

〈Original article〉

## 동해안의 산불피해지역에서 참나무 잎 생산량과 초식 피해의 관계

이경신 · 홍보람 · 이규송\*

강릉원주대학교 자연과학대학 생물학과

## Relationship between Damage by Herbivore and Leaf Production of Oaks in the Burnt Area of the East Coastal Region, Korea

Kyoung Sin Lee, Bo Ram Hong and Kyu Song Lee\*

Department of Biology, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Republic of Korea

**Abstract** - We analyzed the effects of spatio-temporal variation in the leaf production of oaks on the density and species richness of herbivores, as well as the consumption by herbivores in the east coastal region of Korea, which is an area that has been damaged by forest fires. The main herbivore that feeds on oak leaves was moth larvae. In mid-August the insect larvae showed the highest density and species richness. Approximately 60.5% of total plant-eating insect larvae were present from August to September 2011. Oak leaf production was at its peak from July to August, and the peak damage caused by herbivores was from August to September. Depending on the investigation timing and site of the survey, oak leaf production, larval densities, and species richness showed large variations. The average production of oak leaves between July and August was estimated to be 0.96 ton ha<sup>-1</sup>. The production of oak leaves during this period also showed spatial variations ranging from 0.34 to 1.89 ton ha<sup>-1</sup>. In August, the consumption of oak leaves by the herbivores showed spatial variations ranging from 0.15 to 1.51 ton ha<sup>-1</sup>. Where oak leaves had a higher yield, they tended to increase in density and species richness of the herbivores. As the production of oak leaves increased, so did the overall consumption and consumption rate by the herbivores. This means that the production of oak leaves is highly related to time and space, and there is a concentration response in which the new individuals gather. Research into the spatio-temporal heterogeneity of the food sources and their effects on the higher levels of the food web can help us quantitatively understand and evaluate the structure and functions of the burnt ecosystem that is caused by forest fires.

**Keywords** : concentration response, forest fire, herbivory, larvae, moth

### 서 론

초식은 생태계 먹이망에서 살아있는 생산자로부터 1차 소비자로 에너지를 전이시키는 과정으로 군집구성에 매우 큰 영향을 미친다 (Hunter *et al.* 1997; Peter and McEvoy 2002;

Smith and Smith 2011). 초식은 부영양화의 원인인 질소원의 증가 (Tuomi *et al.* 1984; Fragoyiannis *et al.* 2001)와 기후변화에 따른 생물의 반응과 분포에 대한 이해를 도울 수 있는 연구 주제이다 (Berry and Bjorkman 1980; Peter and McEvoy 2002; Adams *et al.* 2011).

초식과 관련한 주요 연구 주제로 초식 자체에 대한 식물의 적응과 반응에 대한 연구 (Feeny 1976; Murdock and

\* Corresponding author: Kyu Song Lee, Tel. 033-640-2311, Fax. 033-640-2867, E-mail. leeks84@gwnu.ac.kr

Shade 2002; Mizumachi *et al.* 2004), 식물의 계절현상과 이에 따른 방어물질의 구성성분 변화(Archibold 1995; Mopper and Simberloff 1995; Hilker and Meiners 2002), 주요 구성종간 초식 상호작용의 비교(Cates 1980; Gavin and Peart 1997; Maarten *et al.* 1997), 토양조건, 빛 조건, 수관층의 구조 등과 같은 입지환경요인에 따른 초식의 영향(Forkner *et al.* 2004; Kim 2008), 산불, 가뭄, 폭우 등의 교란이 초식에 미치는 영향(Kaplan and Gutman 1999; Rieske 2002; Rieske *et al.* 2002), 식물의 계절학적 특성 변화에 대한 초식동물의 동조 혹은 공진화 관계에 대한 연구(Miller and Miller 1986; Archibold 1995; Maarten *et al.* 1997), 초식관계를 이용한 생태계구성 원리의 이해를 바탕으로 한 생태계 관리에 대한 연구(Benson *et al.* 1975; Peter and McEvoy 2002) 등이 있다. 최근에는 이산화탄소 증가에 따른 기후변화가 초식에 미치는 영향(Coley and Barone 1996; Stiling *et al.* 2002; Kopper and Lindroth 2003) 등과 같이 기후변화와 연계된 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

생태계의 먹이망과 에너지 흐름에 대한 이해를 위하여, 생태계의 적절한 복원과 관리를 위하여 그리고 환경변화와 기후변화에 대한 생태계의 반응에 대한 이해를 위하여 초식에 대한 연구는 매우 중요하다(Hester *et al.* 2000; Peter and McEvoy 2002; Adams *et al.* 2011). 특정 생태계에서 방목먹이연쇄와 부니먹이연쇄 과정의 비율은 생태계의 구조와 기능에 큰 영향을 미친다(Smith and Smith 2011). 그러나 두 과정의 상대적 비율과 중요성이 정량적으로 연구가 이루어

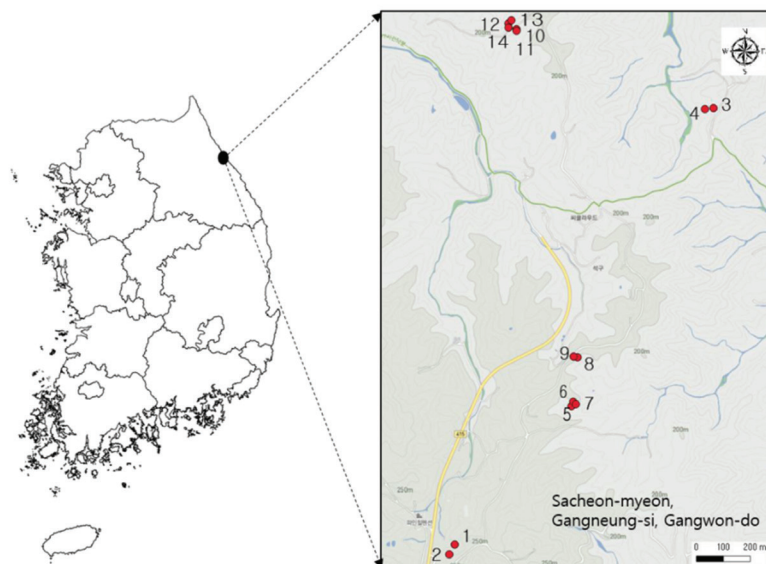
진 것은 매우 적다. 특정 생태계에서 초식량에 대한 정량적인 평가는 그 생태계가 부양하는 1차 소비자의 수를 추정할 수 있게 해주고, 그로 인한 생태계 구성을 평가하고 이해하는 기초가 된다. 또한 식물 중에 대한 차별적 초식과 초식량의 상대적인 변화는 식물군집구조의 동태에 큰 영향을 미친다(Lee 2012).

