

## 온대 숲 토양 생태계에서 지렁이가 톡토기류 개체수에 미치는 영향

이주형 · 박지현 · 유지연 · 한수현 · 남보은 · 김재근

서울대학교 생물교육과

### Effect of Earthworms on Collembola Abundance in Temperate Forest Soil Ecosystem

**Lee, Ju-Hyung · Park, Ji-Hyun · Yoo, Ji-Yeon · Han, Su-Hyun  
Nam, Bo-Eun and Kim, Jae Geun**

Department of Biology Education, Seoul National University.

#### ABSTRACT

Earthworm, a prominent ecosystem engineer within many terrestrial ecosystems, can exert profound influences on various abiotic/biotic environments through bioturbation processes such as burrowing, casting and mixing of litter and soil. In this study, we investigated how the presence or absence of earthworm (Oligochaeta) can alter the soil physico-chemical conditions and ultimately the distribution and abundance of Collembola which constitutes a large proportion of the soil fauna. During September 2010, soil organisms along with soil samples were collected from randomly installed 20 plots in Mt. Gwan-ak. We examined the differences in the abundance of Collembola among plot samples in respect to the presence/absence of earthworm and soil physico-chemical conditions (i.e., pH,  $PO_4^{3-}$ ,  $NO_3^{2-}$ , organic matter (OM), electrical conductance and water content). Analysis of soil physico-chemical environment revealed a significantly higher organic matter content and electrical conductance in plots with earthworm compared to plots without earthworm. Abundance of Collembola were not only higher in plots with earthworm than in plots without earthworm, but were also positively correlated with availability of OM present in the environment. The results suggest that positive impacts of earthworm on the abundance of Collembola in this study may have been due to their ability to effectively modify

---

**Corresponding author** : Kim, Jae Geun, Department of Biology Education, Seoul National University, Seoul 151-748, Korea,  
Tel : +82-2-880-7896, E-mail : jaegkim@snu.ac.kr

**Received** : 9 November, 2010. **Revised** : 29 November, 2010. **Accepted** : 5 December, 2010.

soil physico-chemical conditions favored by Collembola. Such conspicuous influence of earthworm's activity on below-ground community suggests their potential significance in forest restoration or revegetation process.

Key Words : *Ecosystem engineer, Earthworm, Collembola, Organic matter, Microarthropod.*

## I. 서 론

생태계 엔지니어(ecosystem engineer)란 다양한 생물학적/무생물학적 환경에 영향을 주어 다른 생물들이 사용 가능한 자원을 조절하며, 나아가 서식지 환경을 유지/변화시키고 심지어는 새로운 서식공간을 조성할 수 있는 생물을 말한다(Jones et al., 1994). 생태계 엔지니어의 전형적인 예로는 댐을 조성하여 다양한 생물들이 살아갈 수 있는 서식지를 만들어주는 비버나(Moore, 2006) 많은 소형 담수 무척추동물에게 포식자로부터 피신처(refuge)를 제공하여 서식지 내 생물종의 다양성과 풍부도에 큰 영향을 주는 얼룩무늬담치를 들 수 있다(Jones et al., 1997; Karatayev et al., 2002).

지렁이 역시 토양생태계 내 생물학적/무생물학적 환경에 중요한 영향을 미치는 대표적인 생태계 엔지니어이다(Eisenhauer, 2010). 지렁이는 흙을 분쇄하는 작용을 통해 미생물의 분해 작용을 촉진시키고(Martin and Marinissen, 1993), 산소와 유기물이 풍부한 공극을 형성함으로써 다른 토양생물들에게 이상적인 서식환경을 조성해준다. 또한 선택적인 포식행위를 통해 특정 토양생물을 서식지에서 제거하여 이들과 경쟁관계에 있는 다른 생물 군집의 성장에 긍정적인 영향을 주기도 하며(Lussenhop, 1992), 이들 몸체에 붙어 같이 이동하는 토양생물들과 소화과정에서 살아남은 미생물들을 다른 서식환경으로 분산시키기도 한다. 이러한 다양한 기작을 통해 지렁이는 자신의 서식구멍권(drilosphere) 주변의 토양환경과 토양생물의 군집구조를 크게 변화시킬 수 있다(Brown, 1995).

이처럼 지렁이가 토양생태계에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있음에도 불구하고, 이들이 다양한 형태의 상호작용을 통해 토양생물의 군집 구조에 미치는 구체적인 영향에 대해서는 논란의 여지가 많으며, 아직까지 연구가 미흡한 부분도 많다(Eisenhauer, 2010). 우리나라에서는 주로 농업과 환경복원 분야를 중심으로 토양의 물리/화학적 조성이 지렁이의 유기성 폐기물 처리효율에 미치는 영향, 지렁이 분변토가 식물생장에 미치는 영향 등이 연구된 바가 있으나(최훈근, 1991; 이병도 · 배윤환, 2004; 김인수 등, 2005), 이들이 자연서식지에서 가지는 생태학적 비중에 대해서 심도 있게 논의된 적은 없다.

