

돼지풀잎벌레의 섭식에 의한 생태계교란 식물인 단풍잎돼지풀의 제어 가능성 연구

이수인* · 박재훈** · 김의주** · 박지원** · 이정민** · 김윤서** · 김세희** · 박여빈** · 이응필****

*국립생태원 외래생물팀

**공주대학교 생명과학과

***국립생태원 자연환경조사팀

A Study on Control Possibility of *Ambrosia trifida* L., an Invasive Alien Plant by the Feeding of *Ophraella communa* LeSage

SooIn Lee* · JaeHoon Park** · EuiJoo Kim** · JiWon Park** · JungMin Lee** · YoonSeo Kim** · SeHee Kim**
· Yeobin Park** · EungPill Lee****

*National Invasive Alien Species Team, National Institute of Ecology, Korea

**Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea

***National Ecosystem Survey Team, National Institute of Ecology, Korea

(Received : 31 July 2023, Revised : 16 August 2023, Accepted : 16 August 2023)

요약

한국에서 생태계교란 식물인 단풍잎돼지풀의 효과적인 관리방안을 마련하고자, 초식자인 돼지풀잎벌레의 기주특이성, 연간 이동거리를 조사하여 생물학적 방제 수단으로의 활용 가능성과 이 곤충의 섭식이 단풍잎돼지풀의 활력에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해서 돼지풀잎벌레의 기주선호도를 조사하였고, 돼지풀잎벌레가 확인된 지점을 기준으로 거리가 10m, 20m, 30m, 100m 떨어진 지점에 돼지풀잎벌레가 없는 단풍잎돼지풀군락을 선정하여 돼지풀잎벌레의 출현 여부 파악을 통해 이들의 이동 거리를 확인하였다. 그리고 돼지풀잎벌레의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생육, 번식 그리고 생리반응을 측정하였다. 그 결과 돼지풀잎벌레는 국화과의 3분류군만을 섭식하였고, 숙주로부터 반경 30m/yr 이내로 단거리 이동하였다. 초식자의 섭식은 단풍잎돼지풀의 생육, 번식 그리고 생리반응에 부정적인 영향을 주었고, 초식자가 있는 곳으로부터 거리가 멀어질수록 생육 및 번식이 양호하였다. 또한, 단풍잎돼지풀의 식피율이 50% 이하일 때 초식자를 도입하면 90% 이상의 단풍잎돼지풀을 제어할 수 있었지만, 식피율이 90% 이상에서는 제거의 효과가 감소했다. 결과적으로 돼지풀잎벌레는 단풍잎돼지풀의 생태학적 제어자로서 활용 가능성이 있고, 제어의 효과를 높이기 위해서는 단풍잎돼지풀의 식피율이 낮은 봄(5월)에 이 곤충을 도입하는 것이 유리하다.

핵심어 : 생물학적 방제, 기주특이성, 생태계교란식물, 초식자

Abstract

To develop an effective management plan for *Ambrosia trifida* L., an invasive alien plant in Korea, we assessed the potential of *Ophraella communa* LeSage as a biological control agent. This involved investigating the host specificity of the herbivore *Ophraella communa* LeSage, its annual travel distance, and the impact of this insect

*To whom correspondence should be addressed.

Team of National Ecosystem Survey, National Institute of Ecology, Korea

E-mail: lyp2279@naver.com

- SooIn Lee National Invasive Alien Species Team, National Institute of Ecology, Korea/Associate Researcher(ecolove093@nie.re.kr)
- JaeHoon Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Researcher(kn5314@smail.kongju.ac.kr)
- EuiJoo Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Researcher(euijoo@kongju.ac.kr)
- JiWon Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Researcher(ecopark@kongju.ac.kr)
- JungMin Lee Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Researcher(ljm@smail.kongju.ac.kr)
- YoonSeo Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Researcher(201502761@smail.kongju.ac.kr)
- SeHee Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Researcher(ksh41631@smail.kongju.ac.kr)
- Yeobin Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Researcher(pyb1994@smail.kongju.ac.kr)
- EungPill Lee National Ecosystem Survey Team, National Institute of Ecology, Korea/Researcher(lyp2279@naver.com)

on the fitness of *Ambrosia trifida* L. We confirmed the host plant preference of *Ophraella communa* LeSage. The travel distance of this insect was determined by monitoring its appearance in selected *Ambrosia trifida* L. communities without these insects at distances of 10, 20, 30, and 100 meters, based on the locations where the presence of *Ophraella communa* LeSage was observed. The growth, reproductive, and physiological responses of *Ambrosia trifida* L. were measured according to feeding by *Ophraella communa* LeSage. As a result, *Ophraella communa* LeSage fed on only three taxa and moved short distances within a radius of 30 m per year from the host. The feeding behavior of the herbivore had a negative impact on the growth, reproductive, and physiological responses of *Ambrosia trifida* L. And the plant's growth and reproduction improved with increasing distance from the herbivore. Furthermore, the introduction of herbivores was able to control over 90% of *Ambrosia trifida* L. when the coverage of the *Ambrosia trifida* L. group was below 50%. However, the effectiveness of the removal decreased when the coverage exceeded 90%. These results are likely to be utilized by *Ophraella communa* LeSage as an ecological control agent. It is advantageous to introduce them in spring (May) when the coverage is low to maximize the effectiveness of control.

Key words : Biological Control, Host Specificity, Invasive Alien Plant, Herbivore

1. 서 론

최근 인구증가, 환경을 변화시키는 인간의 활동 증가, 국가 간의 거래 등의 증가로 외래생물의 유입과 확산이 증가하고 있다(Pimentel et al., 2001; Hulme, 2009). 이러한 외래생물의 침입은 생물다양성과 생태계 안정성에 대한 주요 위협요인 중 하나이며, 막대한 환경피해와 경제적 손실을 초래한다(Wilcove et al., 1998; Pimentel et al., 2000; Pimentel et al., 2001). 이러한 이유로 전 세계적으로 침입외래생물을 관리하고자 노력하고 있다.

현재 국내에서는 자연생태계의 균형을 교란하거나 교란할 우려가 있는 생물을 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」에 따라 생태계교란 생물로 지정하여 관리하고 있다. 2022년 10월 기준으로 동물과 식물을 포함해 총 1속 36종이 지정되어 있고, 이중 생태계교란 식물은 17종이 지정되어 있다(Korean Law Information Center, 2023). 국내에서는 생태계교란 식물에 관한 초기 연구는 주로 분포조사, 개체군 모니터링이 대부분이었으나, 최근에는 효과적인 관리방안 마련을 위한 연구가 증가하고 있다.

방제 기술은 인간에 의한 물리적 방제와 화학적 방제가 주로 이루어지고 있는데, 물리적 방제는 일시적이며 다시 종자로 인해 식물이 자라나는 등 문제가 있고, 화학적인 방제는 빠른 시간 내에 식물체를 죽일 수 있지만, 인간과 생태계에 2차 피해가 발생할 수 있다는 문제점이 있다(Choi, 2017; Hershenhorn et al., 2016). 이러한 한계점을 인식한 여러 국가에서는 곤충을 이용한 생물학적 방제 연구를 시도하였고, 특히 중국에서는 환경잡초인 부레옥잠의 생물학적 방제 종으로 남미산 물바구미류 2종을 선정 한 후 대량 사육 기술을 개발하여 성공적으로 방제하였다(Aguilar et al., 2003). 이처럼 성공적인 방제는 포식자가 피식자를 낮고 안정된 평형으로 유도하는 결과이고, 특정 생물을 이용하여 잡초 등을 방제하는 방법인 생물학적 방제는 방제법이 간단하고, 비용이 저렴하다는 장점이 있다(Krebs, 1972). 하지만, 생물학적 방제를 위해 사용하는 곤충은 방제 대상 식물을 제외한 작물이나 식물을 섭식하지 않는 기

주특이성을 확보하는 것이 중요하다(Lee et al., 2007).

단풍잎돼지풀(*Ambrosia trifida* L.)은 북아메리카 원산의 국화과(Asteraceae) 한해살이초본으로 국내에서는 경기도와 강원도 일대에 집중 분포하고 있으며, 낙동강 하류변까지 널리 확산하여 제주도를 제외한 전국에 분포하고 있다(National Institute of Ecology, 2021). 국내 주요 하천을 중심으로 대단위 군락을 형성하고 있고, 높은 종자의 발아율과 타감 물질 등을 통해 국내 자생식물의 성장을 억제해 생물다양성을 감소시키고 있다(Lee et al., 2010; Park et al., 2017; Ryu et al., 2017). 또한, 단풍잎돼지풀은 생태계 뿐만 아니라 인간에게도 피해를 미치는데 꽃가루에 알레르기 유발 물질을 함유하며 인간에게 건초열을 유발하고 있다(Kim et al., 2021). 이러한 위해성으로 자생지인 미국 일부 지역에서조차 유해 잡초로 분류되고(Center for Agriculture and Bioscience International, 2016), 인접 국가인 중국과 일본에서는 침입외래식물로 분류되어 관리하고 있다(Miyatake and Ohno, 2010; Hao and Ma, 2023).