본 연구에서는 동해안의 산불피해지역에서 1) 계절에 따른 참나무 잎을 초식하는 유충들의 변화를 파악하고, 2) 산불발생 후 공간적으로 달라지는 참나무 잎의 생산량이 초식동물의 밀도와 초식비율에 미친 영향을 파악하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

본 연구는 강원도 2000년 4월 7일에 산불이 발생한 강릉시 사천면 노동리에서 이루어졌다(Fig. 1). 본 조사지역은 중생대 쥐라기에 형성된 흑운모화강암으로 구성되어 있다(<http://www.kigam.re.kr>). 강릉시의 연평균 기온은 13.1°C 이었고, 연평균 강수량은 1464.5 mm이었으며, 최난월의 평균기온은 28.3°C이었고, 최한월의 월평균 기온은 -3.2°C 이었다(<http://www.kma.go.kr>). 이 지역의 산불피해 면적은 1,447 ha이었는데, 산불 전 주요 식생은 소나무림으로 주요 종이산지이었다(Lee 2012). 이 지역의 산불 전 식생은 소나무 65%, 참나무 26% (신갈나무 16.7%, 졸참나무 4.6%, 굴참



**Fig. 1.** Layout of permanent plots for this survey located in the east coastal region of Korea. Un-burnt pine forest (1, 2), Natural regeneration sites after forest fire (3, 4), Terrace sodding work sites after forest fire (5, 6, 7), and Pine plantation site after forest fire (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14).

**Table 1.** Criteria of classes of herbivory damage caused by insect larvae chewing on oak leaves in the east coastal region, Korea

Class of damage	Mean damage (%)	Damage rate on intact leaf	Definition of each class
0	0.0	0	No damage
1-1	0.5		less than 1% damage in a leaf
1-2	4.7	< 1/6	1% ≤ damage rate < 8.3%
1-3	12.5		8.3% ≤ damage rate < 16.7%
2	25.0	1/6 ≤ and < 2/6	16.7% ≤ damage rate < 33.3%
3	41.2	2/6 ≤ and < 3/6	33.3% ≤ damage rate < 50%
4	58.3	3/6 ≤ and < 4/6	50% ≤ damage rate < 66.6%
5	75.0	4/6 ≤ and < 5/6	66.6% ≤ damage rate < 83.3%
6	91.7	5/6 <	more than 83.3% damage in a leaf

나무 5.9%), 그리고 기타 수종이 9%이었다(Lee 2003). 본 조사지에서는 산불피해 후 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미에 의한 산사태 및 토사유출의 2차 피해가 발생하였다. 연구대상지역은 북위 37°48'49.2"~37°49'34.6", 동경 128°48'02.6"~128°49'43.7"의 범위에 분포하였고, 해발고도는 158 m~253.5 m의 범위에 분포하고 있다(Fig. 1, Table 2). 한랭지수(CI)의 범위는 -24.9~-28.5°C·month 그리고 온량지수(WI)의 범위는 88.0~91.3°C·month로 냉온대 중부삼림대(III: WI 100-85)에 속하였다(Yang and Shim 2005). 본 조사지의 잠재 증발산량은 381.4~395.5 mm yr<sup>-1</sup>로서 대한민국의 평균 잠재증발산량(PE)인 708.8±49.7 mm yr<sup>-1</sup>보다 현저히 낮았다(Yang 2001). 본 조사지에는 산불미발생지, 산불 후 화재목을 벌목하고 지면을 고른 후 선포입하기 공법으로 녹화가 이루어진 녹화사방지, 산불 후 화재목을 제거한 후 방치하여 참나무 맹아가 우점한 자연방치지 그리고 산불 후 화재목을 벌목한 후 소나무를 조립한 소나무조립지의 네 가지 식생 유형이 모자이크상으로 혼재하고 있다. 그러나 산불 전 송이산지이기 때문에 송이를 위한 소나무조립지가 가장 넓은 지역을 차지하고 있다. 또한 고속도로변을 중심으로 일부 지역에 대하여 경관조림용 낙엽수들을 식재한 곳도 있다. 산불 이후 녹화사방지는 초기 녹화시기에만 관리가 이루어졌고, 소나무조립지와 경관조림지는 산불 이후 지속적으로 하예작업 등과 같은 관리 작업이 행해졌다. 이러한 다양한 조건과 인간의 간섭은 산불 이후 소나무 단순림이었던 이 지역에서 식생 이질성을 야기하는 주요요인이다.

## 2. 연구 방법

### 1) 영구방형구의 설치

연구를 위하여 산불미발생지(UBP) 1개소, 녹화사방지(BTS) 1개소, 자연방치지(BNQ) 1개소 그리고 소나무 조립지(BCP) 3개소의 6지소를 선정하였다. 6개의 지소에서 각각 2~3개씩 총 14개의 영구방형구(25 m<sup>2</sup>)를 설치하였다(Fig. 1). 설치한 영구방형구는 산불 미발생지에서 2개, 녹화사방지

에서 3개, 자연방치지에서 2개 그리고 소나무조립지에서 7개였다. 본 연구에서 각각의 조사지소와 영구방형구의 위치를 선정할 때 고려한 요인은 산불 후 복구방법, 지형, 입지요인, 재생되는 식생의 양, 소나무의 분포 및 분포하는 참나무의 종류와 우점도 등이었다. 영구방형구는 5 m×5 m 크기로 참나무가 개화하기 전인 2011년 4월에 설치하였다. 각 방형구에서 출현한 모든 참나무 개체에 대하여 고유번호를 부여하고, 다시 각 개체에서 출현한 맹아를 확인하여 번호표를 부착하였다. 조사기간 중에 새로이 출현하는 참나무 맹아에 대해서도 지속적으로 번호표를 추가로 부착하여 관찰하였다.

### 2) 조사시기

각각의 영구방형구에서 2011년 4월부터 2011년 10월까지 초식곤충의 조사는 7회를 그리고 참나무 잎의 생산량과 초식 피해율은 5회를 조사하였다. 초식곤충의 조사는 태양력일로 118일, 138일, 166일, 197일, 228일, 259일 및 294일에 조사하였다. 참나무 잎의 생산량과 초식 피해율은 태양력일로 128일, 159일, 207일, 241일 및 294일에 조사하였다. 초식곤충의 종수와 개체 수는 14개 방형구에서 조사하였다. 참나무 잎의 생산량과 초식된 잎의 양은 11개 영구방형구(산불 미발생지 2개, 자연방치지 2개, 녹화사방지 2개 그리고 소나무조립지 5개)에서 모든 참나무를 대상으로 조사하였다. 초식곤충과 참나무 잎에 대한 조사는 조사시기마다 3~5일 정도 소요되었다. 자료정리를 위해 사용한 태양력일은 각각의 조사시기에서 조사를 시작한 첫 번째 날이다.

