

## 한국 남부 온대림 초식 곤충 식흔량에 영향을 주는 식물 다양성과 밀도

김남희 · 최세웅\*

목포대학교 환경교육과 환경생태학실험실

**Plant Diversity and Density, Driving Forces of the Feeding Activity of Herbivores in a Temperate Forest of Southern South Korea.** Kim, Nang-Hee (0000-0001-6369-5813) and Sei-Woong Choi\* (0000-0001-6326-399X) (Lab. of Environmental Ecology, Department of Environmental Education, Mokpo National University, Muan 58554, Jeonnam, Republic of Korea)

**Abstract** Herbivory is a major functional component of forest ecosystems, and herbivorous insects comprise about 25% of all insect species. Increasing plant diversity is related to herbivore abundance and diversity, which affects the level of leaf damage caused by insects. This study was conducted to identify plant-related variables such as plant diversity and number of leaves and density-related variables, basal area, and diameter at breast height (DBH) in a temperate forest of southern South Korea. To assess the level of leaf damage caused by leaf chewing insects, we set up two 0.1 ha plots in a temperate deciduous forest on Mt. Jirisan National Park. Plant richness differed between two sites: 16 species in 14 families (site 1) and 19 species in 15 families (site 2). Fisher's alpha index based on plant species richness and abundance resulted in 4.41 (site 1) and 6.57 (site 2). However, the sum of basal area of each site was higher in site 1 (6.6 m<sup>2</sup>) than site 2 (3.7 m<sup>2</sup>). The total surveyed leaves at two sites were 3,832 and 4,691, respectively and the damage leaves were 1,544 and 2,136, respectively. The mean leaf damage level was 11.2% ( $\pm 1.76\%$ ) in two study sites: the leaf damage level of the site 1 (11.99%) was significantly higher than site 2 (10.59%). Stepwise regression analysis showed that species diversity and evenness were the significant variables for leaf damages by chewing herbivores. NMDS ordination also identified that high tree density and low species diversity were the significant variables. This suggested that the level of damage was significantly higher in plots with low plant diversity and high tree density. In the future, we will investigate other guilds of herbivores such as sap-suckers, miners and gallers in temperate deciduous forests.

**Key words:** herbivores, plant diversity, density, leaf damage, temperate forest

### 서 론

식물을 먹이원으로 하는 초식 곤충은 약 36만 종으로

(Strong *et al.*, 1984) 생물 다양성의 주요한 부분을 차지하며 (Lewinsohn and Roslin, 2008), 산림 생태계에서 먹이그물, 영양소 순환, 식생 군집 다양성 등 생태계 기능에 많은 영향을 미친다 (Coley and Barone, 1996). 초식 곤충은 기주 식물과 다양한 상호작용을 하는데 기주 식물 다양성은 곤충 종 다양성을 이끄는 주요 요인 중 하나로 여겨지고 있다 (Siemann *et al.*, 1998; Basset, 1999; Andrew and Hughes,

Manuscript received 22 October 2018, revised 13 December 2018, revision accepted 18 December 2018  
\* Corresponding author: Tel: +82-61-450-2783, Fax: +82-61-450-2789, E-mail: choisw@mokpo.ac.kr

2005; Novotny *et al.*, 2006; Kambach *et al.*, 2016).

식물들의 상호작용과 이를 먹는 초식성 동물과의 작용은 “상호작용 저항(associational resistance)”과 “상호작용 수용(associational susceptibility)” 가설로 설명되어 왔다(Brezzi *et al.*, 2017). 상호작용 저항 가설은 식물 다양성이 증가할수록 기주 특이적인 초식 곤충(기주 특이종, specialist)이 적합한 기주를 찾기 어려워 식흔량이 감소하는 것으로 예측하고 있다(resource concentration hypothesis; Root, 1973). 상호작용 수용 가설은 식물 다양성이 증가할수록 기주 특이성이 적거나 민감하지 않은 초식 곤충(일반종, generalist)이 자원 상보성으로 인해 이용이 가능한 더 많은 식물 종으로부터 직접적으로 이익을 얻거나 생물량 증가로 인해 간접적으로 이익을 얻을 것으로 예측한다(dietary mixing hypothesis; Bernays *et al.*, 1994). 이러한 가설을 뒷받침하기 위한 다양한 연구에서 식물의 종 다양성 증가는 초식 곤충 식흔량과 긍정적인 영향을 보이거나(Haddad *et al.*, 2001; Schuldt *et al.*, 2010; Ebeling *et al.*, 2014; O'Brien *et al.*, 2017), 부정적인 영향을(Jactel and Brockerhoff, 2007; Alalouni *et al.*, 2014) 나타내 일반적인 양상을 얻기는 어려웠다.

식물의 생물량(biomass)은 한 개체의 나무에서 새로 발생하는 잎의 수로 측정할 수 있는데 생물량이 많을수록 초식 곤충이 먹이나 서식지로 사용할 수 있는 자원 이용성이 높아진다. 또한 식물 생물량은 새로운 먹이를 찾아 이동하는 운동 비용을 낮춰 성장이나 생식에 할당된 에너지를 증가시킬 수 있어 초식 곤충 활동량에 긍정적인 영향을 준다(Cuevas-Reyes *et al.*, 2004). 반면에 Siemann (1998)의 연구에서는 식물 생물량 증가는 초식 곤충뿐만 아니라 부식자, 포식기생자, 포식자의 종 수와 풍부도를 증가시키기 때문에 전반적인 초식 곤충 다양성에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 하지만 식물 생물량과 식물 종 풍부도 사이에 긍정적인 영향을 보이기 때문에(Mulder *et al.*, 1999) 생물량은 초식 곤충 활동과 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다.