단풍잎돼지풀을 섭식하는 곤충으로는 돼지풀잎벌레(*Ophraella communa* LeSage)가 있다. 돼지풀잎벌레는 침입외래식물인 단풍잎돼지풀, 돼지풀 등을 주로 섭식하므로 국외에서는 이러한 특성을 활용한 생물학적 방제 방법이 주목받고 있다(Yamazaki et al., 2000; Zhou et al., 2014; Schaffner et al., 2020).

국내에서도 외래종인 돼지풀잎벌레의 비의도적인 유입 이후에 국내 분포현황과 생태특성(Sohn et al., 2002; Na et al., 2008) 그리고 돼지풀속(*Ambrosia*)의 단풍잎돼지풀과 돼지풀의 생물학적 방제를 위한 곤충으로서 돼지풀잎벌레의 활용 가능성 및 기주특이성(Lee et al., 2007; Na et al., 2008; Kim et al., 2017)에 대한 연구가 진행되었다. 하지만, 돼지풀잎벌레를 생물학적 방제의 수단으로 활용하는 연구는 수행되었으나, 기존의 연구에서는 돼지풀잎벌레의 기주식물 확인은 작물 위주로 수행되었고, 그 밖에 기주 식물에 대해서는 국외 문헌에 의존하고 있다. 또한, 국내에서 돼지풀잎벌레의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생육 반응

변화에 관한 연구는 Lee et al.(2007)에 의해 연구된 것이 전부이다.

따라서 본 연구에서는 돼지풀잎벌레의 기주식물을 조사하고, 이 곤충의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생리·생태학적 반응을 확인하여 단풍잎돼지풀의 생물학적 제어 가능성을 확인함으로써 효과적인 생물학적 제어 방법을 도출하고자 하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 돼지풀잎벌레의 기주 선호도 조사

2.1.1. 돼지풀잎벌레의 국내 분포 및 특성

돼지풀잎벌레는 국화잎벌레속(*Ophraella*)으로 이 속에는 전 세계적으로 13종이 보고되어 있으며(LeSage, 1986), 우리나라에는 현재 돼지풀잎벌레 한 종이 분포하고 있다(National Institute of Biological Resources, 2022). 돼지풀잎벌레는 북미 원산이며, 캐나다, 일본, 대만, 한국에 분포하고 있다(National Institute of Environmental Research, 2010). 국내에서는 2000년에 대구 화원유원지에서 처음 발견되었고, 현재 제주도를 포함한 전국에 확산하여 분포하고 있는 외래종으로 최초 유입 시기는 알려지지 않았다(Sohn et al., 2002; National Institute of Environmental Research, 2010).

돼지풀잎벌레는 노란색의 난형의 알을 기주식물의 잎에 난괴로 부착시키며, 유충은 체장이 5~7mm이고, 1년에 4~5회 발생하는 다화성으로 유충은 바깥쪽에 흑갈색의 불규칙한 고치를 만들어 용화한다(Emura, 1999; Sohn et al., 2002; National Institute of Environmental Research, 2010). 그리고 성충의 체장은 4~7mm이고, 성충으로 월동을 하며(Sohn et al., 2002; National Institute of Environmental

Research, 2010), 주로 돼지풀과 단풍잎돼지풀을 기주식물로 하며 잎과 줄기의 섭식을 통해 식물의 생육피해를 준다(Takizawa et al., 1999; Yamazaki et al., 2000; National Institute of Environmental Research, 2010). 국내에서 돼지풀잎벌레는 기후변화로 인한 고온 현상에 따른 돼지풀잎벌레 생활사 주기의 변화와 기주식물인 돼지풀과 단풍잎돼지풀이 전국적으로 확산하면서 함께 확산한 것으로 알려져 있다(National Institute of Environmental Research, 2010). 현재까지는 국내 자연 상태에서 천적에 의해 유충과 성충이 포식당해 생태계 균형이 이루어지고 있으며, 사람에게는 큰 위해성이 없고, 경작지 등의 피해는 거의 없다고 알려져 있으나, 국내 연구진들은 기후변화로 인해 개체가 급증해 기주식물을 포함한 주변 식물에도 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 개체의 분포에 대한 지속적인 조사와 생물학적 방제의 수단으로 활용하기 위해서는 더 많은 연구가 수행되어야 한다고 말하고 있다(Sohn et al., 2002; Lee et al., 2007; National Institute of Environmental Research, 2010; Kim et al., 2017).

중국 그리고 이탈리아, 스위스 등의 유럽에서는 돼지풀의 효과적인 생물학적 방제의 방법으로 비의도적으로 자국에 유입된 외래종인 돼지풀잎벌레를 활용하였고, 제어 가능성을 확인하였다(Guo et al., 2011; Müller et al., 2014). 이처럼 돼지풀잎벌레를 활용한 돼지풀의 생물학적 방제의 국외 사례들이 보고된 바 있으며, 국외 사례를 바탕으로 돼지풀잎벌레를 활용한 돼지풀과 단풍잎돼지풀의 생물학적 방제의 가능성을 열어두었다(Lee et al., 2007; Na et al., 2008; Kim et al., 2017; Kim and Lee, 2019).

2.1.2. 기주 선호도 조사

기주 선호도는 충남 공주시의 공주대학교 주변과 금강수계의 분류와 지류 내 제방의 둔치에서 식물상 조사를 통해

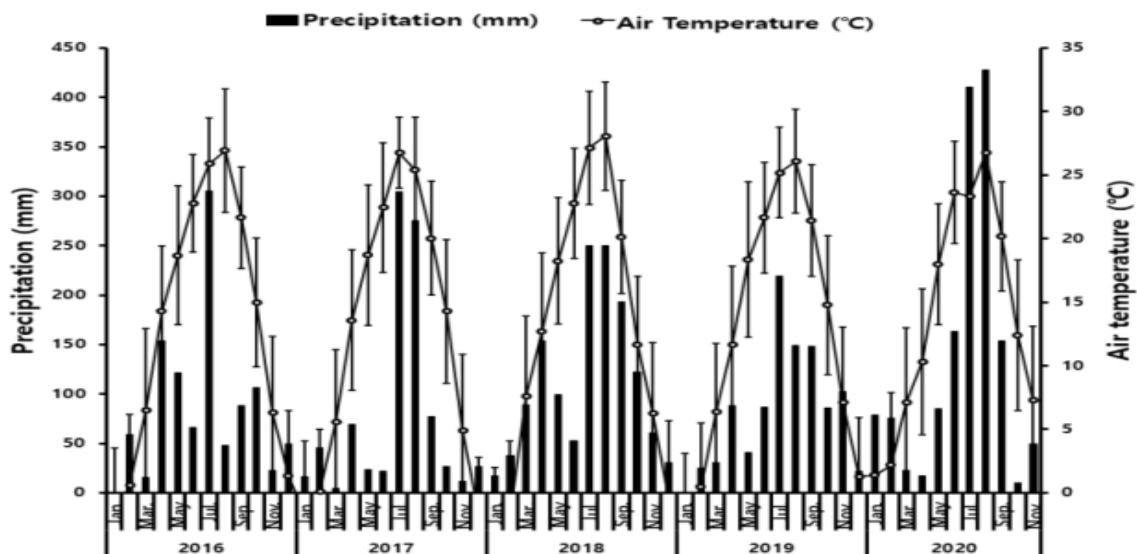


Fig. 1. Seasonal precipitation (mm) and air temperature (°C) from January 2016 to December 2020 at Gongju disaster prevention weather observation from the study area.

돼지풀잎벌레의 기주식물을 조사하였다. 기주식물은 식물체에 돼지풀잎벌레의 성충과 유충이 각각 3마리 이상이 있고, 잎과 줄기 등의 섭식 유무로 판단하였다. 조사지역 내 도로로 이동하면서 식물상을 조사하였고, 출현한 식물상은 과별로 정리하여 목록화하였다. 기주 선호도 조사는 돼지풀잎벌레의 생활사 시기를 고려하여 3월부터 10월까지 5년 동안(2016년~2020년) 진행하였고, 과별 기주식물에 대한 선호도는 전체 출현식물종 목록에서 돼지풀잎벌레가 기생하는 식물종을 과별로 정리하였다. 조사기간 동안 연평균 기온은 12.9℃, 연 강수량은 1,158.9mm이었다(Fig. 1).