### 3) 초식곤충군집 조사

총 14개의 영구방형구에서 각 조사시기에 참나무를 씹어 먹는 초식 곤충은 참나무 잎을 먹이원으로 하는 모든 유충을 조사하였다. 초식곤충의 출현종수와 유충의 밀도를 조사시기별로 구하였다. 조사지 내에 출현한 모든 초식곤충을 분류할 수 없었으나 출현한 모든 종에 대한 사진자료를 Lee (2012)의 부록에 제시하였다. 유충의 분류는 여러 가지 도감과 사이트를 참고로 하였다(Shin 2006, 2007; Sohn 2006; Lee 2012, <http://www.jpmoth.org>). 조사시기마다 출현한 초

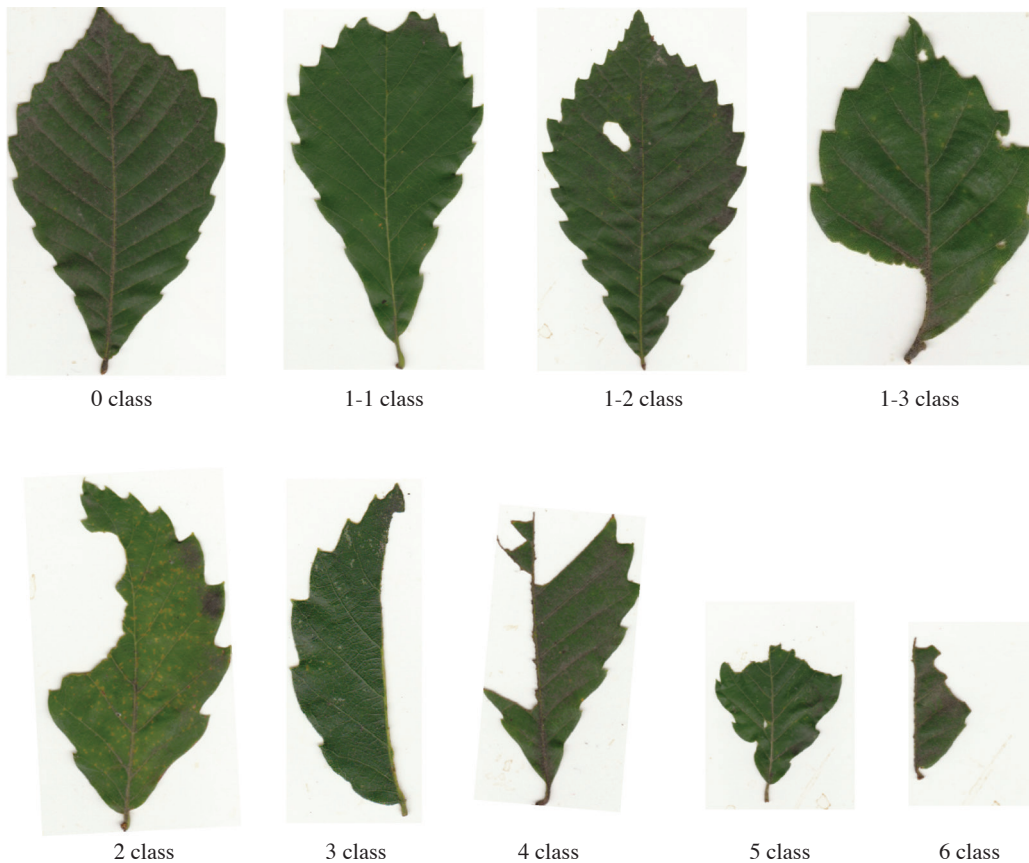


Fig. 2. Example of the determination of damage classes by herbivores on leaves of *Quercus serrata* based on Table 1.

식곤충군집 간 유사성을 평가하기 위하여 Sørensen 유사도 지수를 구하였다.

$$\text{Sørensen 유사도지수} = 2C / (A + B)$$

여기에서 C는 두 군집에서 모두 출현한 종수를, A와 B는 비교대상 군집의 구성종수를 의미한다.

#### 4) 참나무 잎의 생산량 산출

조사지에서 출현한 참나무 4종(굴참나무, 떡갈나무, 졸참나무 및 신갈나무)의 잎을 조사시기별로 영구방형구 밖에서 20~35장의 잎을 수거한 후 장축과 단축의 길이를 측정하였고, 그것의 평균 크기를 구하였다. 4종의 참나무별로 다양한 크기의 잎을 이용하여 장축과 단축을 측정한 후 각 개체별로 스캔하여 잎의 면적을 구하였다. 조사지에서 출현한 참나무 4종의 잎 면적( $\text{cm}^2$ )을 구하는 공식은 다음과 같다. X는 각 종별로 조사시기별로 실제 측정한 잎의 장축×단축의 곱( $\text{cm}^2$ )이다. 이를 이용하여 조사시기별로 방영구내 참나무 잎의 총수와 평균의 장축×단축의 곱( $\text{cm}^2$ )을 이용하여 전체 영구방형구내 참나무 잎의 면적을 산출하였다. 또한 각 조사

시기와 조사지별로 4종의 참나무 잎을 수거하여 80°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시켜 잎의 평균 건조량을 구하였다. 영구방형구별로 조사한 총 잎 수와 잎의 평균 건조량을 이용하여 단위면적당 평균 잎의 생산량을 추정하였다. 또한 초식량을 추정하기 위하여 종별로 조사시기별로 잎의 면적과 잎의 건조량의 관계를 구하였다.

- ① 굴참나무( $Q_v$ ) =  $0.8852X + 0.1881$  ( $r^2 = 0.9985, n = 40$ )
- ② 떡갈나무( $Q_d$ ) =  $0.6225X + 4.5181$  ( $r^2 = 0.9402, n = 40$ )
- ③ 신갈나무( $Q_m$ ) =  $0.6498X + 0.8241$  ( $r^2 = 0.9939, n = 40$ )
- ④ 졸참나무( $Q_s$ ) =  $0.6597X + 0.2483$  ( $r^2 = 0.9956, n = 40$ )

#### 5) 참나무의 초식 피해 분석

참나무 잎의 초식 피해 면적은 9가지 등급으로 구분하였다(Table 1). 피해를 전혀 입지 않은 경우를 0등급으로 구분하였다. 초식 피해율이 잎 크기의 1/6보다 적게 피해를 입은 것을 1등급으로 구분하였는데, 초식 피해율을 기준으로 1% 미만, 1%~8.3% 미만 및 8.3%~16.7% 미만의 피해를 입은 것을 각각 1-1등급, 1-2등급, 1-3등급으로 구분하였다. 2

