

## 살충제(Fenitrothion) 살포가 소나무림의 토양생물에 미치는 영향

권태성<sup>1\*</sup> · 김경희<sup>2</sup> · 김철수<sup>2</sup> · 이종희<sup>3</sup> · 윤충원<sup>4</sup> · 홍 용<sup>5</sup> · 김진태<sup>6</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 산림생태과, <sup>2</sup>산림병해충과, <sup>3</sup>성동구청 공원녹지과, <sup>4</sup>공주대학교 산림자원학과,  
<sup>5</sup>상주대학교 응용생물자원학과, <sup>6</sup>전주환경운동연합

## Effects of Pesticide (Fenitrothion) Application on Soil Organisms in Pine Stand

Tae-Sung Kwon<sup>1</sup>, Kyung-Hee Kim<sup>2</sup>, Chul-Su Kim<sup>2</sup>, Jong-Hee Lee<sup>3</sup>,  
Chung-Weon Yun<sup>4</sup>, Yong Hong<sup>5</sup> and Jin-Tae Kim<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>2</sup>Division of Forest Insect Pests and Disease, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>3</sup>Park & Greenery Division, Seongdong-gu office, Seoul 133-701, Korea

<sup>4</sup>Division of Forest Resources & Landscape Architecture, Kongju National University,  
Yesan-gun 340-802, Korea

<sup>5</sup>Institute of Agricultural Science, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea

<sup>6</sup>Korean Federation for Environmental Movements, Jeonju 560-829, Korea

**요 약:** 피해가 급속히 확산중인 소나무재선충병 방제를 위해 항공방제를 실시하는 소나무림이 증가하면서, 항공방제시 농약침투로 인한 토양생태계 교란의 가능성이 제기되고 있다. 본 연구는 이러한 가능성을 평가하기 위해, 현지 외 야외실험을 BACI 실험설계하에 서울 홍릉시험림의 소나무림에서 면적 25 m<sup>2</sup>인 3개의 방제구와 3개의 대조구를 설치하여 실시하였다. 항공방제 약종인 fenitrothion을 항공방제직후 낙엽에서 검출된 잔류량인 0.0335 kg a.i/ha를 지면에 살포하였다. 농약살포는 2002년 6월 4일, 6월 11일, 6월 29일 3회에 걸쳐 실시하였는데, 살포일은 전년도 부산 지역 항공방제일과 동일한 날짜로 선정하였다. 절족동물, 곰팡이, 세균, 방선균 등의 토양생물의 개체수 조사를 살포 전에 2회, 살포기간중에 2회, 마지막 살포후 3회 실시하였다. 살충제의 살포는 토양에 서식하는 절족동물, 곰팡이, 세균, 방선균의 개체수 변화와 이들 토양생물군집의 구조에 유의한 영향을 주지 않아, 항공방제가 소나무림의 토양생물에 큰 영향을 줄 가능성이 낮음을 나타내었다.

**Abstract:** As the pine wilt disease spread rapidly over Korea in recent, aerial pesticide spraying to the infected pine stands increased abruptly. The increasing aerial pesticide application for control of the disease would result in disturbance of soil ecosystem in pine stands. This study was conducted to assess the disturbance, using field experiment in pine stands of Hongleong experimental forests in Seoul with BACI experimental design with three sprayed plots and three unsprayed plots of 25 m<sup>2</sup>. We sprayed fenitrothion of 0.0335 kg a.i./ha over each of the sprayed plots, being the same as the pesticide residues of litters after aerial spraying. The pesticide had been applied on 4 June, 11 June, and 29 June in 2002, comparable with the dates of the aerial spraying in the previous year in Busan. We monitored population of soil organisms including arthropods, fungi, bacteria, and actinomycetes at two sampling days before pesticide application, at two sampling days during the application season, and at three sampling days after last application for two months since late May in 2002. The pesticide applications did not make any significant effect on the population of arthropods, fungi, bacteria, and actinomycetes in soils and on the structure of soil organism community, showing low probability of significant effects of the aerial pesticide application on soil organisms in pine stands.

