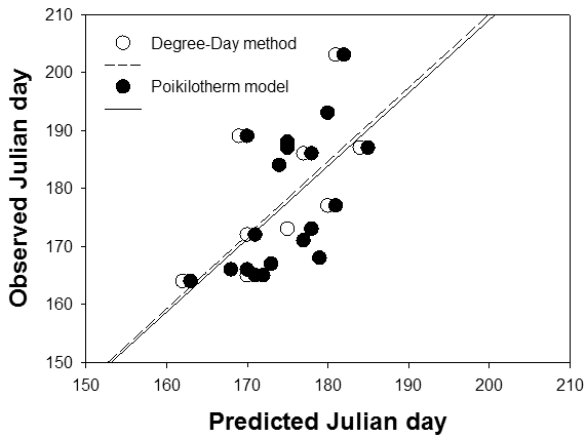


Fig. 1. Observed and predicted emergence date of overwintering *Laodelphax striatellus* adults at 19 regions. BA: Buan, BE: Boeun, CC: Chuncheon, CJ: Cheongju, CW: Cheolwon, DG: Daegu, GJ: Gwangju, HC: Hapcheon, HN: Haenam, JJ: Jinju, MY: Milyang, NW: Namwon, SS: Seosan, SW: Suwon, UiS: Uiseong, UJ: Uljin, US: Ulsan, WJ: Wonju, YD: Yeongdug.

멸구 발생 패턴을 남부형, 중부형, 중북부형으로 구분하면서 생태형의 존재 가능성을 언급하였다. 이와 같이 한 종의 지역간 발생패턴의 차이는 휴면타과 전·후의 생리적 발육의 차이 (Suenaga, 1963), 생태종의 존재(Chon et al., 1975; Kim, 2009)로 설명할 수가 있다.

RCP8.5 기후변화 시나리오에 따른 광주, 울산, 대구, 울진 4 지역의 애멸구의 월동 후 1세대 성충우화일은 지역간 앞당겨짐의 정도는 차이가 있었지만 연대별로 유의하게 앞당겨졌다 ($df=3$, $F=132.361$, $p<0.001$) (Table 1). 2020년대에는 울산(12일)과 울진(12일)이 애멸구 발생일 앞당겨짐 경향이 가장 뚜렷했으며, 2090년대에는 광주(65일)의 애멸구 발생일 앞당겨짐 경향이 가장 뚜렷하였다. Kim (2009)은 국내에서 1967년부터 2005년까지 국내 9개 지점의 평균온도가 1.1℃ 상승하는 동안 애멸구 월동 후 1세대 성충의 우화일이 남부지역에서는 7.6일, 중부지역에서는 9.5일, 북부지역에서는 3.7일 빨라졌다고 보고하였다.

애멸구의 세대수는 평균기온이 1℃ 상승할 때 약 0.9세대 증가하였으며, RCP8.5 기후변화 시나리오에 따른 애멸구의 세대수는 2050년대에는 2.0 ± 0.02 세대 증가하여 연 6-7세대 발생할 것으로 예측되었으며, 2090년대에는 5.2 ± 0.06 세대 증가하여 연 9-10세대 발생할 것으로 예측되었다(Table 2). 본 연구 결과는 일본에서 평균기온이 2℃ 상승하였을 때 멸구류 3종의 세대수가 1.6세대 증가할 것이라는 결과와 유사하였다(Kiritani, 2006).

Table 1. Predicted average emergence date (Julian date) of *Laodelphax striatellus* according to year

Regions	2000	2020s	2050s	2090s
Gwangju	155	150	140	114
Ulsan	158	146	139	107
Daegu	153	144	136	109
Uljin	171	159	155	120
Mean±SE	159.3±0.95a	149.8±0.78b	142.5±1.00c	106.5±1.46d

Mean values followed by the different letter are significantly different for ANOVA with Tukey's test ($p>0.05$).