숲에서 수목 풍부도와 함께 수목 밀도는 초식 곤충의 풍부도와 종 구성을 결정한다(Leal *et al.*, 2016). 수목의 밀도는 초식 곤충의 산란 패턴에 영향을 주어 초식성에 직접적인 영향을 주거나 곤충 행동에 영향을 미치는 식물의 특징을 변형시킬 수 있다(plant-mediated effects; Halpern *et al.*, 2014). 서식지의 식생 구조와 수목의 나이도 곤충 식흔량과 상관이 있는 것으로 알려져 있다(Schuldt *et al.*, 2010). 흉고 직경(Diameter at Breast Height, DBH)과 기저단면적(basal area)은 수목의 나이를 상대적으로 나타내며 흉고 직경과 기저단면적이 넓을수록 수령이 오래된 나무로 예측할 수 있

다. 산림 나이와 함께 증가하는 수목의 흉고 직경(Jeffries *et al.*, 2006)은 기주식물에 대한 애벌레의 집중도(infest)에 영향을 주는 것으로 나타났다(Régolini *et al.*, 2014). 또한 기저단면적 크기는 초식 곤충뿐만 아니라 초식 곤충의 포식자 중 하나인 새의 풍부도에 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났다(Czeszczewik *et al.*, 2015).

따라서 이번 연구에서는 온대림에 서식하는 수종을 섭식하는 초식 곤충을 대상으로 활동량에 영향을 미치는 것으로 여겨지는 서식지 내 여러 환경요인을 이용하여 식흔량에 미치는 영향을 파악하였다. 이번 연구는 다음과 같은 질문에 따라 수행되었다. 첫째, 식물 다양성 또는 식물 생물량과 관련된 요인은 식흔량과 어떠한 관계가 있는가? 둘째, 나무 밀도와 관련 짓는 요인은 식흔량과 어떠한 관계가 있는가?

## 조사 및 방법

### 1. 조사 지역

조사는 지리산국립공원에서 실시하였다. 지리산국립공원은 육상 국립공원 중 우리나라에서 면적이 가장 큰 국립공원으로 생물 서식 공간이 잘 보전되어 있으며 우리나라 전체 식물의 30%에 해당하는 약 1,500여 종의 식물이 분포하고 있다(Kim *et al.*, 2012). 조사 지점은 전남 구례군 광의면에 위치한 상선암(site 1, 고도 660 m)과 전북 남원시 산내면에 위치한 반선(site 2, 고도 518 m)으로 이 두 지역은 비슷한 고도에 위치하며 식생은 온대림에 속한다. 조사 지점에는 주로 갈참나무(*Quercus aliena* Blume), 졸참나무(*Quercus serrata* Murray), 서어나무(*Carpinus laxiflora* (Siebold & Zucc.) Blume), 개서어나무(*Carpinus tshonoskii* Maxim.), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla* Hance) 등과 같은 수종이 분포하고 있다. 지리산국립공원에서 수행된 기존 연구 결과 조사 대상 지역인 상선암과 반선은 초식 곤충에서 많은 부분을 차지하고 있는 나비목 곤충 다양성이 높은 지역이다(Choi and An, 2010).

### 2. 조사 방법

각 조사 지점별로 0.1 ha (33 m × 33 m)의 방형구를 설치한 뒤 동일한 크기(0.025 ha)인 4개의 소방형구로 나누어 초식 곤충 활동량에 영향을 주는 서식지내 환경요인을 측정하였다. 각 소방형구 안에 분포하는 DBH ≥ 5 cm의 모든 목본을 조사하여 식물 종 다양성, 균등도, 밀도, 흉고 직경(DBH), 기저단면적(Basal area), 일년생 가지에서 발생하는 잎의 수를 측정하였다.

초식 곤충의 활동은 잎을 씹어 먹거나(chewer), 잎 속을 파먹거나(miner), 잎에 충영을 만들거나(galler), 수액을 빨아먹는(sap-sucker) 등으로 다양하다(Strong *et al.*, 1984). 이 연구에서는 잎을 씹어먹는 초식 곤충인 잎을 씹어 먹는 chewer에 의한 영향을 측정하였다. 초식 곤충의 활동량인 잎 손상 면적(식흔량)은 개엽(leaf unfolding) 후 당해 5월에 두 조사 지점에서 동시에 측정하였다. 조사 대상 수종에서 무작위로 10개의 일년생 가지(current-year shoots)를 선택하여 가지의 모든 잎을 센 뒤, 육안으로 식흔량을 측정하였다(Suzuki and Hiura, 2000). 수고가 높아 잎이 육안으로 보이지 않거나 접근이 불가능한 수종은 제외하였고 나무 높이의 약 8 m 이하의 수종을 관찰할 수 있었다. 식흔량을 알기 위해 잎이 손상된 면적을 기준으로 식흔이 전혀 없는 나뭇잎은 0등급, 1~10% 손상된 나뭇잎은 1등급, 11~25%는 2등급, 26~50%는 3등급, 51~75%는 4등급, 76~100%는 5등급으로 전체 6가지 등급으로 구분하여 조사하였다. 식흔 지수는 식흔 퍼센트의 중간 값인 0%, 5%, 18%, 38%, 63%, 88%로 환산하였다(Kudo, 1996; Nakamura *et al.*, 2008; Hiura and Nakamura, 2013). 이 연구에서는 초식 곤충에 의한 식흔량을 알기 위한 연구로 데이터 분석에서는 조사된 잎 중 식흔이 전혀 없는 0%의 잎을 제외하였고 식흔이 나타난 잎만을 사용하였다.

### 3. 분석 방법

초식 곤충 서식지 환경요인을 파악하기 위하여 방형구 안에 분포하는 식물 종 다양도를 측정하였다. 식물 다양성은 Fisher's  $\alpha$  값을 사용하였으며 여기에서 S는 종수,  $\alpha$ 는 Fisher's alpha,  $n$ 은 개체수를 나타낸다.

$$S = \alpha \times I_n \left(1 + \frac{n}{\alpha}\right)$$

각 소방형구에서 식물 종 분포의 균일성을 측정하기 위해 Simpson 균등도 지수(Simpson's evenness)를 사용하였

다. 수목의 흉고직경(DBH)은 지면으로부터 1.2 m의 높이에서 수관부의 직경을 측정된 값으로, 흉고직경 이하에서 분기한 나무줄기는 지상부에서 근원이 분리되어 있지 않은 이상 모두 같은 나무로 판단하여 합산하였다. 또한 흉고직경의 반지름을 이용하여 계산하는 기저단면적(basal area)은 아래의 식에 의해 산출되었으며 기저단면적은 각 수종별로 방형구 안에 분포하는 개체의 합을 이용하였다.

$$\text{Basal area} = \pi \times (\text{DBH}/2)^2$$

초식 곤충 활동량인 식흔량의 차이는 평균 식흔량을 바탕으로 Student t-test 분석을 하였다. 두 지점에서 식흔 지수의 비율에 대한 수종별 식흔 빈도 차이를 비교하기 위해 카이제곱검정(Pearson's Chi-square test)을 실시하였다.