2.2 환경요인별 생리·생태학적 반응 측정

2.2.1 돼지풀잎벌레의 이동거리에 따른 단풍잎돼지풀의 생육 및 번식반응

일본에서 돼지풀잎벌레 성충의 수컷과 암컷은 23 시간 동안 각각 21.4 km, 25.4 km를 비행하고, 연간 77 km를 이동하기도 한다고 보고하였다(Yamamura et al., 2007; Tanaka and Yamanaka, 2009). 그러나 곤충들의 비행거리는 주변의 환경요인들에 의해 달라질 수 있으며(Tanaka and Yamanaka, 2009; Stowe et al., 2022), 중국에서 돼지풀잎벌레는 기주식물로 잘 알려진 돼지풀이 생육하는 곳을 따라 강한 분산성을 가진다고 보고하였다(Jin et al., 2023). 따라서 돼지풀잎벌레의 기주식물인 단풍잎돼지풀이 분포하고 있는 곳에서 돼지풀잎벌레의 이동거리를 확인하고, 돼지풀잎벌레가 단풍잎돼지풀의 생육 및 번식반응에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 2020년 5월부터 10월까지 온도와 강수량 등 환경조건이 동일한 공주대학교 내 산림의 임연부에서 돼지풀잎벌레가 서식하고 있는 단풍잎돼지풀군락을 기준(control point, C.P)으로 거리가 10m, 20m, 30m, 100m 떨어진 돼지풀잎벌레가 없는 단풍잎돼지풀군락에 각각 1m × 1m 크기의 정사각형 모양의 방형구를 설정하였다.

2020년 9월에 각 방형구 내 모든 개체의 개체당 돼지풀잎벌레(성체와 유생의 합)의 수(ea), 단풍잎돼지풀의 지상부 길이(cm), 잎의 피해율(%), 개체당 꽃대의 수(ea)를 측정하였다. 잎의 피해율은 개체 전체 잎의 면적 대비 섭식한 잎의 면적으로 추정하였다. 연구기간 동안 월평균 기온은 20.7℃, 월평균 강수량은 208.4 mm이었다(Fig. 1).

2.2.2 돼지풀잎벌레의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생리반응

돼지풀잎벌레의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생리반응의 차이를 확인하기 위해 2017년 8월에 온도와 강수량 등 환경조건이 동일한 공주대학교 내 산림의 임연부에서 크기가 1m × 1m로 동일한 돼지풀잎벌레가 없는 단풍잎돼지풀군락(대조구)과 돼지풀잎벌레가 있는 단풍잎돼지풀군락(처리구)을 설정하였다. 대조구와 처리구에서 개체당 돼지풀잎벌레(성체와 유생의 합)의 수는 각각 1.2±1.9ea, 5.2±2.7ea 이었고(Fig. 2), 연구기간 동안 일평균 기온은

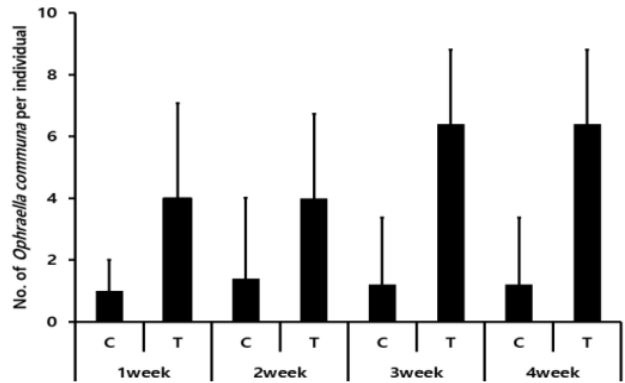


Fig. 2. Variation of the number of *Ophraella communa* LeSage (sum of adult and larva) per individual under control and treatment in August (C: control, T: treatment).

23.4℃, 월강수량은 282.5mm이었다(Fig. 1).

2017년 8월 말에 각 방형구에서 단풍잎돼지풀의 엽록소 함량(mg·m⁻²)과 광계 II의 광화학적 이용효율(Photochemical efficiency of photosystem, Fv/Fm)을 측정하였다.

엽록소함량은 식물의 광합성에 필요한 엽록소를 얼마나 생산했는지 알아보기 위해 측정하고자 하였으며, 엽록소함량측정기(CCM-300, Chlorophyll Content Meter, OPTI-SCIENCES)를 이용하여 오후 2 시에서 4 시 사이에 측정하였다. 엽록소함량의 단위인 CCI(Chlorophyll content index)는 잎에 940nm와 660nm의 광을 조사하여 두 광의 흡수율을 비교함으로써 엽록소함량을 비파괴적인 방법으로 정량화한 단위이다(Richardson et al., 2002).

엽록소형광(Fv/Fm)은 광계 II의 광화학적 효율 및 식물의 광스트레스 반응과 관련이 있으므로 오후 2 시에서 4 시 사이에 측정하여 분석하였다. 측정 시, 단풍잎돼지풀의 잎을 20분 동안 암적응을 시킨 후(Maxwell and Johnson, 2000), 엽록소형광측정기(OS-30p, Continuous source chlorophyll fluorometer, OPTI-SCIENCES)를 이용하여 660nm 파장을 가진 광을 일시적으로 가하여 나타나는 광계 II의 광화학적 효율(Fv/Fm)을 알아보았다.

2.2.3 단풍잎돼지풀의 식피율에 따른 돼지풀잎벌레의 섭식률

단풍잎돼지풀의 식피율에 따른 돼지풀잎벌레의 섭식률을 파악하기 위해 2018년 5월부터 8월까지 온도와 강수량 등 환경조건이 동일한 공주대학교 내 산림의 임연부에서 돼지풀잎벌레가 서식하고 있는 단풍잎돼지풀군락 내 식피율을 10%(Low Coverage), 50%(Middle Coverage), 90%(High Coverage)로 구분하여 1m × 1m 크기인 정사각형 모양의 방형구를 설정하였다. 2018년 5월에 방형구 설정 시 방형구별 단풍잎돼지풀의 전체 개체의 수와 단풍잎돼지풀 개체의 지상부 길이(cm), 줄기 직경(cm), 잎의 수(ea), 잎몸 길이(cm), 잎 폭 길이(cm)는 Table 1과 같았다.

Table 1. Comparison of ecological character per individual of *Ambrosia trifida* L. measured under coverage rate gradients (Low: coverage rate 10%, Middle: coverage rate 50%, High: coverage rate 90%). Alphabets on the bars mean significant difference among environmental treatments ($p < 0.05$).

Character	Coverage gradients		
	Low (N=38)	Middle (N=35)	High (N=28)
Shoot length (cm)	79.5±18.6 ^b	85.9±16.0 ^b	101.8±21.6 ^a
Stem diameter (cm)	0.3±0.1 ^b	0.3±0.1 ^b	0.7±0.2 ^a
No. of leaves (ea)	9.7±3.8 ^b	9.1±2.8 ^b	29.2±15.9 ^a
Leaf width length (cm)	1.2±3.1 ^b	1.2±3.5 ^b	12.2±4.3 ^a
Leaf lamina length (cm)	1.6±4.3 ^b	1.5±3.8 ^b	14.8±4.7 ^a

2018년 6월에 각 방형구 내 모든 개체의 잎의 섭식률(%)을 측정하였고, 잎의 섭식률은 개체 전체 잎의 면적 대비 섭식한 잎의 면적으로 추정하였다. 그리고 각 방형구 내 단풍잎돼지풀의 고사율(%)은 6월 중순과 7월 중순 그리고 8월 중순에 총 3회 측정하였고, 고사율(%)은 방형구 내 전체 개체의 수(ea) 대비 고사한 개체의 수(ea)를 통하여 산출하였다. 개체의 고사는 돼지풀잎벌레의 섭식으로 잎이 남아 있지 않고 줄기가 말라버렸거나 개체의 잎이 남아 있으나 남아 있는 잎과 줄기가 말라버린 경우로 판단하였다. 연구기간 동안 월평균 기온은 24.1°C, 월평균 강수량은 163.1 mm이었다(Fig. 1).

2.3 통계분석

측정한 자료의 정규분포 여부를 확인하기 위해 Kolmogorovsmirnov test를 실시하였고, 정규분포를 따르지 않아($p < 0.05$) 비모수 통계분석(nonparametric analysis)을 사용하였다. 각 환경 구배별 차이의 유의성은 Kruskal-Wallis test의 사후검정(post-hoc)을 실시하여 확인하였다(No and Jeong, 2002).

이상의 통계적인 분석은 STATISTICA 7(Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 돼지풀잎벌레의 기주식물과 산란습성

조사지역 내 출현한 식물상은 107과 542분류군이었다(Table 2). 출현한 분류군의 과는 국화과(11.6%), 벼과(10.7%), 콩과(7.6%) 순으로 높았고, 나머지 104과는 속한 분류군이 5% 이하였다(Table 2). 출현식물 중 돼지풀잎벌레가 섭식하는 식물은 국화과의 3분류군에서 섭식이 확인되었고, 나머지 106과에 속하는 분류군에서는 섭식이 확인되지 않았다.

