

광릉시험림 산림토양의 미생물상 및 중형동물상 분포

어진우¹ · 박병배^{2*} · 박기춘¹ · 천정화²

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원, ²국립산림과학원 산림생태연구과

Distribution of Microflora and Mesofauna in the Forest Soils of Gwangneung Experimental Forest

Jinu Eo¹, Byung Bae Park^{2*}, Kee-choon Park¹ and Jung Wha Chun²

¹Department of Herbal Crop Research, Rural Development Administration, Chungbuk 369-873, Korea

²Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

요약: 본 연구 목적은 광릉시험림 지역의 침엽수림과 활엽수림에서 토양 깊이가 미생물상과 중형동물상 분포에 미치는 영향을 구명하는 것이다. 토양 미생물상은 인지질지방산(PLFA) 지표를 이용하여 그 밀도정도를 분석하였고, 중형동물상은 선충과 미소절지동물의 밀도를 조사하였다. 미생물 PLFA지표는 B층보다 A층에서 높았고, 산림형에 따른 차이는 적었다. 선충 밀도도 A층에서 높았으며, 곰팡이섭식성 선충의 밀도는 침엽수림 토양보다 활엽수림 토양에서 높게 나타났다. 미소절지동물 중에서 툽토기와 날개옹애의 평균밀도는 전체 미소절지동물 밀도의 44%와 42%를 각각 보였다. 세균과 곰팡이를 나타내는 PLFA 지표가 이들을 섭식하는 중형동물과 유의한 양의 상관관계가 있었으며, 이것은 이 지역 토양에서 세균과 곰팡이를 중심으로 한 먹이망 형성이 이들의 분포에 영향을 준다는 것을 나타낸다. 이러한 결과는 광릉시험림의 토양생물 분포는 주로 토양의 깊이에 영향을 받으며, 산림형은 부분적인 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

Abstract: The aim of this study was to investigate the distribution of soil biota across forest types and soil depths in Gwangneung Experimental Forest. We selected 5 sites, which are 3 deciduous- and 2 coniferous forests. The abundance of microflora in these areas was analyzed by the phospholipid fatty acid (PLFA) indicators, and the density of mesofauna was measured by the abundance of nematodes and microarthropods. The abundance of soil microflora was higher in the A layer than in the B layer based on the PLFA indicators, but there were no differences between deciduous and coniferous forests. Average density of nematodes was higher in the A horizon than in the B horizon. The density of fungivorous nematodes was higher in the deciduous forests. Mean densities of Collembola and Oribatida were 44% and 42% of microarthropods in soil samples, respectively. The results of microbial PLFA indicators were significantly correlated with the density of their consumers, which reflected that the food web in fungi- and bacteria-based soil developed in this forests. This study suggested that the distribution of soil organisms largely separated by soil depths and was slightly affected by the forest type in the Gwangneung Experimental Forest.

Key words : coniferous, deciduous, microarthropod, nematode, PLFA, soil depth

서론

광릉의 산림은 1911년에 시험림으로 지정된 이래로 식생을 중심으로 다양한 연구가 이루어져 왔다(이경재 등, 1990). 산림토양연구와 관련하여 광릉 지역의 토양 환경 인자와 식생 분석에서 수층분포가 토양산도, 유기물함량, 전질소함량 등의 토양성질에 영향을 받는 것으로 나타났

다(이경재 등, 1990). 또한, 토양의 입지환경과 천연활엽수림의 지상부 생체량, 낙엽량, 탄소축적량의 관련성에 대한 연구도 진행되고 있다(Lim *et al.*, 2003).

산림토양의 미생물 및 중형동물은 토양생태계에서 유기물의 분해 및 양분의 이동 과정에서 중요한 역할을 한다. 유기물의 분해 속도는 유기물의 구성에 따라 달라지며, 미소절지동물은 유기물의 화학성을 변화시켜 분해속도에 영향을 미친다(Wickings and Grandy, 2011). 토양 미생물 지수와 미소절지동물의 밀도는 지상부 식물의 종다

*Corresponding author
E-mail: bbpark@forest.go.kr

양성과 밀접한 관계가 있으며(Eisenhauer *et al.*, 2011), 토양생물의 밀도는 식물의 생장에 영향을 미친다(Cole *et al.*, 2004). 토양동물은 산림토양의 화학적, 물리적 성질뿐만 아니라 산림토양의 훼손정도를 반영하는 지표로 사용할 수 있기 때문에 이들의 연구가 중요하다(Hanel, 2010; Heneghan *et al.*, 2004; Neher, 2001).