Table 2. Increase in number of generations of *Laodelphax striatellus* under climate change scenarios

Climate change scenarios	Increase in no. of generations
a 1℃ increase in mean temperature	0.93±0.011
a 2℃ increase in mean temperature	1.85±0.021
a 3℃ increase in mean temperature	2.79±0.032
The year of 2020s under RCP8.5	0.48±0.02
The year of 2050s under RCP8.5	1.15±0.04
The year of 2090s under RCP8.5	2.77±0.05

Acknowledgements

This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development” and “Evaluation of impact on the essential problem according to the new scenario of climate change (PJ009394)” Project of National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

Literature Cited

- Bae, S.D., Song, Y.H., Park, K.B., 1995. Study on the bionomics of overwintering small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* Fallen, in Milyang. Korean J. Appl. Entomol. 34, 321-327 (in Korean with English abstract).
- Chon, T.S., Hyun, J.S., Park, C.S., 1975. A study on the population dynamics of overwintered small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* (Fallen). Korean J. Entomol. 5, 21-32 (in Korean with English abstract).
- Chung, B.J., 1974. Studies on the occurrence, host range, transmission, and control of rice stripe disease in Korea. Korean J. Plant Protec. 181-204 (in Korean with English abstract).
- Collier, R. H., Finch, S., Phelps, K., Thompson, A.R., 1991. Possible impact of global warming on cabbage root fly (*Delia radicum*) activity in the UK. Ann. Appl. Biol. 118, 261-271.
- Forister, M.L., Shapiro, A.M., 2003. Climatic trends and advancing spring flight of butterflies in lowland California. Global Change Biol. 9, 1130-1135.
- Herms, D.A., 2004. Using degree-days and plant phenology to predict pest activity, in: Krischik, V., Davidson, J. (Eds.), IPM (Integrated Pest Management) of Midwest Landscapes. Minnesota Agricultural Experiment Station Publication, Minnesota, pp. 49-59.
- Hyun, J.S., Woo, K.S., Ryoo, M.I., 1977. Studies on the seasonal increase of the population of the smaller brown planthopper, *Laodelphax striatellus* (Fallen). Korean J. Plant Protec. 16, 13-19 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.S., Lee, J.-H., 2005. The effects of elevated temperatures on the population dynamics of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae): a simulation study. 2005 Proceedings of The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology, The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology, 63-66.
- Kim, K.-H., 2009. Study on change in 50% light trap catch dates for the 1st generation of the Small Brown Planthopper, *Laodelphax striatellus* Fallen In Korea. A thesis for the degree of doctor of philosophy. Seoul National University (in Korean with English abstract).
- Kiritani, K., 2006. Predicting impacts of global warming on population dynamics and distribution of arthropods in Japan. Popul. Ecol. 48, 5-12.
- NIMR (National Institute of Meteorological Research), 2011: Report on climate change scenarios for IPCC AR5, National Institute of Meteorological Research.
- Park, C.-G., Park, H.-H., Kim, K.-H., 2011. Temperature-dependent Development Model and Forecasting of Adult Emergence of Overwintered Small Brown Planthopper, *Laodelphax striatellus* Fallen, Population. Korean J. Appl. Entomol. 50, 343-352 (in Korean with English abstract).
- Parmesan, C., 2007. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. Global Change Biol. 13, 1860-1872.
- Pedigo, L.P., 2002. Entomology and pest management (4th ed.). Prentice Hall, 742pp.
- Suenaga, H., 1963. Analytical studies on the ecology of two species of planthoppers, the whitebacked planthopper (*Sogatia furcifera* Horváth) and the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål.), with special reference to their outbreaks [in Japanese, English summary]. Bull. Kyushu Agric. Exp. Stn. 8:1-152.
- Sparks, T.H., Yates, T.J., 1997. The effect of spring temperature on the appearance dates of British butterflies 1883-1993. Ecography 20, 368-374.
- Stefanescu, C., Peñuelas, J., Filella, I., 2003. Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. Global Change Biol. 9, 1494-1506.
- Stinner, R.E., Gutierrez, A.P., Butler Jr., G.D., 1974. An algorithm for temperature-dependent growth rate simulation. Can. Entomol. 106, 519-524.
- Trnka, M., Muška, F., Semerádová, D., Dunrovský, M., Kocmánková, E., Žalud, Z., 2007. European corn borer life stage model: Regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate. Ecol. Model. 207, 61-84.
- Yamamura, K., Kiritani, K., 1998. A simple method to estimate the potential increase in the number of generations under global warming in temperate zones. Appl. Entomol. Zool. 33, 289-298.