돼지풀잎벌레의 기주식물은 단풍잎돼지풀(*Ambrosia trifida* L.), 돼지풀(*Ambrosia artemisiifolia* L.), *Ambrosia psilostachya* DC., *Ambrosia integrifolia* Fern, 도꼬마리(*Xanthium strumarium* L.), 큰도꼬마리(*Xanthium canadense* var. *glabratum*), 가시도꼬마리(*Xanthium italicum* More), 돼지풀아재비(*Parthenium hysterophorus* L.), *Ambrosia confertiflora* DC., *Ambrosia cumanensis* von Humbolt, *Iva axillaris* Persh, *Xanthium strumarium* L. *Helianthus ciliaris* DC., *Ratibida pinnata* (Vent.), 돌콩(*Glycine soja* Sieb. et Zucc.), 깨풀(*Acalypha australis* L.), 환삼덩굴(*Humulus japonicus* Sieboid & Zucc.) 등 18종으로 알려져 있다(Takizawa et al., 1999; Zhang et al., 2005; Miyatake and Ohno, 2010; Futuyama, 1990; Palmer and Goeden, 1991; Funk et al., 1995; Lee et al., 2007; Emura, 1999; National Institute of Environmental Research, 2010; Kim et al., 2017).

본 연구의 기주 선호도 조사에서 출현식물 중 돼지풀잎벌레가 섭식하는 식물은 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 뽕단지 등 총 3개의 분류군이었고(Table 2), 이는 기존의 보고와 유사하였다(Lee et al., 2007; Kim et al., 2017). 본 연구에서 돼지풀잎벌레는 생태계교란 식물인 단풍잎돼지풀과 돼지풀에서 산란뿐만 아니라 유충 및 성충의 전 생활사가 잎에서 이루어졌지만, 재배식물인 뽕단지에서는 섭식만 하였고, 산란은 이루어지지 않았다. 하지만, 단풍잎돼지풀, 돼지풀, 뽕단지에서 모두 모든 생육단계가 동시에 발견되는 다화성인 것을 확인하였다(Sohn et al., 2002).

이처럼 생물학적 방제를 위해 사용하는 곤충은 방제대상 식물을 제외한 작물이나 식물을 섭식하지 않는 것이 중요하다(Lee et al., 2007). 돼지풀잎벌레는 해바라기(*Helianthus annuus*)와 같은 재배식물을 섭식하고 있는 실정이고(Palmer and Goeden, 1991; Emura, 1999; Kim et al., 2017), 본 연구에서는 재배식물인 뽕단지(*Helianthus tuberosus*)의 섭식도 확인이 되었다. 하지만, 뽕단지는 다른 재배식물과 같이 기주식물로 선택하는 경우는 적었고, 주로 성충 단계에서 뽕단지의 잎을 섭식하였는데 피해는 미비하였다.

3.2 환경요인별 단풍잎돼지풀의 생리·생태학적 반응

3.2.1 돼지풀잎벌레의 이동거리에 따른 단풍잎돼지풀의 생육 및 번식반응

돼지풀잎벌레의 이동거리에 따른 단풍잎돼지풀의 생육 반응에서 지상부 길이는 30m와 100m가 다른 구배보다 길었고, 기준점(C.P)과 10m에서 짧았다(Fig. 3, a). 그리고 번식반응에서 개체당 꽃대의 수는 30m와 100m가 다른 구배보다 많았고, 기준점(C.P)에서는 가장 적었다(Fig. 3, c). 잎의 피해율과 개체당 돼지풀잎벌레(성충과 유충의 합)의 수는 기준점(C.P)이 다른 구배보다 가장 많았고,

Table 2. The plant list of family preference of *Ophraella communa* LeSage

Family Name	Number of species		Rate (%)	Family Name	Number of species		Rate (%)
	Appeared plant	Host plant			Appeared plant	Host plant	
Equisetaceae	4	-	0	Juglandaceae	3	-	0
Dennstaedtiaceae	1	-	0	Geraniaceae	3	-	0
Dryopteridaceae	1	-	0	Lythraceae	3	-	0
Ginkgoaceae	1	-	0	Onagraceae	4	-	0
Cupressaceae	2	-	0	Anacardiaceae	3	-	0
Pinaceae	9	-	0	Simaroubaceae	1	-	0
Taxaceae	1	-	0	Rutaceae	4	-	0
Nymphaeaceae	1	-	0	Sapindaceae	1	-	0
Schisandraceae	1	-	0	Aceraceae	5	-	0
Chloranthaceae	1	-	0	Hippocastanaceae	1	-	0
Magnoliaceae	1	-	0	Malvaceae	2	-	0
Lauraceae	1	-	0	Tiliaceae	1	-	0
Aristolochiaceae	1	-	0	Brassicaceae	12	-	0
Saururaceae	1	-	0	Amaranthaceae	3	-	0
Lemnaceae	2	-	0	Chenopodiaceae	6	-	0
Acoraceae	1	-	0	Caryophyllaceae	5	-	0
Alismataceae	3	-	0	Polygonaceae	17	-	0
Dioscoreaceae	3	-	0	Portulacaceae	2	-	0
Liliaceae	13	-	0	Molluginaceae	2	-	0
Smilacaceae	3	-	0	Phytolaccaceae	1	-	0
Iridaceae	3	-	0	Cornaceae	3	-	0
Amaryllidaceae	1	-	0	Hydrangeaceae	1	-	0
Typhaceae	3	-	0	Actinidiaceae	1	-	0
Juncaceae	2	-	0	Balsaminaceae	2	-	0
Cyperaceae	19	-	0	Ebenaceae	2	-	0
Poaceae	58	-	0	Ericaceae	3	-	0
Commelinaceae	2	-	0	Polemoniaceae	1	-	0
Berberidaceae	1	-	0	Primulaceae	3	-	0
Papaveraceae	2	-	0	Styracaceae	1	-	0
Fumariaceae	2	-	0	Asclepiadaceae	1	-	0
Lardizabalaceae	1	-	0	Rubiaceae	4	-	0
Menispermaceae	1	-	0	Solanaceae	9	-	0
Ranunculaceae	4	-	0	Convolvulaceae	9	-	0
Salicaceae	8	-	0	Boraginaceae	1	-	0
Platanaceae	1	-	0	Lamiaceae	19	-	0
Buxaceae	1	-	0	Verbenaceae	3	-	0
Paeoniaceae	1	-	0	Scrophulariaceae	9	-	0
Crassulaceae	3	-	0	Acanthaceae	1	-	0
Vitaceae	6	-	0	Pedaliaceae	1	-	0
Celastraceae	2	-	0	Bignoniaceae	1	-	0
Oxalidaceae	1	-	0	Plantaginaceae	1	-	0
Euphorbiaceae	8	-	0	Phrymaceae	1	-	0
Violaceae	5	-	0	Oleaceae	7	-	0
Clusiaceae	2	-	0	Asteraceae	63	3	4.8
Fabaceae	41	-	0	Campanulaceae	5	-	0
Rosaceae	23	-	0	Menyanthaceae	2	-	0
Cannabaceae	1	-	0	Apiaceae	8	-	0
Elaeagnaceae	2	-	0	Araliaceae	6	-	0
Moraceae	5	-	0	Diervillaceae	1	-	0
Rhamnaceae	2	-	0	Caprifoliaceae	1	-	0
Ulmaceae	3	-	0	Valerianaceae	3	-	0
Celtidaceae	1	-	0				
Urticaceae	6	-	0				
Cucurbitaceae	6	-	0				
Betulaceae	2	-	0				
Fagaceae	10	-	0				

30m와 100m가 가장 적었는데 특히 100m에서는 모든 개체가 잎의 피해는 없었고, 돼지풀잎벌레의 성충과 유충 모두 발견되지 않았다(Fig. 3, b, d).