**Key words :** insecticide, arthropods, fungi, bacteria, actinomycetes, aerial spraying, community disturbance

\*Corresponding author  
E-mail: kts@foa.go.kr

## 서 론

소나무재선충병은 최근 동아시아와 유럽지역에서 피해가 급속히 증가하고 있어, 이지역의 소나무림 보존에 심각한 위협이 되고 있으며(정영진, 2002; Mota 등, 1999), 국내에서는 1988년에 부산에서 최초로 피해목 감염이 확인된 이래(이창근 등, 1989), 2000년 이후 급속히 전국으로 확산되고 있다(국립산림과학원, 2005). 피해방제를 위해 6-7월경에 광범위한 피해지에서 2-5회 가량 항공방제를 실시하고 있다. 항공방제는 솔수염하늘소의 성충이 출현하는 시기에 솔수염하늘소의 성충을 구제할 목적으로 살포한다. 피해목에서 출현한 성충은 소나무의 가지를 갉아 먹음으로서 소나무재선충을 옮긴다(Kishi, 1995; Kobayashi, 1988).

항공방제에 사용되는 농약은 fenitrothion으로서, 이 약제는 보통 독성의 농약이지만 대부분의 절족동물류가 피해를 받는 범용성의 농약(농약공업협회, 2003)이기 때문에 표적생물인 솔수염하늘소 이외의 곤충류를 비롯한 절족동물류 등의 다양한 비표적 생물군에 악영향을 끼치게 된다. 그리고 토양에 침투한 농약은 토양에 서식하는 다양한 절족동물과 미생물에 영향을 줄 가능성도 있다 하겠다. 토양에 서식하는 생물들은 영양분 공급, 물질순환, 통기성 향상 등 토양의 질을 식물의 성장에 유리하도록 하

는 중요한 기능을 수행하는 만큼, 항공방제로 살포한 농약이 토양생물상에 영향을 준다면, 그 생태적인 파급효과는 우려할 만한 것이다. 항공방제를 반대하는 시민단체에서는 토양생물에 대한 악영향을 반대를 위한 주요 이슈의 하나로 내세우고 있다(문성기, 2000).

본 연구는 소나무재선충병 방제를 위해 항공방제를 실시했을 때 예상되는 농약의 토양 생물상에 미치는 영향을 파악하기 위해 실시되었다. 농약의 독성에 대한 연구는 주로 동물을 대상으로 이루어져 왔으며, 토양생물에 대한 연구는 미흡한 실정이다(김선희와 문경애, 1999). 항공방제 시 지표면에 떨어지는 농약의 양이 일정하지 않기 때문에, 토양 내 농약의 잔류량은 같은 임지내에서도 변이가 심하여(김찬섭과 신상철 2002; 이영득 등, 2003), 현지에서 그 영향을 정확하게 평가하기 위해서는 많은 표본조사가 필요하다(Zar, 1999). 이에 대한 대안으로 소나무림내에서 항공방제시 낙엽층에 투하된 농약의 잔류량과 동일한 약량을 균일하게 살포한 후, 토양내에 서식하는 절족동물상과 미생물상의 변화를 조사하여 그 영향을 간접적으로 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지, 농약살포 및 조사시기

**Table 1. Environmental factors of the study pine stand in Hongleong experimental forest in Seoul. \* t1, t2, and t3: sprayed plots, and c1, c2, and c3: unsprayed plots.**

Kind	Environments	Characteristics
Topography	Altitude	160 m
	Aspect	North
	Slope (°)	10(5-15)
	Topography	Middle slope
Soil	Soil Humidity	Moderate moisture
	Surface of rock (%)	0
	Surface of soil (%)	0(t1*, t3, c1, c3), 20(t2, c2)
	Depth of Fallen Leaf	4.1 ± 1.8(SD)
	Texture	LS (soil 76%, fine soil 20%, clay 4%)
	pH	4.3
	Organic matter (%)	5.7
	Total nitrogen (%)	0.39
	Effective Phosphate (mg/Kg)	89.8
	C.E.C. (cmol <sup>-1</sup> /Kg)	7.92
Vegetation	Coverage of canopy layer	15(c1), 50(c2), 60-80(t1-3, c2)
	Coverage of sub-canopy layer	0(c3), 10(t2, t3, c2), 40-45(t1, c1)
	Coverage of shrub layer	40-50(t1, t2, c2, c3), 60-75(t3, c1)
	Coverage of herb layer	20-35(t2, t3, c2), 60-70(t1, c1, c3)
	Height of canopy layer	13-15 m
	Height of sub-canopy layer	4-6 m
	Height of shrub layer	1-1.5 m
	Height of herb layer	0.2-0.4 m
	DB of canopy layer	18-24 cm