잎의 수와 식흔량 사이의 상관분석(Pearson correlation)을 실시한 후 변수 간 공선성을 조사하였다. 조사 지역별 환경요인과 식흔량 사이의 관계를 파악하기 위해 회귀분석(stepwise regression analysis)과 비계량다차원척도법(Non-Metric multidimensional scaling, NMDS) 분석을 실시하였다. 회귀분석에서는 각 조사 수종별 전체 식흔량을 이용하여 지역별 전체 식흔량, Fisher's  $\alpha$  값을 이용한 식물 종 다양도, Simpson 균등도(evenness), 기저 단면적, DBH, 사면 등을 포함하여 분석하였다. 변수 간에 상관이 높았던 DBH, 밀도, 사면 등은 제외하였다. NMDS 분석에서는 각 지점에서 조사된 전체 잎을 대상으로 확인된 수종별 식흔량의 평균값과 식물 종 다양도, 균등도, 기저단면적, 일년생 가지에서 새로 발생한 평균 잎의 수, 사면 등의 환경요인을 이용하였으며 Sørensen 거리 측정법을 이용하여 분석하였다. 조사 지역별 4개 소방형구 식흔량이 두 지역 간 차이에 따른 지를 확인하기 위하여 Sørensen 거리 측정 방법을 바탕으로 MRPP(Multi-response Permutation Procedures) 분석을 실시하였다. 분석은 PAST(version 2.17c, Hammer *et al.*, 2001)와, PC-ORD(version 7.0, McCune and Mefford, 2016) 프로그램을 이용하였다.

**Table 1.** Information regarding study sites and survey results of each 0.1 ha plot in southern South Korea.

	Site 1	Site 2
Site location	35°17'31" N, 127°29'39" E	35°22'33" N, 127°34'58" E
Altitude (m)	660	518
Aspect	S	N
No. of surveyed tree individuals of six common species	55	65
Sum of basal area/ha (m <sup>2</sup> , $\pm$ SD)	6.6 ( $\pm$ 0.41)	3.7 ( $\pm$ 0.36)
Mean DBH (cm, $\pm$ SD)	18.6 ( $\pm$ 1.58)	16.3 ( $\pm$ 2.68)
No. of total surveyed leaves ( $\pm$ SD)	3,832 ( $\pm$ 73.2)	4,691 ( $\pm$ 264.4)
Dominant tree species	<i>Carpinus tschonoskii</i> Maxim.	<i>Quercus aliena</i> Blume <i>Quercus serrata</i> Murray

## 결 과

### 1. 조사지 환경과 조사지별 초식 곤충 활동량

각 방형구의 식물 다양성을 조사한 결과 site 1에서 14과 16종, site 2에서 15과 19종의 수목이 분포하였다. Fisher'  $\alpha$  값을 이용한 다양도 지수는 site 1에서 4.41, site 2에서 6.57로 나타나 site 2에 분포하는 식물의 종 다양성이 더 높았다. 각 조사지에서 얻은 밀도, 흉고직경, 기저단면적은 site 2보다 site 1에서 더 높았다(Table 1).

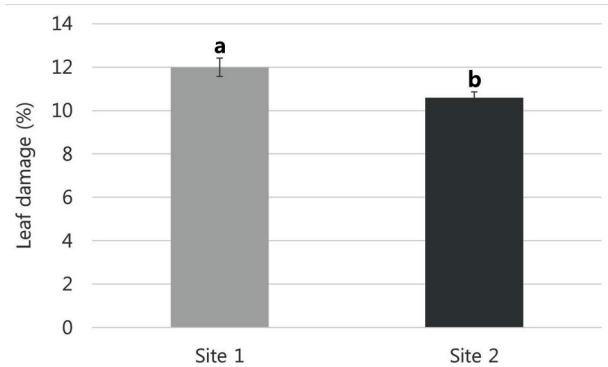
각 조사지에서 조사한 잎 수는 site 1에서 3,832장, site 2에서 4,691장이었다. 이 중 식흔이 나타난 잎은 site 1에서 1,544장 (평균  $\pm$  SD 386  $\pm$  118)이었으며 site 2에서는 2,136장 (534  $\pm$  91)이 조사되었다. 총 조사 잎 수와 식흔량 사이에 상관관계는 나타나지 않았다(Pearson  $r=0.30$ ,  $P=0.11$ ). 식흔량은 site 1에서 11.99%, site 2에서 10.59%로 site 1에서 통계적으로 유의하게 더 높았다( $t=-2.92$ ,  $P<0.05$ , Fig. 1).