돼지풀잎벌레의 이동거리에 따른 단풍잎돼지풀의 생육 및 번식은 기준점(C,P)으로부터 거리가 멀어질수록 양호했고, 기준점(C,P)과의 거리 차이가 30m 이상이 되었을 때 돼지풀잎벌레의 피해를 적게 받는 것으로 나타났다. 이는 돼지풀잎벌레의 성충과 유생의 수가 기준점(C,P)으로부터 거리가 멀어질수록 적어지기 때문에 나타난 결과이다(Fig. 3). 분배의 원리에 따르면 식물은 생장, 유지, 생식에 사용할 자원이 한정되어 있기 때문에 한 기관에 자원을 분배하면 다른 기관을 발달시키는 능력을 제한한다(Doust, 1989). 따라서 기준점에 가까울수록 지상부 길이가 짧았던 것은 지상부 줄기로 가는 양분이 돼지풀잎벌레가 섭식한 잎만큼 다시 잎을 만드는 데 사용되었기 때문으로 판단되며, 돼지풀잎벌레의 섭식 활동이 잎의 발달과 잎의 지속시간에 변화를 줌으로써 결과적으로 식물계절에 영향을 주게 되어 번식이 불량한 것으로 판단된다(Aizen, 2003; Nord and Lynch, 2009). 본 연구와 유사하게 돼지풀잎벌레의 섭식활동은 단풍잎돼지풀의 종자생산량을 24.8% 감소시켰다(Lee et al., 2007). 그리고 돼지풀잎벌레는 시간당 1km의 비행능력이 있지만, 환경에 따라 비행을 하지 않는 개체들도 있으며, 돼지풀잎벌레의 개체군 크기는 기주식물량과 양의 상관관계를 가지고 있

기 때문에(Tanaka, 2009; Miyatake and Ohno, 2010) 본 연구의 결과와 같이 돼지풀잎벌레가 이동하던 중 섭식 및 산란을 할 수 있는 충분한 기주식물량이 있다면 더 이상 이동하지 않은 것으로 판단된다.

3.2.2 돼지풀잎벌레의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생리반응

돼지풀잎벌레의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생리반응은 대조구(C)에서 엽록소함량과 광계 II의 광화학적 효율(Fv/Fm)은 각각 $807.7 \pm 61.0 \mu\text{mol g}^{-1} \text{s}^{-1}$, 0.812 ± 0.030 nm이었고, 처리구(T)에서는 각각 $783.5 \pm 11.8 \mu\text{mol g}^{-1} \text{s}^{-1}$, 0.749 ± 0.028 nm이었는데, 이처럼 단풍잎돼지풀의 생리반응은 돼지풀잎벌레가 없는 군락(대조구)이 돼지풀잎벌레가 있는 군락(처리구)보다 모든 측정형질에서 모든 값이 높게 나타났다(Fig. 4).

돼지풀잎벌레의 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생리반응에서 엽록소 함량과 광계 II의 광화학적 효율(Fv/Fm)은 대조구(0.812 ± 0.03)가 처리구(0.749 ± 0.028)보다 높았다(Fig. 4). 일반적으로 Fv/Fm은 대부분 식물에서 건강한 잎의 경우 보통 0.83 정도의 값을 가지며(Kooten and Snel, 1990; Bjorkman and Demmig, 1987; Johnson et al., 1993), 이 값보다 낮은 값을 가질 경우는 식물이 스트레스에 노출되었을 경우이다(Lee, 1990; Maxwell and Johnson, 2000). 이러한 결과는 대조구의 잎이 처리구의 잎보다 더 건강한 것이고, 단풍잎돼지풀은 돼지풀잎벌레

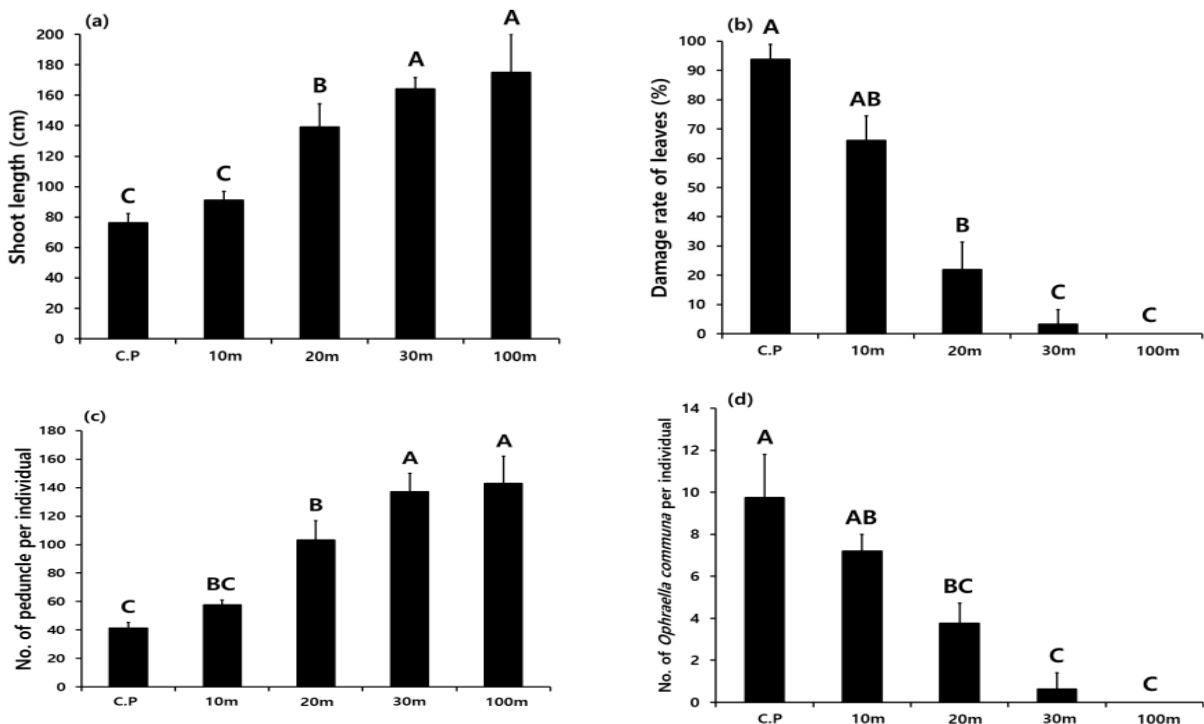


Fig. 3. Shoot length (a), Damage rate of leaves (b), No. of peduncle per individual (c) of *Ambrosia trifida* L. and No. of *Ophraella communa* LeSage (sum of adult and larva) per individual (d) measured under dispersion gradients (C.P: control point, 10m: distance of 10 m from the control point, 20m: distance of 20 m from the control point, 30: distance of 30 m from the control point, 100: distance of 100 m from the control point). Alphabets on the bars mean significant difference among environmental treatments ($p < 0.05$). Above bars on the graph mean standard deviation.

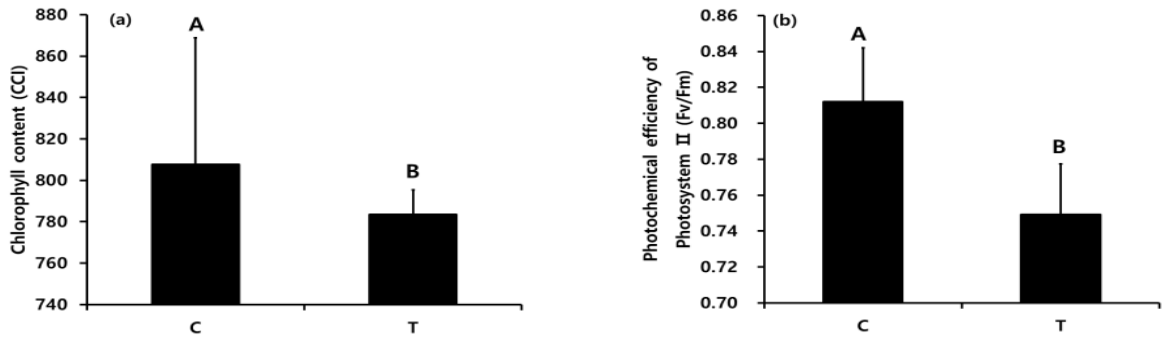


Fig. 4. Chlorophyll content (a) and Photochemical efficiency of photosystem (Fv/Fm) (b) of *Ambrosia trifida* L. measured under control and treatment (C: control, T: treatment). Alphabets on the bars mean significant difference among environmental treatments ($p < 0.05$). Above bars on the graph mean standard deviation. ($N=15$)

의 섭식으로 인해 스트레스를 받고 있다는 것을 의미하는데 이로 인해 광합성 등 식물의 생리활동에 영향을 미치고 있고(Chim and Han, 2003), 특히 Fv/Fm이 감소할 때는 엽록소함량이 동시에 감소할 수 있기 때문에 단풍잎돼지풀의 성장에도 차이가 생긴 것으로 판단된다(Maxwell and Johnson, 2000).

3.2.3 단풍잎돼지풀의 식피율에 따른 돼지풀잎벌레의 섭식률

단풍잎돼지풀의 식피율에 따른 돼지풀잎벌레의 잎의 섭식률은 Low Coverage(식피율 10%)와 Middle Coverage(식피율 50%)가 High Coverage(식피율 90%)보다 높았다(Fig. 5). 그리고 개체당 돼지풀잎벌레(성충과 유충의 합)의 수는 High Coverage(식피율 90%)와 Middle Coverage(식피율 50%)가 Low Coverage(식피율 10%)보다 많았다(Fig. 5).