본 연구의 목적은 지렁이(Oligochaeta)가 서식지 토양의 물리/화학적 환경을 어떻게 바꾸고, 이 과정에서 토양미소절지동물인 톡토기류(Collembola) 개체군의 크기와 군집분포 양상에 어떠한 영향을 주는지 밝히는 것이다. 톡토기는 거의 모든 토양생태계에서 큰 비중을 차지하는 대표적인 토양생물로 서식지 내의 양분순환에 중대한 영향을 미친다. 이들은 피식자, 포식자 그리고 숙주로서 다양한 생물들과 상호작용함으로써 토양먹이사슬에 깊이 관여되어 있는 만큼, 지렁이가 톡토기 군집에 미치는 영향은 토양 생태계 전반에 걸쳐 확산될 수 있다. 따라서 이 두 토양생물군 사이의 관계를 규명하고 지렁이가 서식지를 유지/변화시키는 기작에 대해 고찰하는 것은 복잡하고 다양한 양상으로 전개되는 토양 생태계 내의 생물간 상호작용에 대한 이해를 높이는 데 큰 도움을 줄 것이다. 더 나아가, 지렁이의 생태학적 특성에 대한 기초연구는 지렁이를 생태계 복원 또는 녹화사업에 유용하게 활용하기 위해서 반드시 선행되어야 하는 부분이기도 하다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구장소 및 시기

본 연구는 서울시 관악구와 경기도 안양, 과천에 걸쳐 위치하는 관악산(629m; N37°27′-27°27′, E126°55′-127°0′)에서 2010년 9월 말 진행되었다. 연구지역은 신갈나무(*Quercus mongolica*), 상수리나무(*Q. acutissima*), 갈참나무(*Q. aliena*), 리기다소나무(*Pinus rigida*), 소나무(*P. densiflora*) 등의 참나무과/소나무과 교목종이 혼재하고, 철쭉나무(*Rhododendron schlippenbachii*), 국수나무(*Stephanandra incisa*) 등의 관목종이 흔하게 발견되는 산림지역이었다. 조사구를 선정하기에 앞서 계층화된 무작위 표본 추출법(stratified random sampling)을 사용하여 관악산을 크게 5지역으로 나누었고, 각 지역 내에 4개씩, 총 20개의 방형구를 설치하였다(그림 1).



Figure 1. study site (Mt. Gwan-ak). ○ indicate study plot.

### 2. 토양 미소동물의 채집과 동정

각 방형구 내에서 임의로 한 지점을 선정하여 20cm×20cm 소방형구에서 낙엽층과 10cm 깊이까지의 토양을 채취하였다. 채취한 샘플은 곧바로 실험실로 옮겨 Tullgren 장치에 넣고 200W 백열전구로 빛을 비추 후, 24시간 동안 80% 에탄올이 든 용기로 떨어지는 토양 동물을 수집하였다(최성식, 1996). 토양 동물은 실체현미경을 사용하여 강 또는 목 수준까지 동정하고 수를 세었다. 각 소방형구에서 채집한 토양 동물 샘플에 지렁이가 포함되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 따라 두 집단으로 나눈 뒤 (지렁이가 있는 소방형구 수=9, 지렁이가 없는 소방형구 수=11), 각 집단 내 토양 동물의 종류와 개체수를 비교분석하였다.

### 3. 토양 표본채취

토양 미소동물을 채집한 동일한 방형구 내에서 5지점을 임의로 선정하고 각 지점에서 20cm×20cm 소방형구를 설치한 뒤, 토양표면의 낙엽을 제거하고 10cm 깊이까지 토양을 채취하였다.

채취한 토양의 일부를 도가니에 담아 무게를 측정하고 건조기(105℃)에서 24시간 이상 건조시킨 뒤 상온에서 무게를 다시 측정하였으며, 건조 전과 후의 무게 차이를 이용하여 토양의 수분함량을 계산하였다. 105℃에서 건조된 토양을 550℃의 용광로에서 4시간 동안 가열한 뒤 무게를 측정하였고 작열 전과 후의 무게차이를 이용하여 유기물함량을 작열감소량(LOI; loss on ignition)으로 계산하였다. 사용하고 남은 건조 전 토양을 실험실에서 음건시킨 후 체에 걸러 토양 분석에 사용하였다. pH와 전기전도도는 토양과 증류수를 1 : 5비율로 희석하여 거름종이로 거른 뒤에 각각 pH meter와 EC meter를 이용하여 측정하였다. 질산량과 인산량은 각각 Hydrazine Method와 Bray No.1 method를 이용하여 측정하였다(김재근 등, 2004).