**Table 2.** Changes in the number of major chewing insect larvae chewing on oak trees in the east coastal region, Korea

Species	Investigation time (Julian day)							Total
	Apr. 28 (118)	May 18 (138)	Jun. 15 (166)	Jul.16 (197)	Aug. 16 (228)	Sep. 16 (259)	Oct. 21 (294)	
Sp. 1	Zyaenidae sp. 알락나방과	18	45	28	3	4	4	102
Sp. 2	<i>Cifuna locuples</i> 콩독나방	5	20	4	2		5	36
Sp. 3	<i>Euproctis similis</i> 흰독나방	7	11	6		1	2	27
Sp. 4	<i>Phalera grotei</i> 배얼룩재주나방			1	8	38		47
Sp. 5	<i>Fentonia ocypete</i> 밤나무재주나방					23		23
Sp. 6	Notodontidae sp. 재주나방과					45	33	78
Sp. 9	Notodontidae sp. 재주나방과			1	2	34		37
Sp. 12	<i>Phalera assimilis</i> 참나무재주나방					129		129
Sp. 14	Geometridae sp. 자나방과					39		39
Sp. 17	<i>Clanis bilineata</i> 콩박각시			7		24		31
Sp. 20	<i>Latoia consocia</i> 장수쟁기나방			3	9	351		363
Sp. 21	<i>Smerinthus caecus</i> 버들박각시					24		24
Sp. 22	<i>Peridea gigantea</i> 곤은줄재주나방					35		35
Sp. 26	<i>Arichanna melanaria</i> 뿔노랑점가지나방	24	44	51	6			125
Sp. 30	Geometridae sp. 자나방과		10	11	19	27		67
Sp. 39	Limacodidae sp. 썩기나방과					32	7	39
Sp. 41	Noctuidae sp. 밤나방과				224	1		225
Sp. 42	<i>Arctornis album</i> 상제독나방		2	8		10		20
Sp. 46	<i>Parabapta clarissa</i> 연푸른가지나방			8	12	8		28
Sp. 49	<i>Negritothripa hamptoni</i> 흰무늬겹질람나방				20			20
Sp. 53	<i>Austrapoda dentata</i> 흰점쟁기나방					22	2	24
Sp. 65	<i>Narosaideus flavidorsalis</i> 배나무쟁기나방					23		23
Sp. 66	Thyatiridae sp. 뽕족날개나방과					12	9	21
Sp. 69	<i>Agnidra scabiosa</i> 참나무갈고리나방			2	2	21	4	29
Sp. 80	Geometridae sp. 자나방과				39			39
Sp. 92	<i>Euproctis subflava</i> 독나방		46		3	3		52
Sp. 93	<i>Hypomecis punctinalis</i> 네눈가지나방		5			27		32
Sp. 105	Gracillariidae sp. 가는나방과					10	14	24
	Others	15	37	36	71	302	18	481
	Total	69	220	166	420	1245	98	2220

등급, 3등급, 4등급, 5등급 및 6등급은 각각 전체 잎 크기의 1/6~1/3, 1/3~1/2, 1/2~2/3, 2/3~5/6 및 5/6 이상의 피해를 입은 것을 기준으로 구분하였다(Table 1). Fig. 2는 줄참나무의 예를 들어 참나무 잎의 초식 피해 등급을 나타낸 것이다. Table 1을 이용하여 각 조사시기별로 영구방형구내 모든 참나무 잎을 대상으로 초식 피해등급을 조사하였다. 이를 이용하여 영구방형구별로 초식된 참나무 잎의 면적을 구한 후 잎의 면적과 건중량의 관계를 이용하여 방형구당 참나무 잎의 초식량을 구하였다.

## 결 과

### 1. 계절에 따른 초식곤충의 변화

강릉시 사천면 지역에 설치한 14개 영구방형구(총 면적 350 m<sup>2</sup>)에서 1년간 관찰한 초식곤충의 유충의 총 종수와 개

**Table 3.** Sørensen similarity index among seasonal insect larval communities on oak trees in the east coastal region of Korea.

Julian day	Apr. 28	May 18	Jun. 15	Jul. 16	Aug. 16	Sep. 16
118						
138	0.65					
166	0.19	0.22				
197	0.13	0.21	0.52			
228	0.11	0.22	0.38	0.41		
259	0.25	0.17	0.30	0.20	0.29	
294	0.00	0.00	0.06	0.00	0.03	0.13

체 수는 각각 106종류와 2,220개체이었다(Table 2). 본 조사에서 출현한 일부 종에 대한 동정을 하지 못하였다. 따라서 잠정적으로 종의 이름을 종1~종106까지 일련번호를 주었고, 동정이 이루어진 종은 종명을 제시하였고, 동정을 못한 종은 과명을 제시하였다. 현장에서 확인한 각 종별로 사진을 찍었고, 그것을 Lee (2012)의 부록에 수록하였다. Table 2

에는 출현한 106종 중 연간 출현한 개체수가 20개체 이상인 종만을 정리하여 제시하였다.

강릉시 사천면 지역에서 씹어 먹는 초식 곤충의 유충이 처음으로 관찰된 시기는 4월 25일이었다. 참나무 잎을 씹어 먹는 초식 곤충의 개체수는 4월 28일, 5월 18일, 6월 15일, 7월 16일, 8월 16일, 9월 16일 및 10월 21일(태양력 일수 118, 138, 166, 197, 228, 259 및 294일)에 각각 69, 220, 166, 420, 1245, 98 및 2마리로 8월 16일경에 초식곤충의 유충이 가장 많이 출현하였다(Table 2). 본 조사지역에서 출현한 전체 유충의 60.5%가 8월과 9월에 출현하였다. 7월부터 9월까지 여름시기에 출현한 유충의 수는 전체 출현 유충의 79.4%이었다(Table 2).

Fig. 2는 Table 2의 자료에 근거해서 조사시기에 따른 참나무 잎을 씹어 먹는 곤충 유충의 종수 변화를 나타낸 것이다. 참나무 잎을 씹어 먹는 초식 곤충의 종수는 4월 28일, 5월 18일, 6월 15일, 7월 16일, 8월 16일, 9월 16일 및 10월 21일(태양력 일수 118, 138, 166, 197, 228, 259 및 294일)에 각각 10, 21, 33, 36, 77, 14 및 1종으로 8월 16일에 가장 많은 종수가 출현하였고, 9월 16일에는 급속하게 종수가 감소하였다. 6월과 7월에는 30~40종 수준을 유지하였다.

Table 3은 강릉시 사천면 지역에서 4월 28일, 5월 18일, 6

월 15일, 7월 16일, 8월 16일, 9월 16일 및 10월 21일(태양력 일수 118, 138, 166, 197, 228, 259 및 294일)에 조사된 참나무를 씹어 먹는 곤충 유충의 군집 간 Sørensen의 유사도 지수를 정리한 것이다. 조사기간 중 가장 유사한 군집구조를 나타내는 시기는 유사도 지수 0.65를 나타낸 4월 28일(태양력 일수 118일)과 5월 18일(태양력 일수 138일)이었다. 두 번째로 유사도 지수가 높은 시기는 유사도 지수 0.52를 나타낸 6월 15일(태양력 일수 116일)과 7월 16일(태양력 일수 197일)이었다. 6~8월 사이의 유사도 지수는 0.38~0.52 정도로 다른 시기보다 상대적으로 높았다. 가장 높은 유사도 지수를 나타낸 이 두 시기 간에도 유사도 지수는 낮은 편이었고, 나머지 모든 조사기간 간의 유사도 지수는 대단히 낮았다. 결론적으로 본 조사지역에서 참나무 잎을 씹어 먹는 곤충의 유충군집은 시기에 따라 다른 군집으로 발달한다고 할 수 있고, 상대적으로 종수와 개체수가 집중되는 여름시기에 유사한 군집이 형성된다고 할 수 있다. 그러나 여름시기 간에도 유사도 지수는 0.5 미만으로 짧은 기간에도 유충군집의 변화가 크다고 할 수 있다(Table 3).

Fig. 3은 14개 영구방형구에서 조사된 참나무 잎을 씹어 먹는 초식곤충의 연간 출현 밀도와 연간 출현 종수와의 관계를 나타낸 것이다. 조사지소마다 연간 출현한 초식곤충의

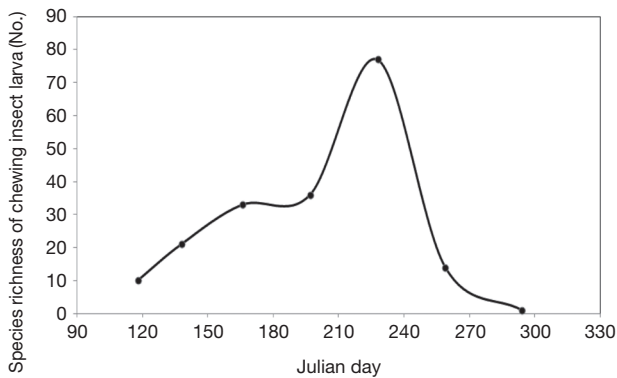


Fig. 3. Seasonal changes in species richness (number) of chewing insect larvae in the east coastal region of Korea.