연구기간 동안 단풍잎돼지풀의 고사율은 Low Coverage(식피율 10%), Middle Coverage(식피율 50%), High Coverage(식피율 90%)에서 각각 97.8%, 91.2%, 0% 이었다(Fig. 6). 특히 단풍잎돼지풀의 고사율은 봄(5월)에서 여름(6월)으로 넘어가는 시기에 Low Coverage(식피율 10%)와 Middle Coverage(식피율 50%)에서 각각 58.2%, 48.5%로 다른 시기보다 가장 높았는데 6월에서 7월로 넘어가는 시기보다 평균 3.9배(Low Coverage(식피율 10%): 고사율 14.3%(약 4.1배), Middle Coverage(식피율 50%): 고사율 13.2%(약 3.7배)), 7월에서 8월로 넘어가는 시기보다 평균 2.0배(Low Coverage(식피율 10%): 고사율 25.3%(약 2.3배), Middle Coverage(식피율 50%): 고사율 29.4%(약 1.6배)) 높았다(Fig. 6). 그리고 High Coverage(식피율 90%)에서 봄(5월)과 여름(6월에서 8월)에 단풍잎돼지풀은 모든 개체가 고사하지 않았다(Fig. 6).

단풍잎돼지풀의 식피율이 10%와 50%인 단풍잎돼지풀 군락에서 섭식률은 차이가 없었는데(Fig. 5.), 이는 돼지풀잎벌레의 성충과 유충의 수가 증가하였기 때문으로 판단된다. 그러나 식피율이 50%와 90%인 단풍잎돼지풀군락에서는 돼지풀잎벌레의 성충과 유충의 수에 차이가 없었

지만, 섭식률은 식피율이 50%일 때 더 높았다(Fig. 5). 같은 *Ambrosia* 속에 속하는 돼지풀의 지상부 생물량이 높을수록 방어물질인 2차 대사산물의 양이 높아진 연구 결과를 보면(van Boheemen et al., 2019), 지상부 생물량이 높았던 식피율 90% 구배에서는 식물 자체가 곤충의 밀도를 조절한 것으로 판단된다. 그리고 단풍잎돼지풀의 고사율은 식피율 90%의 개체는 모든 개체가 고사하지 않았고, 식피율 10%의 개체와 식피율 50%의 개체는 약 90% 이상으로 고사하였는데 특히 봄(5월)에서 여름(6월)으로 넘어가는 시기에 고사율이 가장 높았다(Fig. 6).

위의 결과를 볼 때 단풍잎돼지풀의 식피율은 돼지풀잎벌레의 섭식에 중대한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 돼지풀잎벌레는 5월 중순부터 발생하기 시작하여 7월 중순경에 가장 왕성하게 활동하고, 섭식 및 산란, 생활사가 앞에서 주로 이루어진다(Lee et al., 2007). 이러한 섭식활동으로 인해 단풍잎돼지풀의 생육초기에 잎의 맥 사이에

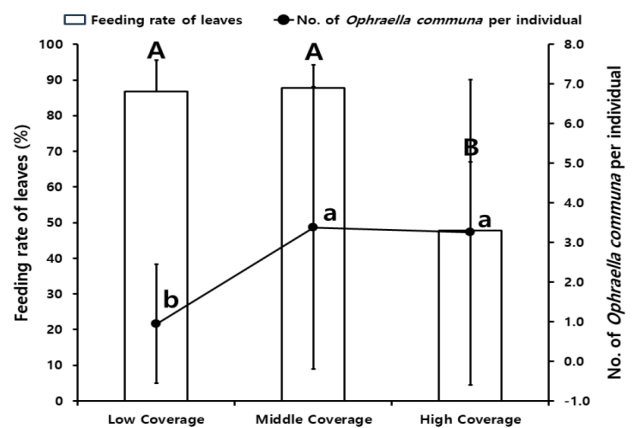


Fig. 5. Feeding rate of leaves of *Ambrosia trifida* L. and No. of *Ophraella communa* LeSage (sum of adult and larva) per individual measured under coverage rate gradients (Low Coverage: coverage rate 10%, Middle Coverage: coverage rate 50%, High Coverage: coverage rate 90%). Alphabets on the bars mean significant difference among environmental treatments ($p < 0.05$). Above bars on the graph mean standard deviation.

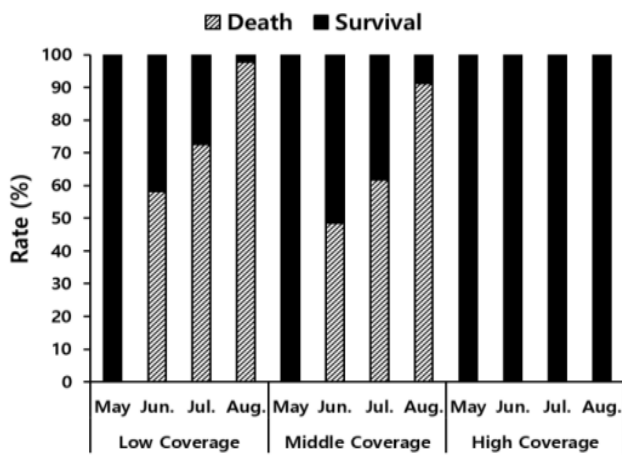


Fig. 6. Change of the survival rate and death rate of *Ambrosia trifida* L. measured under coverage rate gradient (Low Coverage: coverage rate 10%, Middle Coverage: coverage rate 50%, High Coverage: coverage rate 90%).

구멍이 생기기 시작하여 식피율이 낮아질 경우에는 최적 분배모델(Optimal partitioning model)에 의하면 식물은 환경요인의 변화에 반응하여 최적의 성장을 나타내기 위해 영양분을 분배하는데 잎의 피해율이 80% 이상으로 받은 개체(식피율 10%의 개체와 식피율은 50%의 개체)는 새로운 잎을 만들어 내기 위해 영양분을 사용하기 때문에 성장과 관련된 기관들의 길이와 수가 다른 개체(식피율 90%의 개체)보다 낮다고 판단되며(Beranacchi et al., 2000), 이러한 이유로 식피율이 낮은 개체는 생육초기에 영양분이 부족해짐에 따라 고사한 것으로 판단된다.

3.3 생물학적 방제 활용 가능성

환경부의 생태계교란 식물로 지정된 단풍잎돼지풀은 도심 주변 및 하천변 인근에 서식하고 있어 화학적인 방제가 제한적이므로 대부분 물리적인 방제를 하고 있다. 각각의 방제법들은 한계점을 보이고 있으므로 생물학적 방제 등 다양한 방제법에 관한 연구가 필요하지만, 국내에서는 생물학적 방제에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이러한 국내의 상황과는 다르게 북미, 일본, 대만에서는 돼지풀류의 생물학적 방제수단으로 돼지풀잎벌레의 가능성에 주목하여 연구가 활발히 진행되고 있으며, 중국에서는 돼지풀잎벌레의 섭식 및 서식환경특성을 이용하여 생물학적 방제종으로 활용하고 있다(Harris and Piper, 1973; Emura, 1999; Takizawa et al., 1999; Zhou et al., 2011).

돼지풀잎벌레는 기주식물인 단풍잎돼지풀과 돼지풀을 빠르게 섭식하여 제어효과를 나타내고 있지만(Yamazaki et al., 2000), 기주식물 외 해바라기(*Helianthus annuus*)와 같은 재배식물을 섭식하고 있는 실정이고(Palmer and Goeden, 1991; Emura, 1999; Kim et al., 2017), 본 연구에서는 재배식물인 뽕뽕지(*Helianthus tuberosus*)의 섭식도 확인이 되었다. 하지만, 돼지풀잎벌레는 재배식물을

기주식물로 선택하는 경우가 적었고, 피해가 적었는데(Zhou et al., 2011), 본 연구에서도 뽕뽕지는 다른 재배식물과 같이 돼지풀잎벌레가 기주식물로 선택하는 경우는 적었고, 주로 성충 단계에서 뽕뽕지의 잎을 섭식하였는데 피해는 미비하였다. 이처럼 생물학적 방제를 위해 사용하는 곤충은 방제대상 식물을 제외한 작물이나 식물을 섭식하지 않는 것이 중요하다(Lee et al., 2007).