#### 4. 통계분석

지렁이가 서식하는 소방형구 그룹과 서식하지 않는 소방형구 그룹 사이의 톡토기와 응애(Acari)의 개체수를 비교하고, 톡토기 개체수에 대하여 소방형구를 설치한 다섯 지역 간의 block effect를 검정하기 위해서 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다. 두 그룹 간 토양 특성을 비교하기 위해서 토양 샘플로부터 측정된 질산, 인산, pH, 전기전도도, 토양함수량, 토양 유기물함량의 6개 환경변수를 동일방법으로 분석하였다. 또한, 윌콕슨 부호순위 검정(Wilcoxon signed-rank test; Siegel, 1956)을 사용하여 두 소방형구 집단 간 토양 미소동물의 군집 구성양상(분류군의 종류 및 풍도)에 유의미한 차이가 없을 것이라는 귀무가설의 기각여부를 검정하였다. 지렁이의 서식여부가 톡토기 개체수에 미친 영향을 분석하기 위해 톡토기의 개체수와 상관관계가 있음과 동시에 두 그룹 사이에 차이를 보인 환경변수를 공변량으로 지정하여 공분산분석(one-way ANCOVA)을 실시하였다. 모든 데이터는 대수전환(log-transformation)을 통해 분석 항목 간 개체수 차이를 없애고 정규분포화 시킨 후 통계 처리하였다. 전 통계분석과정은 SPSS(v.17, SPSS Inc., Chicago, Illinois)를 사용하여 수행하였다.

### III. 결과 및 논의

#### 1. 지렁이 서식지의 토양 미소동물

5 지역에서 채집 장소 간의 톡토기 개체수를 비교한 결과 통계적으로 유의미한 블록효과(block effect)가 나타나지 않았다( $F_{4,15}=0.904$ ,  $p=0.486$ ). 따라서 이 후의 통계처리 과정에서는 모든 데이터를 통합한 후 빈도강의 서식 유/무에 따라 두 그룹으로 구분하여 결과를 분석하였다. 채집된 총 토양 미소동물( $n=4,118$ ) 중 톡토기목( $n=1705$ , 41.4%)과 응애목( $n=1593$ , 38.7%)이 차지하는 비율이 가장 높았다. 지렁이가 발견된 9개의 소방형구에서 지렁이의 평균 개체 수는

$5.7 \pm 5.4$ 마리였다. 토양 미소동물 개체수는 지렁이가 서식하는 소방형구 그룹에서 높게 나타났다(지렁이가 있는 소방형구의 평균 토양 미소동물 개체수= $276.4 \pm 214.9$ , 지렁이가 없는 소방형구의 평균 토양 미소동물 개체수= $148.2 \pm 114.3$ ,  $F_{1,18}=4.178$ ,  $p=0.056$ )(그림 2). 톡토기의 개체수는 지렁이가 발견된 소방형구에서 높았던 반면(지렁이가 있는 소방형구에서의 평균 톡토기 개체수= $150.8 \pm 178$ , 지렁이가 없는 소방형구에서의 평균 톡토기 개체수= $31.5 \pm 28.3$ ,  $F_{1,18}=8.079$ ,  $p=0.011$ ), 응애 개체수는 두 그룹 사이에서 유의한 차이를 보이지 않았다(지렁이가 있는 소방형구에서의 평균 응애 개체수= $78.9 \pm 88.7$ , 지렁이가 없는 소방형구에서의 평균 응애 개체수= $80.3 \pm 87.8$ ,  $F_{1,18}=0.001$ ,  $p=0.977$ )(그림 3). 한편, 윌콕슨 부호순위검정 결과 토양 미소동물의 군집 구성양상은 지렁이가 서식하는 환경과 서식하지 않는 환경 사이에 유의미한 차이가 없는 것으로 드러났다( $p=0.209$ )(표 1).