### 2. 조사지별 그리고 수종별 초식 곤충 활동량 비교

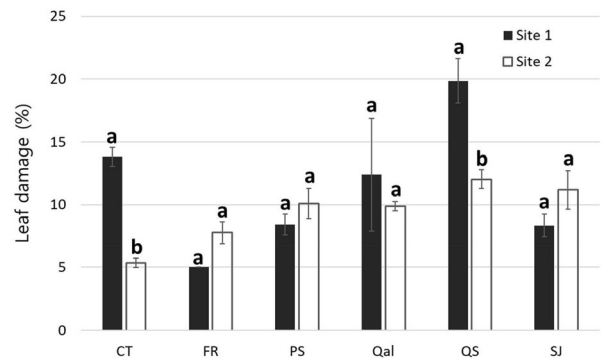
두 방형구에 공통으로 분포하는 수종은 개서어나무, 물푸레나무, 빛나무 (*Prunus serrulata* var. *spontanea* (Maxim.) E.H. Wilson), 갈참나무, 졸참나무, 때죽나무 (*Styrax japonicus* Siebold & Zucc.) 등 6종이었다. 6종의 공통 수종이 각 방형구 안에서 차지하는 비율은 site 1에서는 56%, site 2에서는 68%이었다. 공통 수종에서 조사된 잎 수는 site 1에서 1,040장, site 2에서 1,482장이었다. 두 지역에서 공통으로 분포하는 6종의 총 조사 잎 수와 식흔량 사이에 유의한 상관관은 나타나지 않았다(Pearson  $r=0.30$ ,  $P=0.35$ ). 두 방형구에서 공통 수종을 대상으로 지역 간 식흔량 차이를 살펴본 결과 각 방형구의 평균 식흔량은 site 1은 13.5%, site 2는 10.3%로 나타났으며 site 1이 더 높은 값을 나타내었다 ( $t=-5.21$ ,  $P<0.001$ , Fig. 2).

조사 시기에 수종별 하나의 가지(shoot)에서 그 해에 새

로 발생하는 평균 잎 수는 site 1에서는 개서어나무가 5.1 ( $\pm 1.7$  SD)장으로 가장 많았고, site 2에서도 개서어나무가 4.9



**Fig. 1.** Percentage of leaf area removed by herbivorous insects among total tree species in 0.1 ha plots in each study site ( $\pm$  SE). Different letters on vertical bar graphs indicate significant differences ( $P<0.05$ ) in leaf damage percentage between sites.



**Fig. 2.** Percentage of leaf damage for each common tree species ( $\pm$  SE). Different letters on vertical bar graphs indicate significant differences ( $P<0.05$ ) in leaf damage percentage between sites. CT: *Carpinus tschonoskii* Maxim., FR: *Fraxinus rhynchophylla* Hance, PS: *Prunus serrulata* var. *spontanea* (Maxim.) E.H. Wilson, Qal: *Quercus aliena* Blume, QS: *Quercus serrata* Murray, SJ: *Styrax japonicus* Siebold & Zucc.

**Table 2.** Number of newly emerged leaves from current-year shoots on each tree species from study sites (mean  $\pm$  SD). The average number of leaves was counted from 10 current-year shoots of each individual tree.

Family	Species	Site 1	Site 2
Betulaceae	<i>Carpinus tschonoskii</i> Maxim.	5.08 ( $\pm 1.7$ )	4.85 ( $\pm 1.6$ )
Fagaceae	<i>Quercus aliena</i> Blume	4.20 ( $\pm 0$ )	4.29 ( $\pm 1.4$ )
	<i>Quercus serrata</i> Murray	4.27 ( $\pm 1.2$ )	4 ( $\pm 0.6$ )
Oleaceae	<i>Fraxinus rhynchophylla</i> Hance	6.6 ( $\pm 0$ )	5.3 ( $\pm 0.1$ )
Rosaceae	<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i> (Maxim.) E.H.Wilson	3.97 ( $\pm 0.3$ )	4.1 ( $\pm 1.1$ )
Styracaceae	<i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc.	4.10 ( $\pm 1.4$ )	4.45 ( $\pm 2.3$ )

(±1.6)장으로 가장 많았다(Table 2). 물푸레나무는 site 1에서 6.6장, site 2에서 5.3장으로 조사되었는데 이 결과는 우상복엽(pinnate compound leaf)인 물푸레나무의 잎을 단엽(simple leaf)으로 센 결과이다. 두 지역 간 새로 발생하는 평균 잎 수는 공통 수종 중 물푸레나무를 제외한 나머지 수종에서 차이가 없었다. Site 1에서는 전체 조사된 잎 중 벚나무에서 53%의 잎에서 식흔이 관찰되었으며, 물푸레나무 50%, 졸참나무 47%, 개서어나무 46%, 때죽나무 32%, 갈참나무 19%의 잎에서 식흔이 나타났다. Site 2에서 갈참나무는 조사된 잎의 58%에서 식흔이 나타났으며 물푸레나무는 56%의 잎에서 식흔이 발견되었다. 각 수목별로 식흔량을 비교한 결과 개서어나무( $t = -2.89, P < 0.01$ )와 졸참나무( $t = -4.88, P < 0.001$ )는 site 1에서 식흔량이 더 많았고 나머지 4종에서는 지역 간 식흔량 차이가 크지 않았다. 갈참나무와 물푸레나무는 잎 면적의 1~10% 이하의 식흔이 가장

많이 나타났다. 졸참나무는 조사된 잎 중 49%, 벚나무 45%, 때죽나무 40%, 개서어나무 37%의 잎에서 식흔이 나타났다. 지역별 식흔 지수(index 1~5)의 빈도 차이는 개서어나무( $X^2 = 12.8, P < 0.05$ ), 때죽나무( $X^2 = 25.1, P < 0.001$ ), 졸참나무( $X^2 = 27.6, P < 0.001$ )에서 유의하게 나타났다(Fig. 3).

3. 초식 곤충 활동량과 환경적 요인의 관계

방형구에 분포하는 전체 식물과 두 방형구에 공통으로 분포하는 6종의 수목을 대상으로 초식 곤충 활동에 영향을 주는 환경요인을 파악하였다. 그 결과 방형구내 식물 중 균등도가 중요한 요인으로 확인되었다. 공통 수종인 6종의 식흔량에 영향을 주는 요인은 식물 중 균등도와 Fisher's  $\alpha$  지수가 중요한 요인으로 확인되어 식물 다양성이 공통으로 중요하게 작용하였다(Table 3).

NMDS분석에서 확인한 2개의 주된 축( $R^2 = 0.44$ , final stress = 5.11)에서 첫 번째 축( $R^2 = 0.35$ )은 기저단면적( $R^2 = -0.73$ )과 두 번째 축( $R^2 = 0.08$ )은 식물 다양도( $R^2 = 0.61$ )와 높은 상관관계를 나타내었다(Fig. 4). MRPP분석 결과 조사 지역 간 식흔량의 차이는 뚜렷하게 나타난 것으로 나타났다( $A = 0.211, P < 0.01$ ).