돼지풀잎벌레를 이용한 생물학적 방제 연구를 살펴보면 돼지풀을 제어하기 위해 개체당 12 개체씩 투입하여 번식시기 이전에 돼지풀을 제거하였고, 특히 돼지풀의 생육초기에 돼지풀잎벌레를 개체당 1.07 개체와 생육이 완료된 개체에 12 개체 이상을 방사하면 제어를 할 수 있다고 제안하였다(Zhou et al., 2014; Guo et al., 2011). 그리고 돼지풀잎벌레는 단풍잎돼지풀의 엽면적 및 종자생산량을 각각 50%, 24.8% 감소시켰다(Lee et al., 2007). 본 연구에서도 돼지풀잎벌레 섭식에 따른 단풍잎돼지풀의 생태적 반응은 차이가 있었고, 돼지풀잎벌레를 이용한 단풍잎돼지풀의 생물학적 제어가능성을 확인하였다. 그리고 기주식물량이 많은 경우에서 돼지풀잎벌레는 반경 30m/yr로 단거리 이동하는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과로 보아 돼지풀잎벌레를 활용한 생물학적 방제는 단풍잎돼지풀이 고밀도로 넓은 면적에 분포하는 곳이 적합할 것으로 판단되며, 단풍잎돼지풀을 효과적으로 제어하기 위해서는 식피율이 낮은 단풍잎돼지풀군락에 개체들의 잎을 섭식함으로써 생육을 방해할 수 있게 단풍잎돼지풀의 생육초기(5 월)에 맞추어 돼지풀잎벌레를 투입해야 한다. 하지만, 곤충을 활용한 생물학적 방제의 성공적이고, 안정적인 적용을 위해서는 활용 대상 곤충의 사육 및 방사 이후 관리 방법이 중요할 것이라 판단되는데 특히 돼지풀잎벌레는 외래생물이므로 방제 시 방출량과 방제 후 방제기간 동안 방제지역 주변으로 개체의 분포범위에 대한 지속적인 모니터링이 필요하고, 이러한 점을 고려하였을 때 소규모의 군락부터 적용이 필요하며, 이와 함께 기주특이성 연구, 대규모 군락에서의 연구 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 돼지풀잎벌레의 기주특이성을 조사하고, 초식자인 돼지풀잎벌레의 섭식활동에 따른 생태계교란 식물인 단풍잎돼지풀의 생태적 반응 및 고사율의 변화를 파악하여 초식곤충에 의한 제어가능성을 확인하기 위해 기주식물은 5년간 금강수계의 출현식물 내 돼지풀잎벌레의 섭식 및 산란을 조사하였고, 환경조건이 동일한 야외에서 단풍잎돼지풀에 돼지풀잎벌레를 처리하여 생육 및 번식, 생리-생태학적 반응 그리고 시간에 따른 고사율의 변화를 파악하였다.

그 결과 출현식물 중 돼지풀잎벌레는 국화과에 속하는 생태계교란 식물인 단풍잎돼지풀과 돼지풀 그리고 재배식

물인 풍탄지를 섭식하는 것을 확인하였고, 기주식물인 단풍잎돼지풀로부터 반경 30m/yr 로 단거리 이동하였다. 그리고 단풍잎돼지풀은 초식자의 섭식으로 인해 생리적으로 스트레스를 받고 있었고, 초식자가 있는 곳으로부터 거리가 멀어질수록 꽃과 줄기가 길었고, 잎의 피해율은 적었다. 또한, 단풍잎돼지풀군락의 식피율이 50% 이하일 때 초식자를 도입하면 90% 이상의 단풍잎돼지풀을 제어할 수 있었지만, 식피율이 90% 이상에서는 제거의 효과가 작았다.

본 연구의 결과로 보아 돼지풀잎벌레는 단풍잎돼지풀을 생물학적으로 효과적으로 방제할 수 있을 것이라 판단되는데 특히 돼지풀잎벌레의 단풍잎돼지풀 섭식효과를 최대로 증대시키는 방법은 식피율이 낮은 단풍잎돼지풀의 생육초기(5 월)에 맞추어 이른 시기에 돼지풀잎벌레를 투입해야 한다. 그리고 돼지풀잎벌레의 방제 대상 식물을 제외한 더 많은 자생식물 및 재배식물을 대상으로 지속적인 기주특이성 연구와 함께 테스트베드를 선정하여 단풍잎돼지풀의 대규모 군락에서의 제어 효과에 관한 연구도 같이 진행되어야 한다.

사사

본 연구는 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-법정연구-2023-01, NIE-법정연구-2023-09).

References

- Aguilar, JA, Camarena, OM, Center, TD, Bojorquez, G (2003). Biological control of water hyacinth in Sinaloa, Mexico with the weevils *Neochetina eichhorniae* and *N. bruchi*, *Biocontrol*, 48, pp. 595-608. [DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1025707603627>]
- Aizen, MA (2003). Influences of animal pollination and seed dispersal on winter flowering in a temperate mistletoe, *Ecology*, 84(10), pp. 2613-2627. [DOI: <https://doi.org/10.1890/02-0521>]
- Beranacchi, CJ, Coleman, JS, Bazzaz, FA, McConnaughay, KDM (2000). Biomass allocation in old-field annual species grown in elevated CO₂ environments: no evidence for optimal partitioning, *Global Change Biology*, 6, pp. 855-863. [DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00370.x>]
- Bjorkman, O, Demmig, B (1987). Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K among vascular plants of diverse origins, *Planta*, 170, pp. 489-504. [DOI: 10.1007/BF00402983]
- Center for Agriculture and Bioscience International (2016). United Kingdom, accessed 22 November 2016, <<https://www.cabdigitalibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.4693>>
- Chim, JS, Han, SS (2003). Ecophysiological characteristics of deciduous oak species (III) - Photosynthetic responses of leaves to change of light intensity-, *Journal of Korean Society of Forest Science*, 92(3), pp. 208-214. [Korean Literature]
- Choi, JS (2017). Strategy for control of invasive alien weeds based on secondary metabolite(s) from a natural substances, *Korean Journal of Weed Science*, 37(2), pp. 10-12. [Korean Literature]
- Doust, JL (1989). Plant reproductive strategies and resource allocation. *Trends in Ecology & Evolution*, 4(8), pp. 230-234. [DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(89\)90166-3](https://doi.org/10.1016/0169-5347(89)90166-3)]
- Emura, K (1999). The ragweed beetle *Ophraella communa* LeSage (Coleoptera: Chrysomelidae) which injures harmful exotic plants, *Plant Protec*, 53, pp. 138-141.
- Funk, DJ, Futuyma, DJ, Orti, G, Meyer, A (1995). A history of host associations and evolutionary diversification for *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae): new evidence from mitochondrial DNA, *Evolution*, 49, pp. 1008-1017. [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1995.tb02335.x>]
- Futuyma, DJ (1990). Observations on the Taxonomy and Natural History of *Ophraella* Wilcox (Coleoptera: Chrysomelidae), with a Description of a New Species, *Journal of the New York Entomological Society*, 98(2), pp. 163-186. [DOI: <https://www.jstor.org/stable/25009832>]
- Guo, JY, Zhou, ZS, Zheng, XW, Chen, HS, Wan, FH, Luo, YH (2011). Control efficiency of leaf beetle, *Ophraella communa*, on the invasive common ragweed, *Ambrosia artemisiifolia*, at different growing stages, *Biocontrol Science and Technology*, 21(9), pp. 1049-1063. [DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2011.603823>]
- Hao, Q, Ma, JS (2023). Invasive alien plants in China: An update. *Plant Diversity*, 45(1), 117. [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.11.004>]
- Harris, P, Piper, GL (1973). Ragweed (*Ambrosia* spp.: Compositae): its North American insects and the possibilities for its biological control, *Technical Bulletin, Commonwealth Institute of Biological Control*, 13, pp. 117-140.
- Hershenhorn, J, Casella, F, Vurro, M (2016). Weed biocontrol with fungi: past, present and future, *Biocontrol science and technology*, 26(10), pp. 1313-1328. [DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2016.1209161>]
- Hulme, PE (2009). Trade, transport and trouble: managing