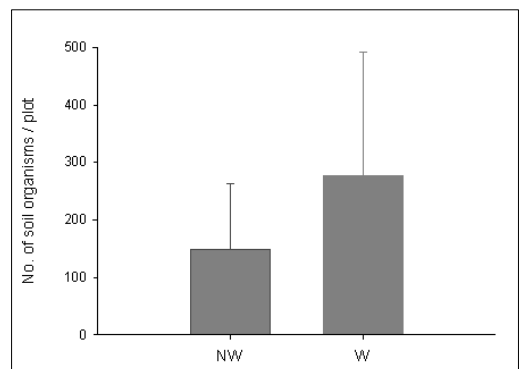
지렁이가 발견된 소방형구에서 토양 미소 절지동물의 총 개체수가 높게 나타난 결과는, 지렁이 서식지에서 토양 미소 동물의 군집 크기가 전반적으로 증가한다는 일부 기존 연구결과들에 부합하는 것이다(Hamilton and Sillman, 1989; Loranger et al., 1998). 반면 지렁이의 서식여부와 관련하여 두 소방형구 집단 간 톡토기와 응애의 개체수가 각각 다른 정도의 차이를 보인 것은 토양생물의 종류에 따라서 지렁이로부터 다른 영향을 받을 수 있음을 보여준다. 톡토기와 응애는 대부분의 토양 서식지에서 가장 큰 수적 비중을 차지하는 생물집단이므로, 위의 결과는 지렁이에 의해 서식지에서 우점하는 토양 미소동물 집단이 바뀔 수도 있음을 암시하는 것이기도 하다. 실제로 본 연구에서는 지렁이가 서식하지 않는 소방형구에서 평균적으로 응애의 상대풍부도가 가장 높게 나타난 반면, 지렁이가 서식하는 환경에서는 이러한 응애의 우점양상이 톡토기에 의해 대체되는 현상이 나타났다(지렁이가 있는 소방형구

**Table 1.** Composition of soil organisms in two plot groups (with/without earthworms) presented as average specimen count per plot and relative abundance (%) of each taxonomic group. All specimens were identified to order except the specimens from class Diplopoda, Pauropoda, Chilopoda, Symphyla, Rotatoria, Nematoda. For Wilcoxon signed-rank test (Siegel, 1956) : no significant difference in the taxonomic composition between the two groups (total number of taxonomic group, n=24; number of negative signs, x=10; p=0.541).

	with worms (n=9)		without worms (n=11)		with worms > without worms
	average No. of specimens per plot, (percentage)				
Acari	78.9	(28.55%)	80.3	(54.17%)	—
Amphipoda	0.0	(0.00%)	0.1	(0.06%)	—
Araneae	0.9	(0.32%)	1.0	(0.67%)	—
Chilopoda	2.2	(0.80%)	1.8	(1.23%)	+
Coleoptera	2.6	(0.92%)	4.7	(3.19%)	—
Collembola	150.9	(54.60%)	31.5	(21.29%)	+
Dermaptera	0.2	(0.08%)	0.1	(0.06%)	+
Diplopoda	0.1	(0.04%)	0.3	(0.18%)	—
Diptera	6.6	(2.37%)	15.2	(10.25%)	—
Hemiptera	2.0	(0.72%)	1.0	(0.67%)	+
Hymenoptera	7.3	(2.65%)	3.7	(2.52%)	+
Isoptera	0.8	(0.28%)	0.3	(0.18%)	+
Lepidoptera	0.3	(0.12%)	0.1	(0.06%)	+
Nematoda	0.6	(0.20%)	0.0	(0.00%)	+
Neuroptera	0.3	(0.12%)	0.0	(0.00%)	+
Oligochaeta	5.7	(2.05%)	0.0	(0.00%)	+
Opiliones	3.8	(1.37%)	0.8	(0.55%)	+
Pauropoda	0.0	(0.00%)	0.2	(0.12%)	—
Protura	0.0	(0.00%)	1.2	(0.80%)	—
Pseudoscorpion	1.0	(0.36%)	2.2	(1.47%)	—
Rotatoria	5.8	(2.09%)	0.0	(0.00%)	+
Symphyla	5.7	(2.05%)	3.1	(2.09%)	+
Tardigrada	0.0	(0.00%)	0.5	(0.31%)	—
Psocoptera	0.8	(0.28%)	0.2	(0.12%)	+

에서의 평균 상대빈도(%), 톡토기목=44.8%, 응애목=26.7%; 지렁이가 없는 소방형구에서의 평균 상대빈도(%), 톡토기목=23.9%, 응애목=47.1%).

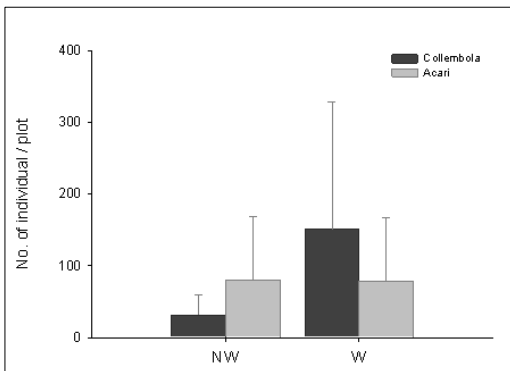
토양 특성과 톡토기의 개체수의 변화와의 관계를 확인하기 위해 상관분석을 한 결과, 톡토기의 개체군 크기는 단순히 지렁이의 서식여부 외에도 주변 토양환경에 의해 중요한 영향을 받는 것으로 나타났다. 톡토기의 개체수는 6개의 토양환경 변수 중 토양의 유기물함량과 유의한 상관관계를 보였으며( $r=0.539$ ,  $p=0.014$ ), 수분함량과도 10%의 유의수준에서 상관관계를 보였다( $r=0.413$ ,  $p=0.070$ )(표 2).