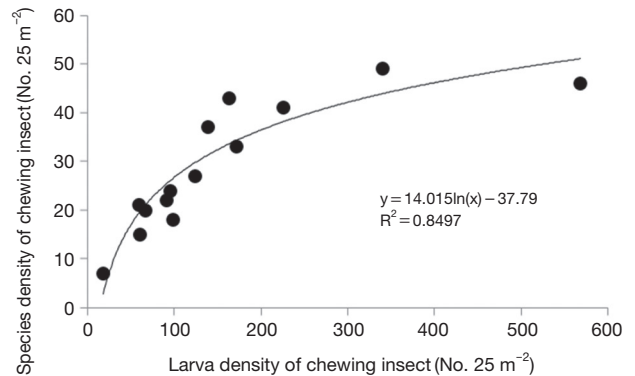
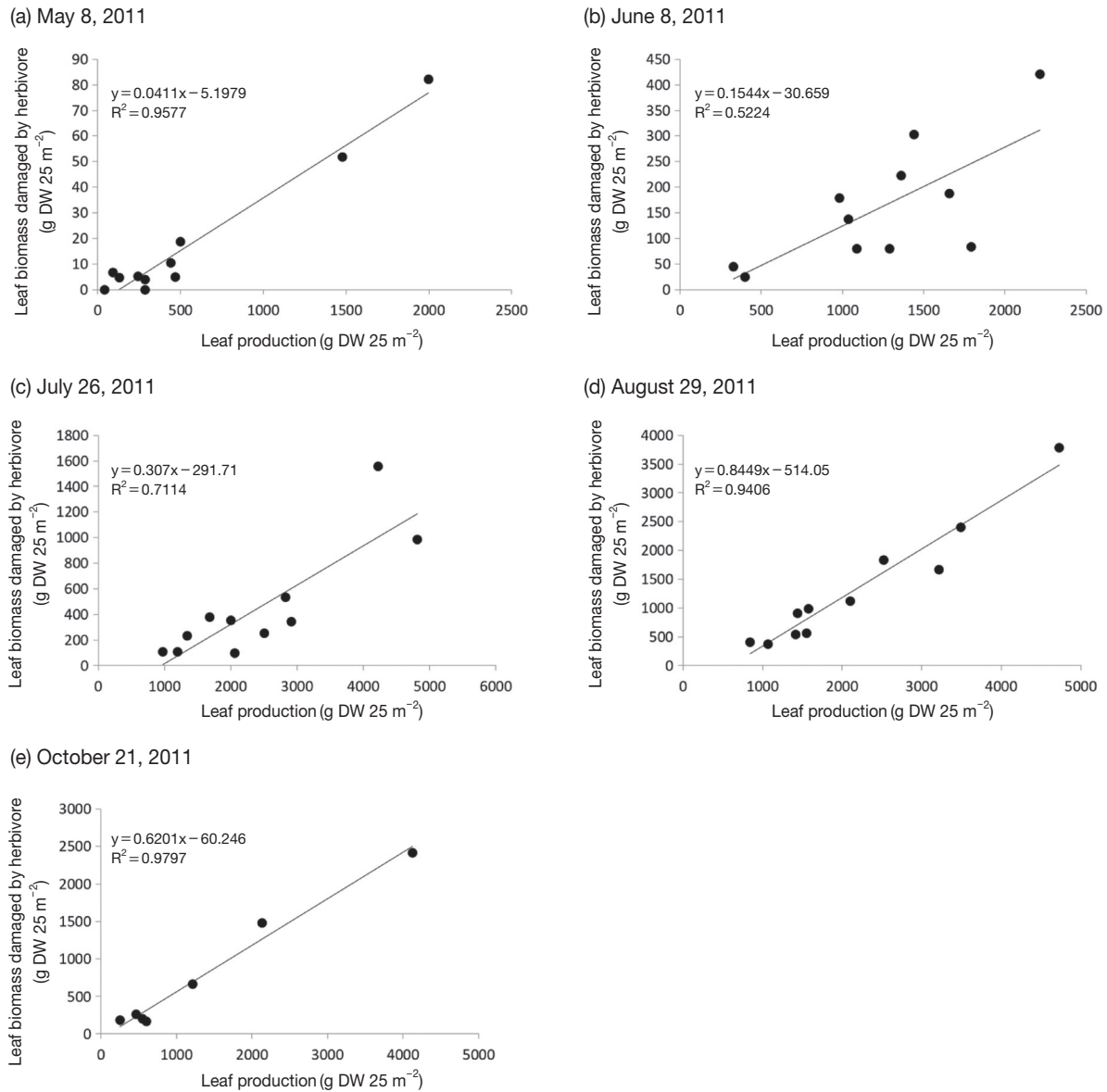


Fig. 4. Relationship between the annual larva density and species density of insect larvae (No. 25 m<sup>-2</sup>) that chew on oak trees in the east coastal region of Korea.

Table 4. Seasonal changes in oak leaf production, the oak leaf biomass damaged by herbivores, and the percentage of leaf biomass damaged by herbivores in the east coastal region of Korea (Mean ± Standard deviation, n = 11)

Investigation time	Julian day	Oak leaf production (g DW 25 m <sup>-2</sup> )	Oak leaf biomass damaged by herbivores (g DW 25 m <sup>-2</sup> )	Percentage of leaf biomass damaged by herbivore (%)
May 8, 2011	128	542.3 ± 620.6	17.1 ± 26.1	2.6 ± 2.1
June 8, 2011	159	1235.7 ± 561.9	160.1 ± 120.0	12.4 ± 5.8
July 26, 2011	207	2412.2 ± 1225.1	448.8 ± 445.9	16.4 ± 8.7
August 29, 2011	241	2177.6 ± 1196.9	1325.8 ± 1042.7	55.4 ± 15.4
October 21, 2011	294	1335.4 ± 1386.0	767.9 ± 868.3	53.6 ± 16.2



**Fig. 5.** Relationship between leaf production and leaf biomass damaged by herbivores from May to October, 2011 in the east coastal region of Korea.

유충밀도와 중풍부도의 편차는 매우 컸다. 대체적으로 영구방형구당 개체밀도가 200개체  $25\text{ m}^{-2}$ 에 이르기까지 지속적으로 출현종수가 증가하지만 그 이후에는 방형구당 출현종수가 40종 내외로 포화되는 경향을 나타내었다(Fig. 4).