고 찰

이번 우리나라 온대림에서 수행한 초식 곤충의 식흔량 측정은 초식 곤충 활동량과 이들 활동에 영향을 주는 요인을 파악하는데 도움이 될 것이다. 우리나라 대표적인 온대림 중 하나인 지리산국립공원의 두 방형구에서 초식 곤충에 의해 발생한 식흔량은 평균 11.2% (SE ± 1.76%)로 나타났다. 일반적으로 온대지역에서 발생하는 식흔량은 평균 7.1%이었으며(Coley and Barone, 1996) 최근 중국 동남부 지역에서 초식성 절지동물에 의한 식흔량은 4.3~11.2% (Brezzi et al., 2017)로 나타나 우리나라 온대림의 식흔량이 외국 연구와 큰 차이를 나타내지는 않았다. 수목에서 10% 정도의 잎 손상은 큰 손상은 아닐지라도 식물의 적응도(fitness)를 감소시키거나 식물의 성장과 종자 생산량을

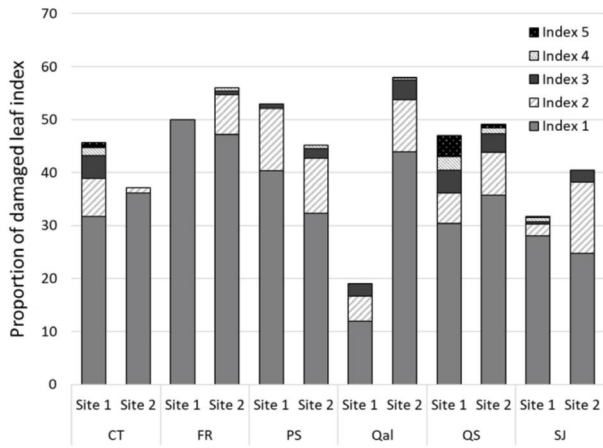
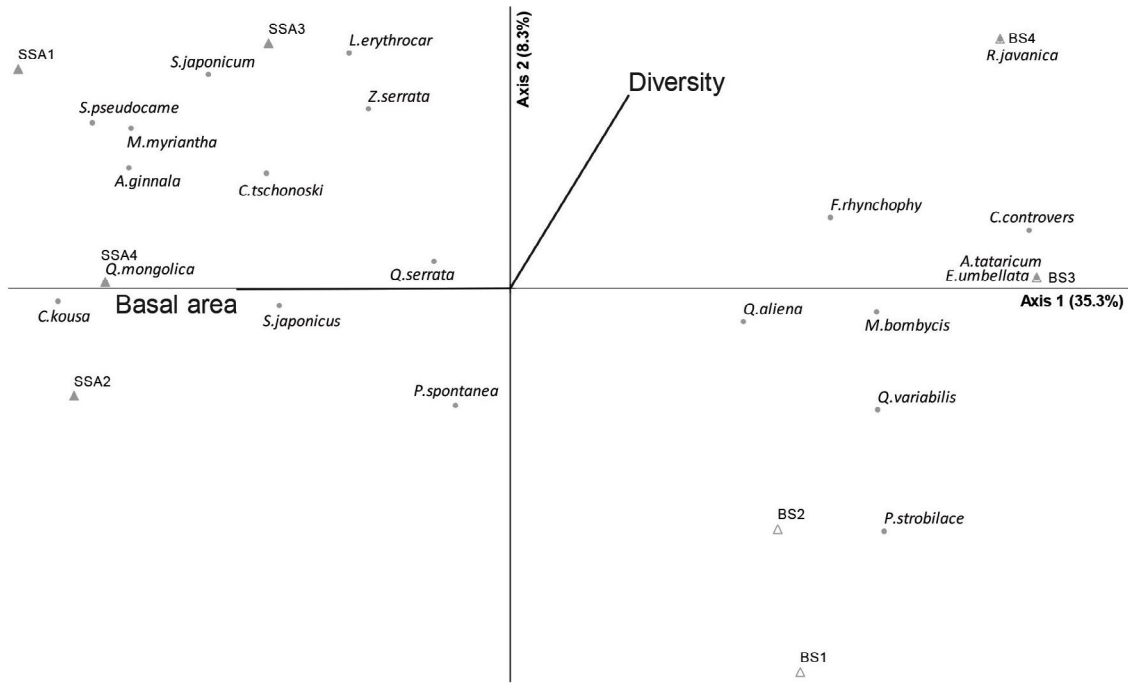


Fig. 3. Proportion of leaf damage for six common tree in two study sites. Index 1: 1~10%, Index 2: 11~25%, Index 3: 26~50%, Index 4: 51~75%, Index 5: 76~100% of leaf area removed by herbivory insects. Chi-squared tests indicated significant differences among CT, QS and SJ at each site ( $P < 0.05$ ). CT: *Carpinus tschonoskii* Maxim., FR: *Fraxinus rhynchophylla* Hance, PS: *Prunus serrulata* var. *spontanea* (Maxim.) E.H.Wilson, Qal: *Quercus aliena* Blume, QS: *Quercus serrata* Murray, SJ: *Styrax japonicus* Siebold & Zucc.

Table 3. Results of stepwise regression analysis of the herbivory rates of total and six common trees in a temperate forest and five environmental variables.

Dependent	R <sup>2</sup>	F	Variables	t
Total herbivores activity	0.60	9.01*	Evenness	-3.00*
Herbivores activity for six common trees	0.84	12.94*	Fisher's alpha	-3.12*
			Evenness	-3.06*



**Fig. 4.** Non-metric multidimensional scaling (NMDS) graph based on six forest stands and five variables (tree diversity, tree evenness, basal area, DBH and aspect). Cutoff level for variables was 0.4 and the graph was rotated 10 degrees. Axis 1 and axis 2 explained 35.3% and 8.3% of the total variances, respectively. Diversity: Fisher's  $\alpha$ , Basal area: total tree basal area with DBH  $\geq$  5 cm.