**Figure 2.** The abundance of soil organisms in the presence/absence of earthworms. Bars indicate average number of soil organisms per plot (NW : without worms; W : with worms).

**Table 2.** Physico-chemical conditions in plots with/without earthworms; their correlation with number of individual Collembola collected from each plot (\* significant difference at  $p < 0.10$ ; \*\* significant difference at  $p < 0.05$ ).

	without worms	with worms	F (df=1)	P	No. of Collembola/plot	
					r	p
$PO_4^{3-}$ (mg/L)	1.57 ( $\pm$ 1.13)	0.90 ( $\pm$ 0.37)	2.411	0.138	0.194	0.412
$NO_3^-$ (mg/L)	5.86 ( $\pm$ 4.9)	4.4 ( $\pm$ 3.5)	0.142	0.711	0.066	0.784
water content (WC; %)	23.28 ( $\pm$ 10.33)	16.82 ( $\pm$ 7.62)	2.586	0.125	0.413	0.070*
electrical conductance (EC; $\mu$ s)	30.99 ( $\pm$ 12.67)	17.02 ( $\pm$ 10.82)	7.533	0.013**	0.257	0.273
organic matter (OM;%)	0.087( $\pm$ 0.045)	0.053( $\pm$ 0.032)	4.058	0.058*	0.539	0.014**
pH	4.47 ( $\pm$ 0.29)	4.59 ( $\pm$ 0.31)	0.836	0.373	0.214	0.365

**Figure 3.** The abundance of Collembola and Acari in the presence / absence of earthworms. Bars indicate average number of individual organisms per plot (NW : without worms; W : with worms).

## 2. 지렁이 서식지의 토양 특성

지렁이가 발견된 그룹과 발견되지 않은 그룹 간에 토양 특성을 비교한 결과, 토양유기물함량(OM)과 전기전도도(EC)가 지렁이가 서식하는 그룹에서 높게 나타났다(OM,  $F_{1,18}=4.085$ ,  $p=0.058$ ; EC,  $F_{1,18}=7.553$ ,  $p=0.013$ ). 그 외의 토양환경 변수들은 두 그룹 사이에서 유의한 차이를 보이지 않았다(그림 2). 지렁이는 다양한 생물교란(bioturbation) 과정과 섭식한 유기물을 대사하여 점액, 분변 형태로 배출하는 과정을 통해 서식지 토양의 물리적 조성(입단 안정성, 수분함량 등)뿐만 아니라 화학적 조성(pH, 총질소량, 유기탄소량, 무기인산량 등)을 크게 변화시킬 수 있다(Springett, 1983; Burtelow et al., 1998; Buck et

al., 1999). 따라서 두 그룹 사이에 나타난 토양특성의 차이는 지렁이의 특정 환경에 대한 선호도로 해석할 수도 있겠으나, 이들이 토양환경에 지대한 영향을 준다는 여러 실험적 증거들을 고려했을 때, 지렁이에 의해 직·간접적으로 유발된 현상으로 보는 것이 더 적절할 것이다.

## 3. 톡토기와 지렁이, 그리고 토양 유기물 함량과의 관계

토양 환경 변수 중 LOI로서 측정된 유기물 함량이 톡토기의 개체수와 상관이 있음과 동시에 두 그룹 사이에서 유의한 차이를 보였기에 이를 공변량으로 지정하여 지렁이 서식여부와 톡토기 개체수의 관계를 공분산분석(ANCOVA)을 통해 재분석하였다. 그 결과, 서식지 내의 톡토기의 개체수는 10%의 유의수준에서 지렁이뿐만 아니라( $F_{1,17}=3.794$ ,  $p=0.068$ ), 서식지 내 토양 유기물 함량에게도 영향을 받는 것으로 나타났다( $F_{1,17}=3.225$ ,  $p=0.090$ ). 이와 같은 결과는 지렁이의 서식여부와 토양 유기물 함량이 각각 톡토기 분포양상에 중요한 영향을 줄 수 있음을 의미하는 것이다. 실제로도 톡토기를 비롯한 많은 토양 미소 절지동물들의 군집 분포는 주로 유기물 함량과 토양 환경이 교란된 정도에 의해 결정되는 경우가 많은데(Hasegawa, 2001; Eisenhauer, 2010), 이는 지렁이와 같은 대형 잔재물섭식자(detritivore)에 의해 영향을 받는 부분이 크다. 따라서 지렁이의 서식여부와 토양 내 유기물함량을

독립적인 요인으로 간주하기보다는, 이 두 환경 변수의 연관성을 중심으로 톱토기 개체수가 지렁이 서식지에서 높게 나타난 기작을 설명할 필요가 있다.