## 2. 참나무 잎의 생산량이 초식에 미치는 영향

강릉시 사천면 지역에서 참나무 잎의 생산량과 초식곤충에 의해 초식된 양은 모든 조사시기마다 조사 지소에 따른 변이가 매우 컸다. 태양력일 128일, 159일, 207일, 241

일 및 294일의 참나무 잎의 생산량의 조사 지소에 따른 범위는 각각 40.2~1996.1, 329.6~2215.2, 975.9~4813.4, 845.6~4727.7 그리고 253.6~4127.3  $\text{g DW } 25\text{ m}^{-2}$ 이었다. 11개 영구방형구에서 측정된 참나무 잎의 평균 생산량은 5월 8일에 542.3  $\text{g DW } 25\text{ m}^{-2}$ 이었고, 7월 26일에 2,412.2  $\text{g DW } 25\text{ m}^{-2}$ 으로 최대값을 나타내었다(Table 4). 참나무 잎의 평균 생산량은 7월 26일에 최대값을 보였으나 초식곤충에 의한 평균 초식 피해 양은 8월 29일에 1,325.8  $\text{g DW } 25\text{ m}^{-2}$ 으로 가장 컸다. 8월 29일에 가장 적게 초식된 지역은 368.2  $\text{g DW } 25\text{ m}^{-2}$ 이었고, 가장 많이 초식된 지역은 3,788.1  $\text{g}$

DW 25 m<sup>-2</sup>이었다. 5월 8일에는 생산한 참나무 잎의 2.6%가 초식 피해를 입었고, 6월과 7월에는 12~16%의 초식 피해율이 다소 증가하였다. 8월 29일에는 생산한 잎의 약 55.4%가 피해를 입었고, 잎의 생산량이 적어지는 10월 21일에는 53.6%의 피해를 입었다. 참나무 잎의 생산량은 7월 26일에 가장 컸으나 가장 큰 피해를 입은 8월 29일에 비해 초식곤충에 의한 피해가 상대적으로 적었다. 10월 21일에 참나무 잎의 생산량은 6월 8일과 비슷한 수준이었지만 초식 피해량은 훨씬 컸다(Table 4). 따라서 본 조사지역에서 참나무 잎의 생산은 6월부터 8월에 주로 이루어지고, 이를 먹이원으로 하는 초식곤충에 의한 피해는 8월부터 10월에 집중된다. 또한 본 조사지역에서 참나무 잎의 활력이 가장 왕성한 시기는 7월이었다.

강원도 강릉시 사천면 지역에서 조사시기별로 참나무 잎의 생산량과 초식 피해 양의 관계를 조사한 결과, 5월부터 10월까지 전 조사기간에 걸쳐서 참나무 잎의 생산량이 많은 곳일수록 더 많은 초식 피해가 발생하는 경향이 뚜렷하였다

(Fig. 5). 특히 참나무 잎의 생산 초기인 5월 8일과 참나무 잎의 생산이 많고 초식 피해가 집중되는 시기인 8월 29일 그리고 참나무 잎의 생산량이 줄어드는 시기인 10월 21일에는 참나무 잎의 생산량과 초식 피해 양의 관계가 더욱 밀접한 관계를 나타내고 있다(Fig. 5). 8월 29일에 참나무 잎의 생산량이 많은 곳일수록 생산된 잎의 피해비율은 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 6). 8월 29일에 참나무 잎 생산량과 연중 출현한 초식곤충의 유충 밀도와의 관계를 살펴본 결과, 참나무 잎의 생산이 많은 곳일수록 연중 출현한 유충 밀도가 커지는 경향이 뚜렷하였다(Fig. 7). 이것은 참나무 잎 생산량이 많은 곳으로 초식자들이 모여드는 집중화 반응을 보인다는 것을 의미한다. 또한 참나무 잎의 생산량이 많은 곳일수록 연간 출현한 초식곤충의 종수도 증가하는 경향을 나타내고 있으나 유충밀도보다는 그 관계가 뚜렷하지는 않았다(Fig. 7). 이것은 참나무 잎의 생산량이 초식곤충의 다양성 보다 우점하고 있는 소수의 개체군의 크기에 보다 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

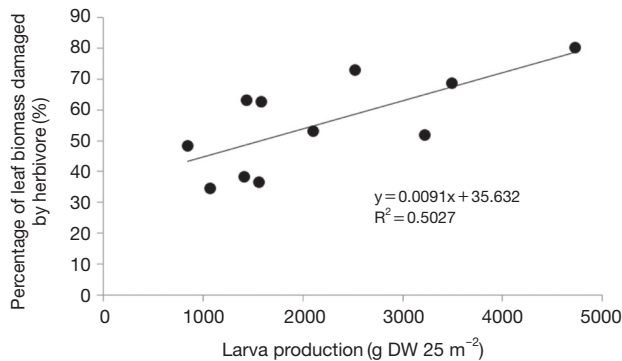


Fig. 6. Relationship between leaf production and percentage of leaf biomass damaged by herbivores on August 29, 2011 in the east coastal region of Korea.

## 고찰

한국에서 인간의 간섭과 교란이 빈번한 저지대에는 소나무림이 우점하고 있고, 보전이 잘 이루어진 보호지역과 고지대에는 참나무가 우점하고 있다. 특히 동해안 지역의 저지대에는 매우 넓은 소나무림이 분포하고 있다. 동해안 지역에서 소나무림의 임상에는 신갈나무, 굴참나무, 졸참나무, 떡갈나무 등의 참나무가 우점하고 있어서 인간의 간섭이 없다면 참나무림으로 천이가 진행된다(Choung *et al.* 2004). 소나무림을 교란하는 솔잎혹파리의 피해와 산불은 소나무림에서 참나무림으로의 천이를 촉진하고 있다(Lee 1989; Choung *et al.* 2004). 최근 소나무림에 대한 인간의 간섭이 줄면서 소나

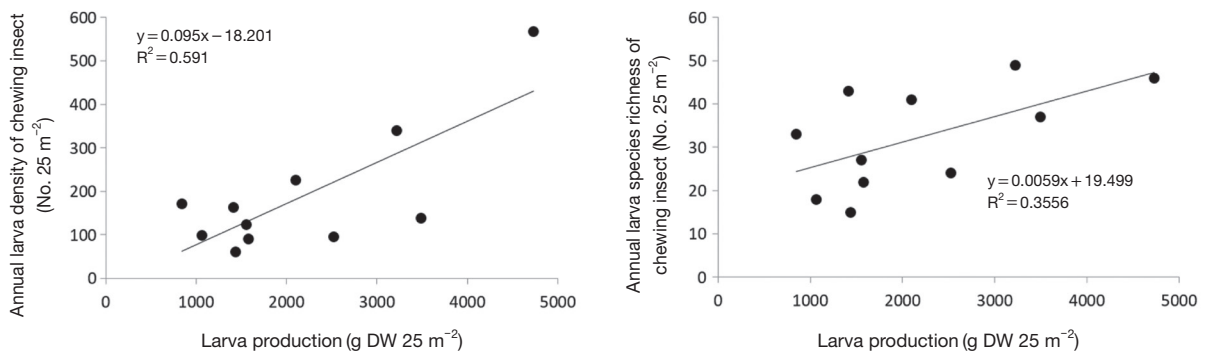


Fig. 7. Relationship between annual larval density and leaf production (left), and between the annual species richness of insects which chew on leaves, and the leaf production on August 29, 2011 (right) in the east coastal region of Korea.