광릉지역 산림의 토양생물에 대한 연구를 살펴보면 광릉시험림의 고등균류의 분포와 다양성에 대한 조사가 있었고(Lee *et al.*, 1987), 중형동물 중에서는 선충, 톱토기, 응애류의 밀도에 대한 연구가 보고되었다(Park *et al.*, 1996; 박홍현 등, 1996; 정철의 등, 1998). 유기물의 분해와 관련하여 낙엽주머니를 이용한 실험에서 응애류 및 톱토기목의 조사와(배운환과 이준호, 1997), 잣나무림의 낙엽분해에 참여하는 날개응애류의 종류 및 밀도와 토양절지동물의 영향에 대한 보고가 있다(배운환, 2001; 배운환과 이준호, 1999).

본 연구에서는 광릉시험림의 식생을 침엽수림과 활엽수림으로 나누어 각각의 지역에서 토양의 깊이에 따른 토양생물의 분포를 조사하였다. 또한, 미생물 중에서 세균과 곰팡이를 중심으로 이들을 섭식하는 중형동물들과의 상관관계 연구를 목표로 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구의 실험은 광릉시험림(KEF, Kwangneung Experimental Forest)에서 이뤄졌다. 광릉시험림은 서울에서 북서쪽 방향으로 30 km 떨어져 있고, 시험지 면적은 2,240 ha이다. 조사구는 소리봉주변의 작은 유역(127°8'31" ~127°10'14" E, 37°44'30" ~37°45'21" N)이며 해발고 55~533 m 안에 위치하고 있다. 지형은 경사도 10° 정도의 계곡형으로 주로 동사면을 이루고 있다. 해발고가 높은 지역에서는 천연활엽수림이 분포하며, 졸참나무(*Quercus serrata*), 서어나무(*Carpinus laxiflora*), 까치박달(*Carpinus cordata*), 고로쇠나무(*Acer pictum*)가 우점 수종이며, 해발고가 낮은 지역에는 전나무(*Abies holophylla*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 구상나무(*Abies koreana*)가 조림되었다(Chun *et al.*, 2007). 이 지역은 여름은 덥고 습하며(monsoon climate)

겨울은 춥고 건조한(continental climate) 기후이다. 연평균 기온은 11.3°C이고 연평균 강수량은 1,363 mm이다(Lim *et al.*, 2003). 모암은 화강편마암(granite gneiss)이며 토양형은 갈색산림토양(brown soil)에 속하고, 평균 토심은 52 cm, 토성은 양토와 사양토로 pH는 4.2~5.2로 약산성이다(Lim *et al.*, 2003).

2. 토양시료 채취

2005년부터 유역수준의 산림생체량 및 임분구조 조사에 이용된 9개의 조사구(Chun *et al.*, 2007) 중 5개의 조사구(1, 2, 3, 6, 7)에서 토양을 채취하였다. 조사구 1, 2, 3은 천연 활엽수림이며, 조사구 6과 7은 전나무 조림지이다(Table 1). 조사구 크기는 20 m×20 m 또는 30 m×30 m이며 토양 채취는 조사구를 4분위로 나눈 후, 각 분위에서 고사목이나 동물에 의한 훼손이 없고 수목에서 1 m 이상 떨어진 지점을 선정하였다. 유기물층을 제거한 후 그 아래의 광물질토양을 유기물의 함량이나 색깔로 구분하여 A층(평균 깊이 7 cm)과 B층(평균 깊이 19 cm)으로 나누었다. 각각의 층에서 500 g 토양을 채취한 후 바로 실험실로 옮겨 토양 미생물 및 중형동물 조사에 이용하였다.

3. 토양화학분석

상온에서 72시간 동안 건조한 토양을 이용하여 pH, EC, 유기물, 총질소, 유효태인산 및 치환성양이온을 분석하였다. 토양 pH(1:5)와 전기전도도(EC)는 초자전극법으로 분석하였고, 총탄소 및 총질소함량은 CN 분석기(Vario Max CN, Elementar Analysensysteme, Germany)를 이용하여 측정하였으며, 유기물 함량은 측정된 총탄소함량을 환산계수로 계산하였다. 유효인산함량은 Lancaster법으로 측정하였으며, 치환성 양이온함량은 1 N NH₄OAc(pH 7.0)으로 침출한 후 그 여과액을 ICP(Integra XL DUAL, GBC Scientific Equipment, USA)를 이용하여 측정하였다.