- invasive species pathways in an era of globalization, *Journal of applied ecology*, 46(1), pp. 10–18. [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01600.x>]
- Johnson, GN, Young, AJ, Scholes, JD, Horton, P (1993). The dissipation of excess excitation energy in British plant species, *Plant Cell & Environment*, 16(6), pp. 673–679. [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00485.x>]
- Kim, DS, Oh, KS, Lee, YD, Lee, SY, Lee, HJ, Kim, HJ, Kim, DE (2017). The Distribution of the Exotic Species, *Ophraella communa* LeSage (Coleoptera, Chrysomelidae) and Their Applicability for Biological Control against Ragweed *Ambrosia artemisiifolia* L. on Jeju Island, *Korean Journal of Environmental Biology*, 35(4), pp. 437–445. [Korean Literature]
- Kim, HG, Lee, DH (2019). Review of the biology and ecology of a ragweed leaf beetle, *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae), which is a biological control agent of an invasive common ragweed, *Ambrosia artemisiifolia* (Asterales: Asteraceae). *Biocontrol Science and Technology*, 29(2), 185–200. [DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1540032>]
- Kooten, O, Snel, JFH (1990). The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology, *Photosynthesis Research*, 25, pp. 147–150. [DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00033156>]
- Korean Law Information Center (2023). Biodiversity conservation and utilization act, accessed 10 August 2023, <<http://www.law.go.kr>>
- Krebs, CJ (1972). Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance. Harper and Row, New York.
- Lee, CH (1990). Biochemical methodology : studies of photosynthesis by analysis of chlorophyll fluorescence, *Korean Society for Biochemistry and Molecular Biology*, 4, pp. 265–271. [Korean Literature]
- Lee, CS, Cho, YC, Shin, HC, Kim, GS, Pi, JH (2010). Control of an invasive alien species, *Ambrosia trifida* with restoration by introducing willows as a typical riparian vegetation, *Journal of Ecology and Environment*, 33(2), pp. 157–164. [Korean Literature]
- Lee, IY, Park, JY, Oh, SM, Park, JE, Kwon, OS (2007). Selection of Insects for Potential Biological Control of *Ambrosia trifida*, *Weed & Turfgrass Science*, 27(4), 309–317. [Korean Literature]
- LeSage, L (1986). A taxonomic monograph of the Nearctic galerucine genus *Ophraella* Wilcox (Coleoptera: Chrysomelidae). The Memoirs of the Entomological Society of Canada, 118(S133), pp. 3–75. [DOI: <https://doi.org/10.4039/entm118133fv>]
- Maxwell, K, Johnson, GN (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide, *Journal of experimental botany*, 51(345), pp. 659–668. [DOI: <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>]
- Miyatake, T, Ohno, T (2010). Seasonal abundance of exotic leaf beetle *Ophraella communa* LeSage (Coleoptera: Chrysomelidae) on two different host plants, *Applied Entomology and Zoology*, 45, pp. 283–288. [DOI: <https://doi.org/10.1303/aez.2010.283>]
- Müller-Schärer, H, Lommen, ST, Rossinelli, M, Bonini, M, Boriani, M, Bosio, G, Schaffner, U (2014). *Ophraella communa*, the ragweed leaf beetle, has successfully landed in Europe: fortunate coincidence or threat?. *Weed research*, 54(2), 109–119. [DOI: <https://doi.org/10.1111/wre.12072>]
- Na, SH, Cho, YH, Park, YG, Kim, YJ, Han, YG, Nam, SH, Kwon, OS (2008). Study on Population Dynamics of *Ophraella communa* LeSage and *Epiblema sugii* Kawabe, Biological Control Agents Against *Ambrosia* Species, *Weed & Turfgrass Science*, 28(3), 279–285. [Korean Literature]
- National Institute of Biological Resources (2022). National list of species of Korea, accessed 10 August 2023, <<https://kbr.go.kr/>>
- National Institute of Ecology (2021). Information for the field management of invasive alien species in Korea
- National Institute of Environmental Research (2010). Detailed studies on invasive alien species and their management. pp. 164–169.
- No, HJ, Jeong, HY (2002). Well-Defined Statistical Analysis according to Statistica. Hyeongseol Publisher, Seoul.
- Nord, EA, Lynch, JP (2009). Plant phenology: a critical controller of soil resource acquisition, *Journal of Experimental Botany*, 60(7), pp. 1927–1937. [DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp018>]
- Palmer, WM, Goeden, RD (1991). The host range of *Ophraella communa* Lesage (Coleoptera: Chrysomelidae), *The Coleopterists' Bulletin*, 45, pp. 115–120. [DOI: <https://www.jstor.org/stable/4008691>]
- Park, HC, Lim, JC, Lee, JH, Lee, GG (2017). Predicting the potential distribution of invasive species using the landsat imagery and maxent : focused on “*Ambrosia trifida* L. var. *trifida*” in Korean demilitarized zone, *Korean society of environmental restoration technology*, 20(1), pp. 1–12. [Korean Literature]
- Pimentel, D, McNair, S, Janecka, J, Wightman, J, Simmonds, C, O'connell, C, Tsomondo, T (2001). Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 84(1), pp. 1–20.
- Pimentel, D, Lach, L, Zuniga, R, Morrison, D (2000). Environmental and economic costs of nonindigenous species in

- the United States, *BioScience*, 50(1), 53–65. [DOI: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0053:EAEC ON\]2.3.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0053:EAEC ON]2.3.CO;2)]
- Pimentel, D, McNair, S, Janecka, J, Wightman, J, Simmonds, C, O'connell, C, Tsomondo, T (2001). Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions, *Agriculture, ecosystems & environment*, 84(1), 1–20. [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00178-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00178-X)]
- Richardson, AD, Duigan, SP, Berlyn, GP (2002). An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content, *New phytologist*, 153(1), pp. 185–194. [DOI: <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00289.x>]
- Ryu, TB, Lim, JC, Lee, CH, Kim, EJ, Choi, BK (2017). Distribution of invasive species in metropolitan Busan, South Korea, *Korean Journal of Life Science*, 27(4), pp. 408–416. [Korean Literature]
- Schaffner, U, Steinbach, S, Sun, Y, Skjøth, CA, de Weger, LA, Lommen, ST, Müller-Schärer, H (2020). Biological weed control to relieve millions from *Ambrosia* allergies in Europe, *Nature Communications*, 11(1), 1745. [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15586-1>]
- Sohn, JC, An, SL, Lee, JE, Park, KT (2002). Notes on Exotic Species, *Ophraella communa* LeSage (Coleoptera: Chrysomelidae) in Korea, *Korean journal of applied entomology*, 41(2), pp. 145–150. [Korean Literature]
- Stowe, HE, Michaud, JP, Kim, TN (2022). Resource amount and discontinuity influence flight and reproduction in *Hippodamia convergens* (Coleoptera: Coccinellidae). *Ecosphere*, 13(9), e4250. [DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.4250>]
- Takizawa, H, Saito, A, Saito, K, Hirano, Y, Ohno, M (1999). Invading insect, *Ophraella communa* LeSage. 1986. Range expansion and life history in Kanto district, Japan. *GekkanMushi*, Tokyo. 338, pp. 26–31.
- Tanaka, K (2009). Genetic Variation in Flight Activity of *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae): Heritability Estimated by Artificial Selection, *Environmental entomology*, 38, pp. 266–273. [DOI: <https://doi.org/10.1603/022.038.0133>]
- Tanaka, K, Yamanaka, T (2009). Factors affecting flight activity of *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae), an exotic insect in Japan, *Environmental Entomology*, 38(1), pp. 235–241. [DOI: <https://doi.org/10.1603/022.038.0129>]
- van Boheemen, LA, Bou-Assi, S, Uesugi, A, Hodgins, KA (2019). Rapid growth and defence evolution following multiple introductions, *Ecology and Evolution*, 9(14), pp. 7942–7956. [DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.5275>]
- Wilcove, DS, Rothstein, D, Dubow, J, Phillips, A, Losos, E (1998). Quantifying threats to imperiled species in the United States, *BioScience*, 48(8), 607–615. [DOI: <https://doi.org/10.2307/1313420>]
- Yamamura, K, Moriya, S, Tanaka, K, Shimizu, T (2007). Estimation of the potential speed of range expansion of an introduced species: characteristics and applicability of the gamma model, *Population Ecology*, 49, 51–62. [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10144-006-0001-9>]
- Yamazaki, K, Imai, C, Natuhara, Y (2000). Rapid population growth and food-plant exploitation pattern in an exotic leaf beetle, *Ophraella communa* LeSage (Coleoptera: Chrysomelidae), in western Japan, *Applied Entomology and Zoology*, 35, pp. 215–223. [DOI: 10.1303/aez.2000.215]
- Zhang, LJ, Yang, XK, Li, WZ, Cui, JZ (2005). A new record of *Ophraella communa* of mainland China, *Chinese Bulletin of Entomology*, 42, pp. 227–228.
- Zhou, ZS, Chen, HS, Zheng, XW, Guo, JY, Guo, W, Li, M, Luo, M, Wan, FH (2014). Control of the invasive weed *Ambrosia artemisiifolia* with *Ophraella communa* and *Epiblema strenuana*, *Biocontrol Science and Technology*, 24, pp. 950–964. [DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2014.897305>]
- Zhou, ZS, Guo, JY, Zheng, XW, Luo, M, Chen, HS, Wan, FH (2011). Reevaluation of biosecurity of *Ophraella communa* against sunflower (*Helianthus annuus*), *Journal Biocontrol Science and Technology*, 21, pp. 1147–1160. [DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2011.606559>]