줄이고 개화 지연 등과 같은 결과를 일으킬 수 있다(Coley and Barone, 1996). 따라서 초식 곤충에 의한 식흔은 충분히 식물에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되며 식물 군집 형성에도 중요한 역할을 한다(Brezzi *et al.*, 2017). 결국 곤충에 의한 식물의 상대적 종 풍부도 변화와 일부 생태계 과정에 미치는 영향은 다시 초식 곤충에 영향을 미치게 되는 순환구조를 지니고 있으므로(Mulder *et al.*, 1999), 초식 곤충의 식흔량을 살펴보는 것은 의미가 있다.

많은 연구에서 식물 종 다양성은 초식 곤충의 종 다양성을 증가시키는 주된 요인이고, 초식동물에 의한 손상 정도에 식물이 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Andow, 1991; Vehviläinen *et al.*, 2007; Brezzi *et al.*, 2017). 반면 이번 연구를 통하여 확인된 결과 식물 다양성이 상대적으로 낮은 곳(site 1)에서 식흔량이 더 많은 것으로 나타나 식물 다양성이 초식 곤충 다양성에 긍정적인 효과보다는 부정적인 효과를 나타낸 것으로 나타났다. 이러한 결과를 토대로 식물 다양성이 상대적으로 높은 site 2에는 초식 곤충이 기주 식물을 찾는 어려움으로 인해 식흔량이 감소하는 기주특이적종(specialist)이 상대적으로 많이 서식하고 있으며, 식물 다양성이 상대적으로 낮은 site 1에는 일반종(generalist)의 비율이 더 많을 것으로 예상할 수 있으며 이에 대한 조사가 필요하다고 생각한다. 식물 다양성 증가의 부정적 요인

을 설명하는 것으로는 식물 다양성 증가는 적절한 자원과 천적을 제공함으로써 초식 곤충의 군집 조절 효율성이 증가하여 나타나는 초식 압력 감소(Alalouni *et al.*, 2014)로 설명할 수 있다고 생각한다.

방형구 안에 분포하는 나무 밀도와 관련된 요인으로 기저단면적은 이번 연구에서 조사된 잎을 씹어먹는 초식 곤충(leaf chewer) 식흔량에 영향을 나타내었다. 브라질에서는 나무 밀도가 잎을 씹어먹는 곤충의 다양성과 풍부도에 영향을 주지 않는 반면 잎의 수액을 빨아먹는 종(sap-sucker)의 다양성과 풍부도는 영향을 주는 것으로 나타났다(Leal *et al.*, 2016). 이러한 경향성은 잎을 씹어먹는 초식 곤충이 수액을 빨아먹는 종에 비해 이동성이 높고, 식생 구조 변화에 덜 민감하기 때문에 나무 밀도의 영향을 적게 받은 것으로 예상되었다(Leal *et al.*, 2016). 감자잎벌레 종류인 *Leptinotarsa juncta*는 기주특이적 종으로 기주 식물의 밀도가 높아질수록 산란수는 줄어드는 부정적인 영향이 나타나 식물 매개(plant-mediated) 효과가 기주 식물과 초식 곤충 시스템에서 산란 패턴에 기여하는 것으로 나타났다(Halpern *et al.*, 2014). 유럽에서 행렬나방인 *Thaumetopoea pityocampa* (Notodontidae) 애벌레에 의해 낙엽이 발생하는 소나무(*Pinus pinaster*)는 기주식물 직경 크기가 증가할수록 행렬나방에 의한 집중도가 증가하며 오래된 임분(stand)에서

에벌레에 의한 집중도가 큰 것으로 나타나(Réglolini *et al.*, 2014) 수목의 밀도와 크기가 초식 곤충 활동량에 영향을 주는 것으로 나타났다.

식물의 생물량(biomass)은 일년생 가지에서 새로 발생한 잎의 수로 측정하였는데 이번 연구에서는 조사 수종에 따라 다른 값을 나타내었다(Table 2). 생물량이 많은 수종은 초식 곤충에게 먹이 자원에 대한 유용성을 제공할 수 있지만 반면에 먹이 자원의 희석 효과(resource dilution)로 인해 초식 곤충 섭식량이 식물 생물량 증가 속도보다 천천히 증가할 수 있다(Brezzi *et al.*, 2017). 공통 수종 일년생 가지에서 새로 발생하는 잎의 수는 site 2보다 site 1에서 더 많았다. 새로 발생하는 잎의 수와 식혼량은 개어나나무와 졸참나무의 식혼량에서 상관이 나타났지만 식혼량에 대한 잎수의 효과는 수종에 따라 다르게 나타났다. 조사지별 식혼량의 차이는 조사지의 사면 효과가 작용한 것으로 생각한다. 이번 연구 조사지인 지리산국립공원의 남사면은 북사면보다 연평균 기온이 더 높고 강수량이 더 많아(Oh and Jee, 2000) 남사면에 위치한 site 1과 북사면에 위치한 site 2에 분포하는 식물의 성장과 발달 차이에 영향을 주었을 것으로 생각된다. 식혼량에 대한 사면의 효과는 개어나나무에서 나타났는데 사면의 위치가 개어나나무의 식혼량에 영향을 준 것으로 생각된다. 다른 사면에 비해 식물의 개엽 시기가 빠른 사면은 초식 곤충의 풍부도를 증가시키는 요인 중 하나가 될 수 있을 것이다.