4. 미생물 PLFA 분석

식생 및 토심에 따른 미생물상과 환경요인을 알아보기 위하여 인지질지방산(PLFA, phospholipid fatty acid)을 Peacock *et al.*(2001)의 방법에 따라 다음과 같이 분석하였다. 동결건조 후 냉동보관한 토양시료 5 g에 chloroform(4

Table 1. Characteristics of experiment sites.

	Forest type	Sampled size	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Dominant species
Site 1	Deciduous forest	20 m × 20 m	34.0	<i>Quercus serrata</i> , <i>Carpinus laxiflora</i> , <i>Carpinus cordata</i>
Site 2	Deciduous forest	30 m × 30 m	21.5	<i>Quercus serrata</i> , <i>Carpinus laxiflora</i> , <i>Carpinus cordata</i>
Site 3	Deciduous forest	20 m × 20 m	36.1	<i>Quercus serrata</i> , <i>Carpinus cordata</i>
Site 6	Coniferous forest	30 m × 30 m	35.5	<i>Abies holophylla</i>
Site 7	Coniferous forest	20 m × 20 m	18.0	<i>Abies holophylla</i>

mL), methanol(8 mL), buffer solution(3.2 mL, pH 7.4)을 혼합하여 지질을 추출한 후 silicic acid column으로 neutral-, glyco- 및 phospho-lipid로 분리하여, MIDI Sherlock Microbial Identification System(MIDI Inc., Newark, DE)으로 지방산을 정성 및 정량하였다. 전체 PLFA 중에서 주요 지표 지방산은 Li *et al.*(2006)의 방법에 따른 지표들을 이용하여 지방산을 분류하였다. 각 인지질지방산의 값은 표준물질로 첨가한 19:0를 기준으로 농도를 환산하여 계산하였다. 단불포화 지방산은 16:1 ω5c, 17:1 ω8c, 18:1 ω7c, 포화지방산은 14:0, 15:0, 16:0, 17:0, 18:0, 20:0을 지표지방산으로 사용하였다. 호기성균은 16:1 ω7t, 혐기성균은 cy19:0을 사용하였다. 그램 음성균의 지표 지방산은 18:1 ω7c, 19:0cy ω8c, 17:1 ω8c, 그램 양성균은 i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0, 세균은 그램 음성균과 양성균을 모두 이용하였다. 곰팡이는 18:2 ω6, 9c, 방선균은 10Me16:0, 10Me17:0, TBSA10Me18:0, 균근균은 16:1 ω5c을 이용하였다(Li *et al.*, 2006).

5. 토양 중형동물상 조사

선충은 베르만깔대기법을 이용하여 20 g의 토양을 48시간 동안 상온에서 추출하여 TAF 용액(2% triethanolamine, 2.8% formaldehyde)에 보관한 후, 선충의 구두부와 내부기관을 관찰하여 세균섭식성, 곰팡이섭식성, 식물섭식성, 잡식성, 포식성 선충으로 분류하였다. 선충의 추출에 사용한 토양은 건조하여 토양수분함량을 측정하였으며, 선충의 밀도는 건조토양 1 g당 개체수(N)로 표기하였다. 미소절지동물은 틀그렌장치를 이용하여 200 mL의 토양을 96시간동안 추출 후 현미경을 이용해 톱토기와 응애류 등으로 구분하였다.

6. 통계처리

토양별 이화학성, 미생물 PLFA 수치, 중형동물 밀도는 분산분석과 Tukey 검정법으로 분석하였다. 미생물 PLFA와 중형동물의 밀도는 상관계수로 분석하였다. 통계분석은 모두 SAS v9.1(SAS Institute Inc., USA)를 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 토양미생물상