**Table 2. Vegetation of the study plots. The figures indicate dominance of each of plant species as follows; r: rare, + coverage low and scattered, 1: individuals abundant but coverage low (1/10), 2: coverage of 1/10~1/4, 3: 1/4~1/2, 4: 1/2~3/4, 5: 3/4.**

Species	Sprayed Plots			Unsprayed Plots		
	t1	t2	t3	c1	c2	c3
1. Canopy Layer						
<i>Pinus densiflora</i>	5.5	4.4	4.3	4.4	3.3	4.4
2. Sub-canopy Layer						
<i>Sambucus williamsii</i> var. <i>coreana</i>	1.1					
<i>Acer tegmentosum</i>				1.1		
<i>Pinus koraiensis</i>	3.3	1.1	1.1	3.3		
<i>Sorbus alnifolia</i>					1.1	
3. Shrub Layer						
<i>Ailanthus altissima</i>		+			1.1	+
<i>Rhus trichocarpa</i>			+			1.1
<i>Stephanandra incisa</i>		1.1		2.2	2.2	
<i>Maackia amurensis</i>						+
<i>Acer palmatum</i>					+	
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>						+
<i>Aralia elata</i>	1.1	1.1	4.4	3.3	2.2	1.1
<i>Styrax japonica</i>	+	+	+	1.1	2.2	1.1
<i>Prunus</i> sp.						1.1
<i>Rubus coreanus</i>			1.1			
<i>Rhus chinensis</i>		1.1				
<i>Rubus crataegifolius</i>		2.2				
<i>Quercus mongolica</i>	+					
<i>Robinia pseudo-acacia</i>	3.3					2.2
<i>Callicarpa japonica</i>	1.1	+			1.1	
4. Herb Layer						
<i>Dryopteris chinensis</i>	+					
<i>Ailanthus altissima</i>		+			+	
<i>Quercus aliena</i>	+		r	r	+	
<i>Rhus trichocarpa</i>			+			
Species	t1	t2	t3	c1	c2	c3
<i>Stephanandra incisa</i>	1.1	+		2.2		+
<i>Quercus variabilis</i>			r	r		
<i>Celastrus orbiculatus</i>						+
<i>Commelina communis</i>		1.1		+		+
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	2.2		2.2	3.3		3.3
<i>Cocculus trilobus</i>		1.1			1.1	+
<i>Sedum sarmentosum</i>						+
<i>Aralia elata</i>	1.1		1.1	1.1	1.1	
<i>Polygonatum odoratum</i> var. <i>pluriflorum</i>		r				
<i>Indigofera kirilowii</i>	+					
<i>Styrax japonica</i>			1.1		+	
<i>Rubus parvifolius</i>						+
<i>Prunus</i> sp.					+	
<i>Rubus coreanus</i>			+			
<i>Rhus chinensis</i>		+				
<i>Rubus crataegifolius</i>		1.1		+	+	
<i>Quercus acutissima</i>				r		
<i>Ophiopogon japonicus</i>	+					+
<i>Quercus mongolica</i>	+	+				1.1
<i>Robinia pseudo-acacia</i>	1.1					
<i>Persicaria</i> sp.	+					
<i>Lonicera japonica</i>	+					

Table 2. Continued.

Species	Sprayed Plots			Unsprayed Plots		
	t1	t2	t3	c1	c2	c3
<i>Callicarpa japonica</i>	+				+	
<i>Quercus serrata</i>						+
<i>Oplismenus undulatifolius</i>	3.3		1.1	1.1	1.1	2.2
<i>Sorbus alnifolia</i>			+			+
Graminales sp.		+				
<i>Humulus japonicus</i>				+		
Number of Species	21	18	15	16	17	21