무림에서 소나무-참나무혼합림이나 참나무림으로의 천이도 빠르게 진행하고 있다. 동해안 지역은 우리나라에서 가장 빈번하게 대형산불이 발생하는 지역이다(Lee *et al.* 2004). 산불피해지역은 소나무림으로 재생되는 곳보다 참나무 맹아가 자라서 숲으로 발달하는 곳이 매우 많다(Choung *et al.* 2004). 소나무는 화재에 취약하고, 산불 후 회복력이 느린데 비하여 신갈나무와 굴참나무 같은 참나무는 산불에 대한 저항력이 크고 산불 후 맹아로 인한 갱신으로 인하여 소나무와의 경쟁에서 우세하다(Choung *et al.* 2004; Lee 2006).

참나무는 동해안 지역뿐만 아니라 한반도 전체에서 우점하는 분류군으로 한반도에 서식하는 많은 동물을 부양하는 먹이 그물의 기초가 되는 식물이다. 산불피해지역에서 산불 전 식생의 종류, 산불의 강도 그리고 산불 이후의 다양한 복구 및 관리방법은 식생 천이에 의한 발달과정에 대한 시공간적 이질성을 크게 한다(Kim 2003; Lee 2003; Lee *et al.* 2004). 산불 이후의 식생천이에 의한 식생의 공간적 이질성에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 1차 소비자들이 선호하는 참나무 잎의 생산량이 시공간적으로 달라진다는 것이다(Lee 2003). 일반적으로 산불로 인한 빛 조건의 개선은 맹아 발생을 촉진하여 참나무 잎의 생산성을 증가시키고, 그것은 초식동물의 개체군을 증가시킨다(Choung *et al.* 2004; Kay *et al.* 2007).

동해안 산불피해지역에서 식생 이질성의 원인은 산불여부, 산불 이후의 관리방법 그리고 입지환경요인의 차이이다(Kim 2003; Lee 2003; Choung *et al.* 2004). 그러한 입지환경요인의 이질성은 주로 참나무 맹아의 밀도와 생장에 차이로 나타나서 산불피해지역에서 참나무 잎의 생산량의 시공간적인 이질성으로 이어진다. 본 조사지역에서 7월과 8월에 참나무 잎의 생산량이 가장 많았는데, 이 시기의 참나무 잎의 평균생산량은  $0.96 \text{ ton ha}^{-1}$ 이었다. 같은 시기 참나무 잎 생산량은 조사 지소에 따라  $0.34 \sim 1.89 \text{ ton ha}^{-1}$ 의 공간적인 변이를 나타내었다(Table 4). 초식곤충에 의한 참나무 잎의 소비량도 시기에 따라 공간적으로 많은 변이를 나타내었다(Figs. 5, 6). 본 조사지역에서 초식 피해가 가장 컸던 시기는 8월이었는데, 이 시기에 초식곤충에 의한 참나무 잎의 소비량은  $0.15 \sim 1.51 \text{ ton ha}^{-1}$ 의 공간적인 변이를 나타내었다(Table 4, Fig. 5). 연간 출현한 곤충의 개체수 뿐만 아니라 종다양성도 지소에 따라 큰 변이를 나타내었다(Fig. 4). 또한 조사시기마다 초식곤충의 군집구조도 매우 상이하였다(Table 3). 본 조사지역에서 4월부터 10월까지 연간 참나무 잎에서 관찰되는 총 초식곤충의 수는  $63,428 \text{ 마리 ha}^{-1}$ 으로 그리고 가장 많은 초식곤충이 출현한 8월에는  $35,571 \text{ 마리 ha}^{-1}$ 로 추정되었다. 초식곤충의 종풍부도와 밀도가 커지는 시기는 8월이었다(Fig. 3). 출현한 전체 초식곤충의 60.5%가 8월에서 9월 사

이에 집중되었고, 7월부터 9월 사이에 79.4%가 집중되었다. 본 조사지역에서 참나무 잎의 생산은 6~8월에 많았고, 이를 먹이원으로 하는 초식곤충에 의한 피해는 8~10월에 집중되었다(Table 4). 따라서 참나무의 입장에서 광합성을 할 수 있는 잎의 활력이 가장 왕성한 시기는 7~8월이다.

참나무 잎의 생산량이 많은 곳일수록 초식자에 의한 소비량이 증가하였고(Fig. 5), 초식자의 종수와 밀도도 증가하는 경향이 있다(Fig. 7). 또한 참나무 잎의 생산량이 많을수록 참나무 잎의 소비 비율이 증가하여 소비자의 집중화 반응이 있음을 확인하였다(Fig. 6). 그러나 참나무 잎의 생산이 많을수록 개체당 소비량이 증가했는지는 알 수 없었다. 참나무 잎 생산량의 시공간적 이질성을 일으키는 요인에 대한 분석과 참나무 잎 생산량의 공간적이질성이 생태계의 먹이망으로 연결되어 있는 에너지 흐름에 미치는 영향에 대한 분석은 생물의 시공간적인 분포에 직접적인 영향을 줄 수 있다(Smith and Smith 2011). 따라서 산불피해지역에서 먹이자의 시공간적인 이질성과 그로 인한 먹이망 상위단계에 미치는 영향에 대한 연구는 산불지역 생태계의 구조와 기능을 정량적으로 이해하고 평가하는 데 도움을 줄 수 있다. 또한 산불지역의 복원과 관리에도 도움을 줄 수 있다.

## 적 요

동해안 산불피해지역에서 참나무 잎 생산량의 시공간적 변이가 초식자의 밀도, 종풍부도 및 초식 피해에 미치는 영향을 분석하였다. 본 조사지역에서 참나무 잎의 주요 초식자는 나방 유충이었다. 초식곤충의 유충의 종풍부도와 밀도가 가장 높아지는 시기는 8월 중순이었다. 연간 출현한 초식곤충 유충의 60.5%가 8~9월에 집중적으로 출현하였다. 참나무 잎 생산량이 가장 많은 시기는 7~8월이었고, 초식곤충에 의한 피해가 가장 많은 시기는 8~9월이었다. 조사시기와 장소에 따라 참나무 잎 생산량, 초식곤충의 유충밀도 및 종풍부도는 큰 변이를 나타내었다. 본 조사지역에서 7~8월에 평균 참나무 잎 생산량은  $0.96 \text{ ton ha}^{-1}$ 로 추정되었다. 또한 이 시기에 참나무 잎의 생산량은  $0.34 \sim 1.89 \text{ ton ha}^{-1}$ 의 공간적인 변이를 나타내었다. 8월에 초식자에 의한 참나무 잎의 소비량은  $0.15 \sim 1.51 \text{ ton ha}^{-1}$ 의 공간적인 변이를 나타내었다. 참나무 잎의 생산량이 많은 곳일수록 초식자의 종풍부도와 밀도가 증가하는 경향이 있었다. 참나무 잎 생산량의 증가에 따라 초식자에 의한 소비량과 소비비율도 증가하였다. 이것은 참나무 잎의 생산이 많은 시기와 공간으로 초식자들이 모이는 집중화 반응이 일어난다는 것을 의미한다. 산불피해지역에서 먹이자의 시공간적인 이질성과 그로 인한 먹이

망의 상위단계에 미치는 영향에 대한 연구는 산불지역 생태계의 구조와 기능을 정량적으로 이해하고 평가하는 데 도움을 줄 수 있다.