이번 연구를 통해 온대림에 서식하는 식물을 먹이로 하는 초식 곤충의 식혼량에 영향을 주는 환경 요인으로 밀도와 식물 다양성이 서로 다르게 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 초식 곤충 중 풍부도는 서식지의 면적이나 먹이식물의 분포, 기후 등과 같은 다양한 요인들과 관련이 있고(Kim and Choi, 2014), 기주 식물끼리 같은 종일지라도 잎의 화학적, 물리적 특징들이 상당히 다를 수 있다(Andrew *et al.*, 2012). 식혼량을 결정하는 요인으로 식물 다양성, 고도, 잎의 특징, 미기후적 요소 등과 같은 다양한 요인들이 복합적으로 작용할 것이다. 따라서 초식 곤충에게 영향을 주는 요인을 밝히기 위하여 식물 잎의 화학적 특성(수분함량, C/N 비율: Carbon/Nitrogen ratio, 2차 대사산물)과 물리적 특징(LMA: Leaf mass per area unit) 또는 서식지 온도, 습도와 같은 미기후적 요인(micro environmental factor) 등의 연구도 함께 수행되어야 할 것으로 생각한다. 또한 이번 연구에서 조사되었던 잎을 씹어먹는 초식 곤충(chewer) 이외에 식물의 수액을 빨아먹는 sap-sucker, 잎에 굴을 파는 miner, 혹(충영)을 만드는 galler, 잎살(mesophyll)을 먹는 skeletonizer 등과 같은 다양한 초식 곤충 길드(guild)를 대상으로 한 조사가 필요하다. 초식 곤충의 섭식 활동은 해당 지

역에 서식하는 곤충 종 다양성과 밀접한 연관이 있기 때문에(Kim and Choi, 2014) 지역에 분포하는 곤충 종 다양성 분석을 통해 초식 곤충 활동량과 풍부도를 추정할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 식물을 먹이원으로 하는 초식 곤충 중 많은 비율을 차지하는 나비목 성충과 유충, 초식성 딱정벌레류 등과 같은 초식 곤충 다양성에 대한 조사가 이루어질 필요가 있다.

이번 조사는 0.1 ha 방형구에 분포하는 수목을 대상으로 식혼량 조사를 통해 초식 곤충의 활동량에 영향을 주는 요인을 알고자 하였고 이를 바탕으로 0.1 ha 크기 이상의 면적에 분포하는 초식 곤충의 식혼량을 예측하고자 하였다. 조사에서 사용된 방형구의 크기가 조사지역의 식물상을 대표할 수는 없지만 정량적인 분석이 가능하기 때문에 0.1 ha의 방형구를 사용하였다. 그러나 이번 연구에서 사용된 조사 방법은 수목의 수관부까지 접근하기 어려운 한계가 있어 전반적인 수목의 식혼량 측정이 어려웠고 또한 조사 지점 방형구 안에 분포하는 조사 대상 수종은 조사 지역의 모든 수목을 대표하기는 어렵다. 방형구 안에 분포하는 묘목을 포함한 모든 수종에 대한 전수 조사가 이루어지고, 다양한 고도와 사면에서 식혼 조사가 수행된다면 우리나라 온대낙엽활엽수림에 분포하는 초식 곤충의 활동량과 이에 영향을 주는 요인을 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

## 적 요

산림 생태계에서 초식 곤충은 생물 다양성의 구조와 기능에서 주요한 역할을 담당하는데 알려져 있는 곤충 종 수의 25%를 차지할 정도로 중요한 부분이다. 초식 곤충 중 풍부도와 다양성은 식물 종 다양성과 밀접한 연관을 지니고 있다. 이 연구에서는 우리나라 온대림에 서식하는 초식 곤충 활동량을 나타내는 식혼량이 먹이식물 다양성, 균등도, 나뭇잎 수, 먹이식물 밀도와 관련된 기저단면적(basal area), 흉고직경(DBH)과 어떠한 관련이 있는가를 알고자 하였다. 지리산국립공원 온대낙엽수림에 0.1 ha의 방형구를 두 군데 설치하여 잎을 씹어먹는 초식 곤충(chewer)에 의한 식혼량을 측정하였다. 연구결과 평균 11.2% ( $\pm 1.76\%$ )의 식혼 발생량을 확인하였고, 조사 지역 중 식물 다양성이 높은 곳보다 낮은 곳에서 식혼량이 더 많았다. 또한 한국 남부 온대림에서 초식 곤충 활동에는 밀도 요인인 기저단면적이 긍정적으로 작용하는 것을 알 수 있었다. 추후 온대 낙엽활엽수림의 영양 단계(trophic level)에서 초식 곤충의 여러 길드가 어떤 작용으로 영향을 받는가에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.