#### 4. 지렁이 서식지에서 톱토기 개체수가 증가한 기작 : 유기물 함량과 토양의 물리적 환경 변화

지렁이의 서식지에서 톱토기의 개체수가 높게 나타나는 현상은 토양 환경과 지렁이의 상호작용이라는 틀 속에서 이해할 수 있으며, 더 나아가 지렁이에 의한 토양 내 유기물 축적과 이들의 표층 활동으로 인한 토양의 물리적 환경 변화로 설명할 수 있다.

톱토기의 개체수가 지렁이의 서식지에서 높게 나타난 이유는 지렁이의 활동으로 인해 유기물이 축적된 토양환경에 톱토기가 선호하는 먹이가 풍부했기 때문일 가능성이 높다. 지렁이는 표층과 토양표면을 이동하면서 미소식물과 낙엽을 분쇄하며, 토양표면을 교란(perturbation)하는 과정에서 유기물들을 토양 속으로 유입시킨다(Martin, 1991). 또한 이들은 토양 내 유기물을 선택적으로 섭식하고(Curry, 2007), 이를 소화시켜 배설하는 과정에서 주변 토양의 가용양분과 미생물상에 큰 변화를 가져올 수 있다(Martin and Marinissen, 1993). 특히 지렁이가 배설하는 점액 분비물질이나 분변토는 각종 무기/유기양분이 주변 토양에 비해 높은 비율로 함유되어 있어 영양가치가 높으며(Pearce, 1972b; Lal, 1988; Salmon and Ponge, 1999), 이들 주변에서 대량 번식하는 박테리아, 조류, 균류 등의 미생물들은 톱토기가 가장 선호하는 먹이이기도하다(Wickenbrock and Heisler, 1997). 분변토는 압축된 형태로 배출되어 그 구조가 매우 안정적이며, 시간이 경과하면서 더 견고해지므로 유기물을 오랜 기간에 걸쳐 분해와 침출로부터 보존한다. 따라서 장기적 관점에서 볼 때, 유기물이 지렁이의 섭식과정에 의해 상당부분 소비됨에도 불구하고 서식지 내 유기물 함량이 높게 유지될 수도 있는

것이다(Scullion and Malik, 2000; Pulleman et al., 2004).

한편, 지렁이는 토양의 물리적 환경을 직접 ‘가공’하는 과정을 통해 이상적인 서식공간을 제공하여 톱토기 개체수에 영향을 줄 수도 있다. 지렁이의 활동은 표층 내에 존재하는 공극(macro-pore)을 크게 증가시키는데(Stockdill, 1966; Jongerius, 1970), 공극은 산소와 수분을 표층 내에 가둬두는 역할을 수행한다(Verhoef and van Selm, 1983; Lee, 1985). 공극 내부는 지렁이 점액에 포함된 양분, 높은 통기성과 수분함량으로 인해 토양미생물이 번식하기에 좋은 환경이며, 따라서 이들을 먹이로 삼는 톱토기의 중요한 섭식 장소가 되기도 한다. 또한, 지렁이가 형성한 굴과 공극은 톱토기가 서식지 내에서 수월하게 이동할 수 있는 통로와 숨을 수 있는 공간을 제공하여 이들이 보다 효과적으로 포식자를 회피하게 해준다(Salmon 2004).

#### 5. 생태학적 맥락에 따른 지렁이와 톱토기의 가변적 관계

톱토기를 비롯한 다양한 토양 미소절지동물들과 지렁이와의 관계에 대한 연구는 지속적으로 이뤄져 왔지만 이들 상호작용의 성격에 대해서는 여전히 논란의 여지가 많다. 일부 연구는 지렁이가 먹이경쟁을 통해 미소절지동물 군집에 부정적인 영향을 미친다고 주장하는 반면(Brown, 1995; Gutierrez et al., 2003), 미소절지동물이 서식하기에 적합한 토양환경을 조성해줌으로써 긍정적인 영향을 준다는 주장도 있다(Hamilton and Sillman, 1989; Wickenbrock and Heisler, 1997). 한편, 생태계에서 생물간 상호작용은 시간/공간과 서식지의 생물학적/무생물학적 환경에 따라 지속적으로 변하는 것이며(Bronstein, 1994), 지렁이와 톱토기 간의 상호작용도 서식지의 여러 생물학적/무생물학적 환경에 의해서 다양한 양상을 보일 수 있다(Gutiérrez et al., 2009). 지렁이의 서식지에서 톱토기의 개체수가 증가하는 것이