## REFERENCES

- Adams JM, S Ahn, N Ainuddin and ML Lee. 2011. A further test of a palaeoecological thermometer: Tropical rainforests have more herbivore damage diversity than temperate forests. *Rev. Palaeobot. Palynology* 164:60–66.
- Archibold OW. 1995. *Ecology of world vegetation*. Chapman & Hall. London. p. 510.
- Benson WW, KS Brown and LE Gilbert. 1975. Coevolution of plants and herbivores: passion flower butterflies. *Evolution* 29:659–680.
- Berry J and O Bjorkman. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plant. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31:491–543.
- Cates RG. 1980. Feeding patterns of monophagous, oligophagous, and polyphagous insect herbivores: The effect of resource abundance and plant chemistry. *Oecologia* 46:22–31.
- Choung Y, B Lee, J Cho, K Lee, I Jang, S Kim, S Hong and H Jung. 2004. Forest responses to the large-scale east coast fires in Korea. *Ecol. Res.* 19:43–54.
- Coley PD and JA Barone. 1996. Herbivory and plant defenses in tropical forests. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 27:305–335.
- Feeny PP. 1976. Plant apparency and chemical defense. In: *Biochemical interaction between plants and insects*. Wallace JW, Mansell RL (eds.). *Recent Adv. Phytochem.* 10:1–40.
- Forkner RE, RJ Marquis and JT Lill. 2004. Feeny revisited: condensed tannins as anti-herbivore defences in leaf-chewing herbivore communities of *Quercus*. *Ecol. Entomol.* 29:174–187.
- Fragoyiannis DA, RG Mckinlay and JPE D’Mello. 2001. Interactions of aphid herbivory and nitrogen availability on the total foliar glycoalkaloid content of potato plants. *J. Chem. Ecol.* 27:1749–1762.
- Gavin DG and DR Peart. 1997. Spatial structure and regeneration of *Tetramerista glabra* in peat swamp rain forest in Indonesian Borneo. *Plant Ecol.* 131:223–231.
- Hester AJ, L Edenius, RM Buttenschoen and AT Kuiters. 2000. Interactions between forests and herbivores: the role of controlled grazing experiment. *Forestry* 73:381–391.
- Hilker M and T Meiners. 2002. Induction of plant responses to oviposition and feeding by herbivorous arthropods: a comparison. *Entomol. Exp. Appl.* 104:118–192.
- Hunter MD, GC Varley and GR Gradwell. 1997. Estimating the relative roles of top-down and bottom-up forces on insect herbivore populations: A classic study revisited. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 94:9176–9181.
- Kaplan D and M Gutman. 1999. Phenology of *Quercus ithaburensis* with emphasis on the effect of fire. *For. Ecol. Manage.* 115:61–70.
- Kay AD, JD Schade, M Ogadahl, EO Wesslerle and SE Hobbie. 2007. Fire effects on insect herbivores in an oak savanna: the role of light and nutrients. *Ecol. Entomol.* 32:754–761.
- Kim JS. 2008. An ecological study on the interaction between vegetation structure and animal habitats of Nanjido waste landfill biotope in Seoul, Korea. Ph. D dissertation. Seoul National University. p. 256.
- Kim SC. 2003. Effect of vegetation on the soil erosion after forest fire, Korea. Master dissertation. Gangneung-Wonju National University. p. 66.
- Kopper BJ and RL Lindroth. 2003. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the phytochemistry of aspen and performance of an herbivore. *Oecologia* 134:95–103.
- Lee CS. 1989. A study on the succession of Pine forests damaged by pine gall midge. Ph. D dissertation. Seoul National University. Korea. p. 106.
- Lee J. 2012. Spatio-temporal variation of Lepidopteran larvae at a rural landscape in southwestern part of Korea. Master dissertation. Mokpo National University. Korea. p. 65.
- Lee KS, YS Choung, SC Kim, SS Shin, CH Ro and SD Park. 2004. Development of vegetation structure after forest fire in the east coastal region, Korea. *Korean J. Ecol.* 27:99–106.
- Lee KS. 2006. Changes of species diversity and development of vegetation structure during abandoned field succession after shifting cultivation in Korea. *J. Ecol. Environ.* 29:227–235.
- Lee KS. 2012. Comparison of phenology and herbivory damage of the Oak between burnt and un-burnt forest. Master dissertation. Gangneung-Wonju National University. p. 153.
- Lee SH. 2003. Effect of management technique on the regeneration of plant community after forest fire, Korea. Master dissertation. Gangneung-Wonju National University. p. 41.
- Maarten A, MA Jongsma and CJ Bolter. 1997. The adaptation of insects to plant protease inhibitors. *J. Insect Physiol.* 43:885–895.
- Miller JR and TA Miller. 1986. *Insect-plant interactions*. Springer-Verlag. New York. p. 342.
- Mizumachi E, N Osawa, R Akiyama and N Tokuchi. 2004. The effects of herbivory and soil fertility on the growth patterns

- of *Quercus serrata* and *Q. crispula* sapings at the shoot and individual levels. *Popul. Ecol.* 46:203–211.
- Mopper S and D Simberloff. 1995. Differential herbivory in an oak population: the role of plant phenology and insect performance. *Ecology* 76:1233–1241.
- Murdock LL and RE Shade. 2002. Lectins and protease inhibitors as plant defenses against insects. *J. Agric. Food Chem.* 50:6605–6611.
- Peter B and PB McEvoy. 2002. Insect-plant interactions on a planet of weeds. *Entomol. Exp. Appl.* 104:165–179.
- Rieske LK, HH Housman and MA Arthur. 2002. Effects of prescribed fire on canopy foliar chemistry and suitability for an insect herbivore. *For. Ecol. Manage.* 160:177–187.
- Rieske LK. 2002. Wildfire alters oak growth, foliar chemistry, and herbivory. *For. Ecol. Manage.* 168:91–99.
- Shin YH. 2006. Coloured illustration of the butterflies of Korea. Academybook Publishing Co. Ltd., Seoul. p. 364.
- Shin YH. 2007. Coloured illustration of the moths of Korea. Academybook Publishing Co. Ltd., Seoul. p. 551.
- Shon JC. 2006. Pocketbook of the caterpillar. Hwangsogeom. Seoul. p. 455.
- Smith TM and RL Smith. 2011. Elements of ecology. 7th ed. Benjamin Cummings. p. 649.
- Stiling P, M Cattell and DC Moon. 2002. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> lowers herbivore abundance, but increases leaf abscission rates. *Glob. Change Biol.* 8:658–667.
- Tuomi J, P Niemela, E Haukioja, S Siren and S Neuvonen. 1984. Nutrient stress: an explanation for plant anti herbivore responses to defoliation. *Oecologia* 61:208–210.
- Yang KC and JK Shim. 2005. Classification of biochores in Korea. *J. Environ. Biol.* 23:215–220.
- Yang KC. 2001. Classification of major habitats based on the climatic conditions and topographic features in Korea. Ph. D dissertation. Chung-Ang University. p. 130.

Received: 26 April 2018

Revised: 13 June 2018

Revision accepted: 14 June 2018