지방산 분석에서 나타난 미생물별 PLFA 지표를 보면 세균, 곰팡이, 방선균 모두 B층보다 A층에서 높았으며, 활엽수림과 침엽수림과의 비교에서는 뚜렷한 차이가 없었다(Table 2). Gram-/Gram+과 Saturated/unsaturated 비율은 pH, 중금속, 양분결핍 등의 스트레스를 나타내는 지표로 이용할 수 있으나(Kaur *et al.*, 2005), 조사 구역간 차이는 없었다. 스트레스 정도를 나타내는 Cyclopropyl/precursor 비율은 A층 보다는 B층에서 약간 높은 경향이 있었다(Table 2). 토양의 EC와 유기물함량은 유의한 차이가 있었으며(Table 3), 미생물과의 상관관계를 분석하였을 때 세균 PLFA 지표는 토양의 EC($r = 0.46, P < 0.05$) 및 유기물함량($r = 0.65, P < 0.05$)과 유의한 상관관계가 있었고, 곰팡이 PLFA 지표도 토양의 EC($r = 0.41, P < 0.05$) 및 유기물함량($r = 0.50, P < 0.05$)과 유의한 양의 상관관계가 나타났다. 위의 결과를 종합하면 이 지역의 토양미생물은 식생에 따른 변화는 적으며, A층에서는 B층보다 유기물 함량이 높고 양호한 환경이 조성되어 미생물의 밀도가 높은 것을 알 수 있다.

Table 2. Microbial characteristics analyzed by the PLFA indicators for microorganisms in soils at different soil depths and sites.

Forest type	G-/G+	Aero/anaero	Sat/unsat	Cyclo/pre	Bacteria	Fungi	Act	VAM	Total	
					(PLFA nmol g ⁻¹ soil)					
A horizon										
Site 1	Deciduous forest	1.34 ^a	0.98 ^b	1.14 ^a	0.82 ^{ab}	24.5 ^a	5.7 ^a	5.7 ^{ab}	1.7 ^{ab}	57.8 ^{ab}
Site 2	Deciduous forest	1.73 ^a	1.01 ^b	0.83 ^a	0.84 ^{ab}	23.9 ^{abc}	4.3 ^{abc}	4.9 ^{ab}	1.6 ^{ab}	50.3 ^{abc}
Site 3	Deciduous forest	1.28 ^a	1.62 ^a	0.91 ^a	0.56 ^b	20.2 ^{abc}	4.2 ^{abc}	4.9 ^{ab}	1.7 ^{ab}	47.3 ^{abc}
Site 6	Coniferous forest	1.40 ^a	1.14 ^{ab}	0.98 ^a	0.85 ^{ab}	19.7 ^{abc}	3.4 ^{abc}	4.4 ^{ab}	1.5 ^{ab}	43.8 ^{abc}
Site 7	Coniferous forest	1.80 ^a	0.92 ^b	0.92 ^a	0.91 ^a	28.6 ^{abc}	5.5 ^{abc}	6.7 ^a	2.0 ^a	64.2 ^a
B horizon										
Site 1	Deciduous forest	1.65 ^a	0.85 ^b	1.07 ^a	1.00 ^a	14.1 ^{abc}	3.0 ^{abc}	2.9 ^b	1.0 ^b	31.0 ^c
Site 2	Deciduous forest	1.20 ^a	1.03 ^b	0.96 ^a	0.82 ^{ab}	15.8 ^d	2.3 ^c	4.0 ^b	0.9 ^{ab}	33.4 ^{bc}
Site 3	Deciduous forest	1.29 ^a	1.20 ^{ab}	0.91 ^a	0.72 ^{ab}	14.4 ^{bc}	2.8 ^{bc}	3.5 ^b	0.9 ^b	31.4 ^{bc}
Site 6	Coniferous forest	1.39 ^a	0.79 ^b	0.93 ^a	1.04 ^a	14.4 ^c	1.9 ^c	3.7 ^b	0.8 ^b	29.5 ^c
Site 7	Coniferous forest	1.30 ^a	0.88 ^b	0.98 ^a	0.92 ^a	16.8 ^{abc}	3.2 ^{abc}	4.4 ^b	1.1 ^{ab}	37.2 ^{bc}

Values indicated by the same letter are not significantly different within the same column including the A and B horizons according to Tukey's test ($P < 0.05$). 'G-', gram-negative bacteria; 'G+', gram-positive bacteria; 'aero', aerobic bacteria; 'anaero', anaerobic bacteria; 'sat', saturated fatty acids; 'unsat', unsaturated fatty acids; 'cyclo', cyclo fatty acids; 'pre', the precursors of cyclo fatty acids; 'act', actinomycetes.

Table 3. Chemical properties of the soils at different soil depths and sites.