토양생물의 조사는 BACI(before/after, control/impact) 실험설계법에 따라 조사시기는 약제살포 전과 후, 조사구는 방제구와 대조구로 배치함으로서 살충제 살포의 영향을 평가하였다. 조사는 국립산림과학원내 홍릉시험림내 상층임분이 소나무림인 곳에서 5×5 m<sup>2</sup> 크기의 조사구를 5 m 간격으로, 방제구와 대조구를 번갈아 가며 6개 설치하였다. 토양분석을 위해 조사임지에서 부엽층 아래의 토양층을 30 ml 씩 5 m 간격으로 10개 채취하여 하나의 비닐백에 담은 후, 이를 국립산림과학원의 토양연구실에 분석을 의뢰하였다. 조사지의 토성 등 환경요인은 Table 1 과 같다. 각 조사구의 교목층은 소나무이며, 아교목층에는 잣나무등 4종이 있었다(Table 2). 관목류는 15종이 발견되었으며, 애기부릅나무(*Aralia elata* var. *canescens*)와 때죽나무(*Styrax japonica*)가 전조사구에서 발견되었고, 초본류는 32종이 발견되었다. 각 조사구에는 15-21종의 식물이 관찰되었다.

항공방제를 모사하기 위해, 살충제로는 소나무재선충병 피해지에서 항공방제에 사용되고 있는 50% 메프 수화제를 사용하였으며, 2002년 부산의 항공방제지의 낙엽층에서 측정된 0.335 kg a.i./ha 과 동일하게(이영득 등 2003), 1 m<sup>2</sup> 당 0.0335 g a.i.의 농약을 물로 백배 희석하여 3개의 방제구에 살포하였고, 3개의 대조구에는 같은 량의 물을 살포하였다. 농약의 살포는 시험실시 전년도인 2001년 부산에서 실시했던 항공방제 일자와 동일하게 6월 4일, 6월 11일, 6월 26일 3회에 걸쳐 실시하였다.

토양생물 조사를 위한 토양시료의 채취는 1차 농약살포(6월 4일)이전인 5월 16일과 5월 26일 2회 실시하였고, 1차 살포후 1일이 경과한 6월 5일과 2차 살포(6월 11일) 2일후인 6월 13일, 3차 살포 3일후인 6월 29일, 11일후인 7월 7일, 그리고 25일후인 7월 21일에 실시하였다. 조사기간중 평균 기온은 22.1°C(11.2-32.3°C)였고, 총 강수량은 290.4 mm 였으며, 강우일수는 24일이었다(기상청).

### 3. 토양절족동물 조사

낙엽 및 부엽층을 걷어내고 나타나는 A층의 토양을 시험대상으로 삼았고, 각 조사구를 두개의 대각선으로 4등

분한 후, 4곳 중 3곳에서 토양을 채취하였다. 토양시료의 채취는 철재의 토양코어(직경 4.8 cm, 깊이 5 cm)를 사용하여 한 지점에서 인접한 두개의 토양시료를 채취하여, 이를 플라스틱통에 담았다. 동일 지점에서 계속 채취되는 것은 피하였다. 토양에 서식하는 절족동물들은 톨그렌 추출기를 사용하여, 48시간 백열등(30 w/220v)에 노출시켜 추출하였다. 추출된 절족동물들은 에틸알콜에 보존한 후, 실체현미경하에서 목이나 과 수준으로 동정하였으며, 톡토기목은 속 또는 종 수준까지 분류동정하였다.

### 4. 토양미생물 조사

토양의 수집은 절족동물과 동일한 3곳의 지점에서, 토양코어(직경 4.8 cm, 깊이 5 cm)로 토양을 수집한 후 4 cm로부터 5 cm 사이 깊이의 토양을 채취하였다. 채집된 토양은 잘 혼합하여 음건시킨 후 10 mesh로 걸러 1 g을 취하여 멸균수에 단계희석하였다. 희석액은 200 µl를 취하여 미생물 종류별 배양기(PDA, NA, ISP II)표면에 잘 퍼준 후, 세균 및 방선균은 28~30°C, 곰팡이는 25°C에서 배양한 후 colony를 계산하여 밀도를 조사하였다. 곰팡이, 세균 및 방선균의 배양을 위해 사용한 배지의 조성성분은 아래와 같다.

① PDA(Potato Dextrose Agar)배지 : 감자 200 g, Dextrose 15 g, Agar 15 g, DW 1 l(곰팡이).