## 사 사

이 연구를 위하여 야외에서 채집에 도움을 준 목포대학교 환경생태학실험실 신보라, 이재영, 장범준, 노동호, 멸종위기종 복원센터 이진 박사님과 식물 동정을 해준 목포대학교 한약자원학과 김휘 교수님께 감사합니다. 이 연구는 한국연구재단(2018R1 D1A1B07046637)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Alalouni, U., R. Brandl, H. Auge and M. Schädler. 2014. Does insect herbivory on oak depend on the diversity of tree stands? *Basic and Applied Ecology* **15**: 685-692.
- Andow, D.A. 1991. Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology* **36**: 561-586.
- Andrew, N.R. and L. Hughes. 2005. Herbivore damage along a latitudinal gradient: relative impacts of different feeding guilds. *Oikos* **108**: 176-182.
- Andrew, N.R., I.R. Roberts and S.J. Hill. 2012. Insect herbivory along environmental gradients. *Open Journal of Ecology* **2**: 202-213.
- Basset, Y. 1999. Diversity and abundance of insect herbivores collected on *Castanopsis acuminatissima* (Fagaceae) in New Guinea: Relationships with leaf production and surrounding vegetation. *European Journal of Entomology* **96**: 381-391.
- Bernays, E.A., K.L. Bright, N. Gonzalez and J. Angel. 1994. Dietary mixing in a generalist herbivore: Tests of two hypotheses. *Ecology* **75**: 1997-2006.
- Brezzi, M., B. Schmid, P.A. Niklaus and A. Schuldt. 2017. Tree diversity increases levels of herbivore damage in a subtropical forest canopy: evidence for dietary mixing by arthropods? *Journal of Plant Ecology* **10**: 13-27.
- Choi, S.W. and J.S. An. 2010. Altitudinal distribution of moths (Lepidoptera) in Mt. Jirisan National Park, South Korea. *European Journal of Entomology* **107**: 229-245.
- Coley, P.D. and J.A. Barone. 1996. Herbivory and plant defenses in tropical forests. *Annual Review of Ecology and Systematics* **27**: 305-335.
- Cuevas-Reyes, P., M. Quesada, P. Hanson, R. Dirzo and K. Oyama. 2004. Diversity of gall-inducing insects in a Mexican tropical dry forest: the importance of plant species richness, life-forms, host plant age and plant density. *Ecology* **92**: 707-716.
- Czeszczewik, D., K. Zub, T. Stanski, M. Sahel, A. Kapusta and W. Walankiewicz. 2015. Effects of forest management on bird assemblages in the Bialowieza Forest, Poland. *iForest-Biogeosciences and Forestry* **8**: 377-385.
- Ebeling, A., S.T. Meyer, M. Abbas, N. Eisenhauer, H. Hillebrand, M. Lange, C. Scherber, A. Vogel, A. Weigelt and W.W. Weisser. 2014. Plant diversity impacts decomposition and herbivory via changes in aboveground arthropods. *PLOS One* **9**: e106529.
- Haddad, N.M., D. Tilman, J. Haarstad, M. Ritchie and J.M. Knops. 2001. Contrasting effects of plant richness and composition on insect communities: a field experiment. *The American Naturalist* **158**: 17-35.
- Halpern, S.L., D. Bednar, A. Chisholm and N. Underwood. 2014. Plant-mediated effects of host plant density on a specialist herbivore of *Solanum carolinense*. *Ecological Entomology* **39**: 217-225.
- Hammer, Ø., D.A.T. Harper and P.D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleaeontologica Electronica* **4**: 1-9.
- Hiura, T. and M. Nakamura. 2013. Different mechanisms explain feeding type-specific patterns of latitudinal variation in herbivore damage among diverse feeding types of herbivorous insects. *Basic and Applied Ecology* **14**: 480-488.
- Jactel, H. and E.G. Brockerhoff. 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* **10**: 835-848.
- Jeffries, J.M., R.J. Marquis and R.E. Forkner. 2006. Forest age influences oak insect herbivore community structure, richness, and density. *Ecological Applications* **16**: 901-912.
- Kambach, S., I. Kühn, B. Castagnyrol and H. Bruelheide. 2016. The impact of tree diversity on different aspects of insect herbivory along a global temperature gradient-A Meta-analysis. *PLOS One* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165815>.
- Kim, J.J., J.W. Kim, H.R. Jung, J.M. Chung, M.Y. Kang, M.G. Cho and H.S. Moon. 2012. Analysis of Acorn Production of *Quercus* spp. in Mt. Jiri National Park. *Journal of Agriculture and Life Science* **46**: 1-8.
- Kim, N.H. and S.W. Choi. 2014. Seasonal and elevational pattern of herbivore's feeding activity in temperate deciduous forest. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 24-31.
- Kudo, G. 1996. Herbivory pattern and induced responses to simulated herbivory in *Quercus mongolica* var. *grosseserrata*. *Ecological Research* **11**: 283-289.
- Leal, C.R.O., J.O. Silva, L. Sousa-Souto and F. Neves. 2016. Vegetation structure determines insect herbivore diversity in seasonally dry tropical forests. *Journal of Insect Conservation* **20**: 979-988.
- Lewinsohn, T.M. and T. Roslin. 2008. Four ways towards tropical herbivore mega diversity. *Ecology Letters* **11**: 398-416.
- Lim, K.Y., T.H. Kim and J.S. Kwak. 1992. Distribution of millipedes in relation to altitude and flora on Mt. Chiri. *Korean Journal of Ecology and Field Biology* **15**: 329-335.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 2016. PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data. Version 7. MjM Software design,



- Gleneden Beach, Oregon, U.S.A.
- Mulder, C.P., J. Koricheva, K. Huss-Danell, P. Högberg and J. Joshi. 1999. Insects affect relationships between plant species richness and ecosystem processes. *Ecology Letters* **2**: 237-246.
- Nakamura, M., T. Hina, E. Nabeshima and T. Hiura. 2008. Do spatial variation in leaf traits and herbivory within a canopy respond to selective cutting and fertilization? *Canadian Journal of Forest Research* **38**: 1603-1610.
- Novotny, V., P. Drozd, S.E. Miller, M. Kulfan, M. Janda, Y. Basset and G.D. Weiblen. 2006. Why are there so many species of herbivorous insects in tropical rainforests? *Science* **313**: 1115-1118.
- O'Brien, M.J., M. Brezzi, A. Schuldt, J. Zhang, K. Ma, B. Schmid and P.A. Niklaus. 2017. Tree diversity drives diversity of arthropod herbivores, but successional stage mediates detritivores. *Ecology and Evolution* **7**: 8753-8760.
- Oh, K.K. and Y.K. Jee. 2000. Plant community structure by aspect and altitude at eastern district in Chirisan National Park. *Korean Journal of Environment and Ecology* **14**: 67-79.
- Régolini, M., B. Castagnyrol, A.M. Dulaurent-Mercadal, D. Piou, J.C. Samalens and H. Jactel. 2014. Effect of host tree density and apparency on the probability of attack by the pine processionary moth. *Forest Ecology and Management* **334**: 185-192.
- Root, P.B. 1973. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs* **43**: 95-120.
- Schuldt, A., M. Baruffol, M. Böhnke, H. Brulheide, W. Härdtle, A.C. Lang, K. Nadrowski, G. Oheimb, W. Voigt, H. Zhou, T. Assmann and J. Fridley. 2010. Tree diversity promotes insect herbivory in subtropical forests of south-east China. *Ecology* **98**: 917-926.
- Siemann, E., D. Tilman, J. Haarstad and M. Ritchie. 1998. Experimental tests of the dependence of arthropod diversity on plant diversity. *The American Naturalist* **152**: 738-750.
- Strong, D.R., J.H. Lawton and S.R. Southwood. 1984. Insects on plants: Community patterns and mechanisms. Harvard University Press, Cambridge.
- Suzuki, M. and T. Hiura. 2000. Allometric differences between current-year shoots and large branches of deciduous broad-leaved tree species. *Tree Physiology* **20**: 203-209.
- Vehviläinen, H., J. Koricheva and K. Ruohoäki. 2007. Tree species diversity influences herbivore abundance and damage: meta-analysis of long-term forest experiments. *Oecologia* **152**: 287-298.