Forest type		Moisture (%)	pH	EC (dS/m)	NO ₃ ⁻ (mg/kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	T-N (g/kg)	T-C (g/kg)	C/N	OM (%)
A horizon										
Site 1	Deciduous forest	46.4 ^{ab}	4.8 ^a	0.3 ^{abc}	16.2 ^{bc}	3.4 ^{ab}	0.7 ^g	4.2 ^{bc}	6.1 ^a	7.2 ^{bc}
Site 2	Deciduous forest	57.1 ^a	4.7 ^a	0.3 ^{ab}	27.4 ^{ab}	17.8 ^{ab}	0.8 ^{fg}	6.2 ^a	7.7 ^a	10.6 ^a
Site 3	Deciduous forest	27.2 ^d	5.1 ^a	0.2 ^{bcd}	15.2 ^{bc}	2.6 ^b	1.2 ^d	3.3 ^{bcd}	2.7 ^b	5.7 ^{bcd}
Site 6	Coniferous forest	37.5 ^{bcd}	5.3 ^a	0.4 ^a	36.5 ^a	25.1 ^a	1.3 ^d	4.7 ^{ab}	3.6 ^b	8.1 ^{ab}
Site 7	Coniferous forest	30.6 ^{cd}	4.7 ^a	0.2 ^{bcd}	13.5 ^{bc}	23.2 ^{ab}	1.7 ^{bc}	4.5 ^b	2.7 ^b	7.8 ^b
B horizon										
Site 1	Deciduous forest	38.8 ^{bcd}	4.8 ^a	0.2 ^{bcd}	10.3 ^c	2.2 ^b	0.9 ^{ef}	2.8 ^{cd}	2.9 ^b	4.8 ^{cd}
Site 2	Deciduous forest	44.5 ^{abc}	4.8 ^a	0.2 ^{bcd}	19.0 ^{bc}	3.0 ^b	1.1 ^{de}	3.6 ^{bcd}	3.2 ^b	6.2 ^{bcd}
Site 3	Deciduous forest	26.5 ^d	5.1 ^a	0.1 ^d	9.7 ^c	2.6 ^b	1.6 ^c	2.1 ^d	1.4 ^b	3.6 ^d
Site 6	Coniferous forest	28.2 ^d	4.8 ^a	0.2 ^{bcd}	15.9 ^{bc}	11.6 ^{ab}	1.9 ^b	2.9 ^{cd}	1.6 ^b	5.0 ^{cd}
Site 7	Coniferous forest	27.7 ^d	4.8 ^a	0.2 ^{cd}	9.6 ^c	5.3 ^{ab}	2.2 ^a	3.2 ^{bcd}	1.5 ^b	5.5 ^{bcd}

Values indicated by the same letter are not significantly different within the same column including the A and B horizons according to Tukey's test ($P < 0.05$).

Table 4. Abundance of nematodes including 5 trophic groups in the forest soils of Gwangneung Experimental Forest.

Forest type		Nematodes (Ind g ⁻¹)				
		Bacterivores	Fungivores	Herbivores	Omnivores	Predators
A horizon						
Site 1	Deciduous forest	11.1 ^{abc}	2.0 ^{ab}	3.3 ^{abc}	2.8 ^a	0.9 ^b
Site 2	Deciduous forest	18.0 ^a	1.8 ^{ab}	4.5 ^{ab}	0.7 ^b	1.2 ^a
Site 3	Deciduous forest	20.1 ^a	2.8 ^a	5.3 ^a	1.5 ^{ab}	0.9 ^b
Site 6	Coniferous forest	7.6 ^{bcd}	0.4 ^b	1.6 ^{bc}	1.0 ^b	0.1 ^b
Site 7	Coniferous forest	12.1 ^{ab}	0.3 ^b	0.9 ^{bc}	0.5 ^b	0.4 ^{ab}
B horizon						
Site 1	Deciduous forest	2.3 ^{cd}	0.4 ^b	1.5 ^{abc}	0.5 ^b	0.1 ^b
Site 2	Deciduous forest	4.6 ^{bcd}	0.8 ^{ab}	1.1 ^{bc}	0.5 ^b	0.2 ^b
Site 3	Deciduous forest	6.8 ^{bcd}	0.7 ^b	2.4 ^{abc}	0.7 ^b	0.2 ^{ab}
Site 6	Coniferous forest	1.3 ^d	0.1 ^b	0.2 ^c	0.2 ^b	0.1 ^b
Site 7	Coniferous forest	3.1 ^{bcd}	0.2 ^b	0.4 ^c	0.2 ^b	0.1 ^b

Values indicated by the same letter are not significantly different within the same column including the A and B horizons according to Tukey's test ($P < 0.05$).