얼마나 지속적인 현상이고 어떤 환경 변수에 의해 영향을 받는지는 이번 연구에서 파악하기 어려운 반면, 본 연구의 결과는 특정 생태학적 맥락에 따라 지렁이의 존재가 톱토기에게 긍정적인 영향을 줄 수 있음을 비교적 명료하게 보여준다.

#### IV. 결 론

본 연구는 토양유기물이 상대적으로 많이 함유된 지렁이의 서식지에서 톱토기의 개체군 크기가 증가한다는 결과를 제시함으로써 지렁이가 서식지 토양의 물리/화학적 환경을 변화시키고 이를 통해 토양생물의 군집구조에 큰 영향을 줄 수 있음을 암시한다. 톱토기는 거의 모든 토양생태계에서 큰 비중을 차지하는 대표적인 미소절지동물로 토양 환경의 영양순환에 있어 중요한 역할을 수행하고 토양 미생물상에 강한 영향력을 행사한다. 또한 이들은 포식성 토양 생물들의 중요한 먹이이자 다양한 기생생물들의 숙주로서 토양 생태계의 생물 다양성과 풍부도에 기여하는 바가 크다(Rusek, 1998). 이와 같이 지렁이와 톱토기는 각각 서식지 내에서 고유하고 중요한 생태적 지위를 가지므로 이들 간의 상호작용은 토양 생태계 전반에 큰 영향을 줄 수 있다. 궁극적으로, 지렁이와 톱토기의 관계에 대한 추가적인 실험적/이론적 고찰은 다양한 양상으로 전개되는 토양 생태계 내의 생물학적 상호작용에 대한 이해를 증진시키고, 지렁이를 생태복원 등의 분야에 보다 효과적으로 활용하는데 있어 실질적인 도움을 줄 수 있을 것이다. 특히 지렁이가 환경복원 또는 녹화에 이용될 때 토양 미소동물의 서식처를 제공함으로써 토양의 발달을 촉진시키는 역할을 알 수 있음을 제시한다.

#### 감사의 글

이 연구는 서울대학교 생물교육과 생물과학실험 I의 프로젝트로 수행되었다. 프로젝트에 참여

한 생물교육과 학부생들과 실험 및 결과 해석과정에 도움을 주신 김홍태, 최호, 김태원 선생님께 감사의 마음을 전한다.

#### 인 용 문 헌

- 김인수 · 김성진 · 이지영 · 이주삼. 2005. 지렁이 분리가 엽채류의 생육에 미치는 영향. 한국 유기농업학회지 13 : 413-422.
- 김재근 · 박정호 · 최병진 · 심재한 · 권기진 · 이보아 · 이양우 · 주은정. 2004. 생태조사방법론. 서울 : 보문당.
- 이병도 · 배운환. 2004. 가금류와 지렁이를 이용한 음식물쓰레기 재활용 방법에 관한 연구. 유기성 자원학회지 12 : 91-100.
- 최성식. 1996. 토양동물학. 원광대학교출판국.
- 최훈근. 1991. 지렁이 양식을 이용한 슬러지 처리 최적조건에 관한 연구. 환경독성보건학회지 6 : 133-141.
- Bronstein, J. L. 1994. Conditional outcomes in mutualistic interactions. Trends. Ecol. Evol., 9 : 214-217.
- Brown, G. G. 1995. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? Plant Soil, 170 : 209-231.
- Buck, C., M. Langmaack and S. Schrader. 1999. Nutrient content of earthworm casts influenced by different mulch types. Eur. J. Soil Biol., 35 : 23-30.
- Bundt, M., F. Widmer, M. Pesaro, J. Zeyer and P. Blaser. 2001. Preferential flow paths : biological 'hot spots' in soils. Soil Biol. Biochem., 33 : 729-738.
- Burtelow, A. E., P. J. Bohlen and P. M. Groffman. 1998. Influence of exotic earthworm invasion on soil organic matter, microbial biomass and denitrification potential in forest soils of the northeastern United States. Appl. Soil