2. 선충 개체밀도 및 섭식성별 분포

A층과 B층의 밀도를 비교하면 섭식형태에 상관없이 A층에서의 밀도가 높게 나타났다 (Table 4). 선충의 섭식형태별 분류에서는 세균섭식 선충의 밀도가 전체의 50-80%를 차지하였다. 선충의 군집구조에서 잡식성과 포식성 선충의 비율이 침엽수림보다 활엽수림에서 컸다는 보고가 있으며 (Hanel, 2008), 본 연구에서도 활엽수림에서 비교적 이들의 개체밀도가 크게 나타났다. 선충의 식성분류에서 세균섭식성/곰팡이섭식성 선충의 비율이 활엽수림(약 5-10)보다 침엽수림(19-40)에서 높은 경향이 있었으나, Ruess(2003)는 활엽수림과 침엽수림에서 크게 다르지 않았다고 보고하였다. 본 연구에서는 특히 곰팡이섭식성 선충의 밀도가 활엽수림에서 높게 나타났으나, 이들의 먹이가 되는 곰팡이의 밀도를 나타내는 PLFA 지표는 크게 다르지 않았기 때문에 먹이의 양에 의한 직접적인 영향은

적은 것으로 추측된다 (Table 4).

3. 미소절지동물 분포

A층과 B층의 밀도를 비교하면 톡토기류와 응애류 모두 A층에서 높았으며, 미소절지동물 중에서 톡토기가 약 44%를 차지하였고, 날개응애는 약 42%를 차지하였다 (Table 5). 톡토기의 밀도는 Site 7에서 가장 높았으나, 날개응애의 밀도는 Site 3과 7에서 높았다. 유기물의 C/N율은 유기물분해에 참여하는 동물들의 밀도에 영향을 주는데 (Marschner *et al.*, 2003; Rosenbrock *et al.*, 1995), Site 3과 7의 비교적 낮은 C/N율 (Table 3)은 날개응애의 낮은 밀도와 관련성이 높은 것으로 보인다. 배운환과 이준호 (1997)는 광릉지역에서 낙엽주머니의 낙엽 분해에 관여하는 토양무척추동물의 약 60%는 응애류였다고 하였고, 톡토기목은 약 30%로 대다수를 차지하였다고 하였다. 미소절지동

Table 5. Abundance of microarthropods in the forest soils of Gwangneung Experimental Forest.

Forest type	Microarthropods (Ind 100 mL ⁻¹)			
	Collembola	Oribatida	Mesostigmata	
A horizon				
Site 1	Deciduous forest	3.7 ^b	13.8 ^{bc}	2.1 ^{bc}
Site 2	Deciduous forest	10.3 ^b	3.3 ^{cd}	1.1 ^c
Site 3	Deciduous forest	9.0 ^b	25.4 ^a	3.7 ^{ab}
Site 6	Coniferous forest	7.7 ^b	3.3 ^{cd}	2.0 ^{bc}
Site 7	Coniferous forest	20.3 ^a	16.3 ^{ab}	4.4 ^a
B horizon				
Site 1	Deciduous forest	2.7 ^b	5.7 ^{cd}	1.3 ^c
Site 2	Deciduous forest	4.8 ^b	2.4 ^d	1.4 ^c
Site 3	Deciduous forest	2.9 ^b	3.5 ^{cd}	1.8 ^{abc}
Site 6	Coniferous forest	7.2 ^b	2.6 ^{cd}	1.9 ^{bc}
Site 7	Coniferous forest	4.7 ^b	5.9 ^{cd}	2.0 ^{bc}

Values indicated by the same letter are not significantly different within the same column including the A and B horizons according to Tukey's test ($P < 0.05$).

물은 토양의 화학성에 영향을 받으며, 날개응애는 우리나라 산림토양의 산성화를 나타내는 생물지표로서 이용된 보고가 있다(Jung *et al.*, 2002). 본 연구에서 pH는 톡토기 ($r = -0.10$, $P = 0.52$) 또는 날개응애류($r = 0.08$, $P = 0.63$)와 유의한 상관관계가 없었으며, 정철의 등(1998)이 광릉지역의 날개응애류를 조사하여 이들의 밀도는 pH와 상관관계가 없다고 보고한 내용과 일치하였다.

지상부의 식생에 따라 낙엽의 화학적 성질이 다르며, 이것은 토양생물의 밀도 및 다양성에 영향을 미칠 수 있다(Loranger-Merciris *et al.*, 2007). 박홍현 등(1996)은 광릉지역의 침엽수림 및 활엽수림에서 조사된 중형동물인 응애류의 밀도는 약 12,000 m⁻², 톡토기류의 밀도는 약 3,000 m⁻²로 산림형에 따른 차이가 없다고 보고하였다. 본 연구에서도 미소절지동물의 밀도는 침엽수림과 활엽수림에서 뚜렷한 차이는 없었으며, 톡토기류와 응애류의 밀도는 각각 약 1,500-10,000 m⁻² 및 1,000-12,000 m⁻²로 박홍현 등(1996)의 보고와 유사하였다. 배운환(2001)은 광릉의 잣나무림 낙엽분해에 관련된 날개응애류는 20종 미만이고, 체장이 0.2-0.5 mm인 소형종의 밀도가 높다고 보고하였고, Park *et al.*(1996)은 광릉 지역의 날개응애류를 조사하여 침엽수림에서 101종과 활엽수림에서는 108종을 보고하였다.

4. 미생물과 중형동물의 관계

조사한 광릉지역 토양의 생물들은 미생물을 중심으로 먹이망 구조를 형성하는 것으로 나타났다. 먼저 세균중심의 먹이구조를 살펴보면 세균 PLFA 지표는 세균섭식 선충($r = 0.53$, $P < 0.01$) 및 톡토기($r = 0.36$, $P < 0.05$)와 유의한 상관관계가 나타났기 때문에, 세균과 이들을 섭식하

는 중형동물간의 밀접한 상호관계를 시사한다. 또한, 곰팡이 중심의 먹이구조를 살펴보면 곰팡이 PLFA 지표는 곰팡이섭식성 선충과 유의한 상관관계가 없었으나, 날개응애와는 유의한 양의 상관관계($r = 0.61$, $P < 0.01$)를 보였다. 포식성 선충과 그 이외의 선충의 밀도관계에서 유의한 양의 상관관계가 나타났다($r = 0.66$, $P < 0.01$). 따라서 이 지역 토양생물들은 세균과 곰팡이를 중심으로 이를 섭식하는 중형동물과 포식성 동물들 사이에 유기적인 먹이연쇄구조가 형성되어 있어서, 세균과 곰팡이가 이들의 분포에 영향을 주는 것으로 추측된다.

결론

본 연구에서 광릉시험림 토양의 미생물상 및 중형동물상이 토양의 깊이에 따라 달라지며, 부분적으로 토양의 이화학성에 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 이 지역의 토양생물은 미생물을 중심으로 하는 먹이망구조를 형성하고 있고 산림형에 따른 토양생물 분포는 큰 차이가 없었다. 일반적으로 지상부 낙엽과 수목 뿌리 밀도는 선충 및 응애류의 밀도와 양의 상관관계를 보이며, 임분이 성숙될수록 선충의 밀도가 증가하므로(Fisk *et al.*, 2010; Keith *et al.*, 2009; Reynolds *et al.*, 2003), 향후 낙엽이나 근권분비물에서 공급되는 유기물과 토양생물의 반응에 대한 추가적인 연구가 이 지역에서 필요할 것으로 사료된다.

인용문헌

1. 박홍현, 정철의, 이준호, 이범영. 1996. 남산과 광릉의 토양 미소절지동물에 관한 연구. 한국토양동물학회지 1(1): 37-47.
2. 배운환. 2001. 남산과 광릉지역의 잣나무림에서 낙엽분해과정에 관련된 날개응애 군집분석. 한국토양동물학회지 6(1-2): 25-31.
3. 배운환, 이준호. 1997. 남산과 광릉 활엽수림에서 낙엽분해에 관여하는 토양무척추동물군집에 관한 연구. 한국토양동물학회지 2(2): 83-91.
4. 배운환, 이준호. 1999. 남산과 광릉수목원의 잣나무림에서 낙엽분해과정에 관련된 토양미소절지동물군집. 한국토양동물학회지 4(2): 75-80.
5. 이경재, 조재창, 이봉주, 이도석. 1990. 광릉 산림의 식물군집구조(1). 한국임학회지 79(2): 173-186.
6. 정철의, 이준호, 배운환, 최성식. 1998. 남산과 광릉 활엽수림지역의 날개응애류(Acari: Oribatida) 종 구성. 한국토양동물학회지 3(2): 91-105.
7. Chun, J.H., Lim, J.H. and Lee, D.K. 2007. Biomass estimation of Gwangneung catchment area with landsat ETM+ image. Journal of Korean Forest Society 96(5): 591-601.
8. Cole, L., Dromph, K.M., Boaglio, V. and Bardgett, R.D.