- Ecol., 9 : 197-202.
- Curry, J. P., and O. Schmidt. 2007. The feeding ecology of earthworms : a review. *Pedobiologia*, 50 : 463-477.
- Daniel, O., and J. M. Anderson. 1992. Microbial biomass and activity in contrasting soil materials after passage through the gut of the earthworm *Lumbricus rubellus* Hoffmeister. *Soil Biol. Biochem.*, 24 : 465-470.
- Eisenhauer, N. 2010. The action of an animal ecosystem engineer : identification of the main mechanisms of earthworm impacts on soil microarthropods. *Pedobiologia*, 53 : 343-352.
- Gutiérrez, M., M. Ramajo, J. B. Jesu's and D. J. Díaz. 2003. The effect of *Hormogaster elisae* (Hormogastridae) on the abundance of soil Collembola and Acari in laboratory cultures. *Biol. Fertil. Soils*, 37 : 231-236.
- Gutiérrez, M., J. B. Jesu's, D. Trigo, R. Fernandez and D. J. Díaz. 2009. The influence of *Hormogaster elisae* (Oligochaeta, Hormogastridae) on the colonization of defaunated soil by microarthropods in laboratory cultures. *Pedobiologia*, 52 : 163-170.
- Hamilton, W. E., and D. Y. Sillman. 1989. Influence of earthworm middens on the distribution of soil microarthropods. *Biol. Fertil. Soils*, 8 : 279-284.
- Hasegawa, M. 2001. The relationship between the organic matter composition of a forest floor and the structure of a soil arthropod community. *Eur. J. Soil Biol.*, 37 : 281-284.
- Jones, C. G., J. H. Lawton and M. Shachak. 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69 : 373-386.
- Jones, C. G., J. H. Lawton and M. Shachak. 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology*, 78 : 1946-1957.
- Jongerius, A. 1970. Some morphological aspects of regrouping phenomena in Dutch soils. *Geoderma*, 4 : 311-331.
- Karatayev, A. Y., L. E. Burlakova and D. K. Padilla. 2002. Impacts of zebra mussels on aquatic communities and their role as ecosystem engineers (In Leppäkoski, E., S. Gollasch and S. Olenin eds., "Invasive aquatic species of Europe-distribution, impacts and management"). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, pp.433-446.
- Lal, R. 1988. Effects of macrofauna on soil properties in tropical ecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 24 : 101-116.
- Lee, K. E. 1985. Earthworms : their ecology and relationships with soils and land use. New York : Academic Press.
- Lussenhop, J. 1992. Mechanisms of microarthropod-microbial interactions in soil. *Adv. Ecol. Res.*, 23 : 1-33.
- Martin, A. 1991. Short-and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. *Biol. Fertil. Soils*, 11 : 234-238.
- Martin, A., and J. C. Y. Marinissen. 1993. Biological and physico-chemical processes in excrements of soil animals. *Geoderma*, 56 : 331-347.
- McLean, M. A., and D. Parkinson. 2000. Field evidence of the effects of the epigeic earthworm *Dendrobaena octaedra* on the micro-fungal community in pine forest floor. *Soil Biol. Biochem.*, 32 : 351-360.
- Moore, J. W. 2006. Animal ecosystem engineers in streams. *BioScience*, 56 : 237-246.

- Pearce, T. G. 1972. Acid intolerant and ubiquitous Lumbricidae in selected habitats in North Wales. *J. Anim. Ecol.*, 41 : 397-410.
- Pulleman, M. M., and J. C. Y. Marinissen. 2004. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma*, 120 : 273-282.
- Rusek, J. 1998. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity Conserv.*, 7 : 1207-1219.
- Salmon, S. 2004. The impact of earthworms on the abundance of Collembola : improvement of food resources or of habitat? *Biol. Fertil. Soils*, 40 : 323-333.
- Salmon, S., and J. F. Ponge. 1999. Distribution of *Heteromurus nitidus* (Hexapoda, Collembola) according to soil acidity : interactions with earthworms and predator pressure. *Soil Biol. Biochem.*, 31 : 1161-1170.
- Scullion, J., and A. Malik. 2000. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after open cast mining for coal. *Soil Biol. Biochem.*, 32 : 119-126.
- Siegel, S. 1956. Non-parametric statistics for the behavioral sciences. McGraw-Hill, New York.
- Springett, J. A. 1983. Effect of Five Species of Earthworm on Some Soil Properties. *J. Appl. Ecol.*, 20 : 865-872.
- Stockdill, S. M. J., and G. C. Cossens. 1966. The role of earthworms in pasture production and moisture conservation. *Proc. N. Z. Grassl. Assoc.*, 28 : 168-183.
- Verhoef, H. A., and A. J. van Selm. 1983. Distribution and population dynamics of Collembola in relation to soil moisture. *Ecography*, 6 : 387-388.
- Wickenbrock, L., and C. Heisler. 1997. Influence of earthworm activity on the abundance of collembola in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 29 : 517-521.