2004. Effect of density and species richness of soil mesofauna on nutrient mineralization and plant growth. *Biology and Fertility of Soils* 39: 337-343.
9. Eisenhauer, N., Yee, K., Johnson, E.A., Maraun, M., Parkinson, D., Straube, D. and Scheu, S. 2011. Positive relationship between herbaceous layer diversity and the performance of soil biota in a temperate forest. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 462-465.
 10. Fisk, M.C., Fahey, T.J. and Groffman, P.M. 2010. Carbon resources, soil organisms, and nitrogen availability: Landscape patterns in a northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management* 260: 1175-1183.
 11. Hanel, L. 2008. Nematode assemblages indicate soil restoration on colliery spoils afforested by planting different tree species and by natural succession. *Applied Soil Ecology* 40: 86-99.
 12. Hanel, L. 2010. An outline of soil nematode succession on abandoned fields in South Bohemia. *Applied Soil Ecology* 46: 355-371.
 13. Heneghan, L., Salmore, A. and Crossley, D.A. 2004. Recovery of decomposition and soil microarthropod communities in an Appalachian watershed two decades after a clearcut. *Forest Ecology and Management* 189: 353-362.
 14. Jung, C., Lee, J.H. and Choi, S.S. 2002. Potential of using oribatid mites (Acari: Oribatida) as biological indicators of forest soil acidification. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 4(4): 213-218.
 15. Kaur, A., Chaudhary, A., Kaur, A., Choudhary, R. and Kaushik, R. 2005. Phospholipid fatty acid - A bioindicator of environment monitoring and assessment in soil ecosystem. *Current Science* 89: 1103-1112.
 16. Keith, A.M., Brooker, R.W., Osler, G.H.R., Chapman, S.J., Burslem, D.F.R.P. and Van der Wal, R. 2009. Strong impacts of belowground tree inputs on soil nematode trophic composition. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1060-1065.
 17. Lee, K.J., Miller, O.K. and Kim, Y.S. 1987. Distribution and diversity of saprophytic, mycorrhizal and parasitic higher fungi in Kwangnung experiment forest in Korea. *Journal of Korean Forestry Society* 76: 376-389.
 18. Li, W.H., Zhang, C.B., Jiang, H.B., Xin, G.R. and Yang, Z.Y. 2006. Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* HBK, *Plant and Soil* 281: 309-324.
 19. Lim, J.H., Shin, J.H., Jin, G.Z., Chun, J.H. and Oh, J.S. 2003. Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung natural forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 5(2): 101-109.
 20. Loranger-Merciris, G., Imbert, D., Bernhard-Reversat, F., Ponge, J. and Lavelle, P. 2007. Soil fauna abundance and diversity in a secondary semi-evergreen forest in Guadeloupe (Lesser Antilles): influence of soil type and dominant tree species. *Biology and Fertility of Soils* 44: 269-276.
 21. Marschner, P., Kandeler, E. and Marschner, B. 2003. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 453-461.
 22. Neher, D. 2001. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology* 33: 161-168.
 23. Park, H.H., Jung, C.E., Lee, J.H., Choi, S.S. and Lee, B.Y. 1996. Faunal list of oribatid mites (Acari: Oribatida) at the 44th (deciduous) and 45th (coniferous) compartment in Kwangreung, Korea. *Korean Journal of Soil Zoology* 1: 95-101.
 24. Peacock, A.D., Mullen, M.D., Ringelberg, D.B., Tyler, D.D., Hedrick, D.B., Gale, P.M. and White, D.C., 2001. Soil microbial community responses to dairy manure or ammonium nitrate applications, *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1011-1019.
 25. Reynolds, B.C., Crossley, D.A. and Hunter, M.D. 2003. Response of soil invertebrates to forest canopy inputs along a productivity gradient. *Pedobiologia* 47: 127-139.
 26. Rosenbrock, P., Busct, F. and Munch, J.C. 1995. Fungal succession and changes in the fungal degradation potential during the initial stage of litter decomposition in a black alder forest (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *European Journal of Soil Biology* 31: 1-11.
 27. Ruess, L. 2003. Nematode soil faunal analysis of decomposition pathways in different ecosystems. *Nematology* 5: 179-181.
 28. Wickings, K. and Grandy, A.S. 2011. The oribatid mite *Scheloribates moestus* (Acari: Oribatida) alters litter chemistry and nutrient cycling during decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 351-358.