② NA(Nutrient Agar)배지 : Beef extract 5 g, Peptone 10 g, NaCl 5 g, Agar 15 g, DW 1 l(세균).

③ ISP(International *Streptomyces* Project) II배지 : Yeast extract 4 g, Malt extract 10 g, Dextrose 4 g, Agar 20 g, DW 1 l(방선균).

### 5. 자료분석

절족동물의 종(톡토기) 또는 과나 목(다른 절족동물류)의 개체수는 통계검정에 사용하기에는 0의 값이 지나치게 많고 변이가 심해 부적당하여, 톡토기류, 응애류, 개미류, 기타 절족동물류 등의 큰 분류군으로 묶어 분석하였다. 각각의 조사구내에서 한시기에 3개의 샘플에서 채집된 개체

수는 합산하여 분석하였다. 미생물은 방선균, 세균, 곰팡이 등 3개 미생물군의 cfu(colony forming unit)의 총계를 분석에 이용하였다. 자료 값의 변이량이 커서 비모수 통계법을 이용하여 비교하였다. 두 집단을 비교할 때에는 Mann-Whitney U test를, 세 집단이상을 비교할 때에는 Kruskal-Wallis 비모수 ANOVA 분석법을 이용하였다(Zar, 1999). 군집분석은 주성분분석법(principal components analysis)을 이용하였다. 절족동물의 개체수와 미생물의 cfu는 수 단위의 차이가 크기 때문에, 그 격차를 줄이기 위해 값을 로그변환한 후, 미생물의 경우에는 최소값을 뺀 수를 이용하였다. 토양생물 군집에 미치는 영향을 조사하기 위해, 각 군집의 factor score를 사용하여 조사시기와 농약 처리 여부의 2가지 요인의 영향을 ANOVA-검정을 이용하여 분석하였다. 통계프로그램은 STATISTICA(StatSoft, 2001)을 이용하였다.

## 결 과

### 1. 토양절족동물

토양에서 추출된 절족동물의 총 개체수는 1,094개체였고, 이중 61%가 개미류였는데, 이처럼 개미류가 높은 비율을 차지한 것은 colony 전체가 채집된 경우가 6월 5일(대조구 c3에서 161개체 채집), 6월 29일(처리구(t1)에서 317개체 채집) 두차례 있었기 때문이다. 개미류 다음으로는 응애류가 169개체가 채집되어 전체 절족동물류의 15%, 툭토기류는 97개체가 채집되어 전체 개체수의 9%를 점하였다(Table 3). 툭토기류 중에서는 *Isotomurus* sp. 가 56개체로서 전체 툭토기류의 절반 이상을 차지하는 우점종이었다. 조사구별로는 482개체가 채집된 방제구 t1이 가장 많았고, 다음으로는 대조구인 c3가 285개체였으며, 가장 적었던 조사구는 방제구 t3였다. 방제구의 평균은 214.7개

**Table 3. Total number of individuals of soil arthropods collected at each of the six study plots during experimental period.**

Taxa	Species	Sprayed Plots			Unsprayed Plots		
		t1	t2	t3	c1	c2	c3
1. Insecta							
Protura		2			1	3	1
Collembola							
	Tomoceridae				1		
	Sminthuridae					1	
	Isotomidae	5	11		15	19	6
	Onychiuridae	2	3	1			
	Entomobryidae				2		
				11			5
	Neanuridae		1				
	(Other Collem.)	4	2	4			4
Psocoptera						1	1
Thysanoptera		2				3	
Homoptera							
	Aphididae		3	2			
Hemiptera				1	1		
Coleoptera							
	Staphylinidae	1	1			2	
	(Other Col.)	1	2	1	4	3	5
Hymenoptera							
	Formicidae	411	27	2	8	23	196
	(Other Hym.)	2	2		1		3
	Lepidoptera		1				1
	Diptera	1	1	1	5	2	6
	(Other Ins.)	14	11	3	3	3	11
2. Arachnida							
	Acari	28	31	19	23	25	39
	Araneae	1		3			
3. Chilopoda							
	Lithobiomorpha		4				1
	Geophilomorpha	1	1		4		
4. Symphyla		4	2	6	4	4	5
5. (Other Arthropoda)		3	4	1	1	3	1

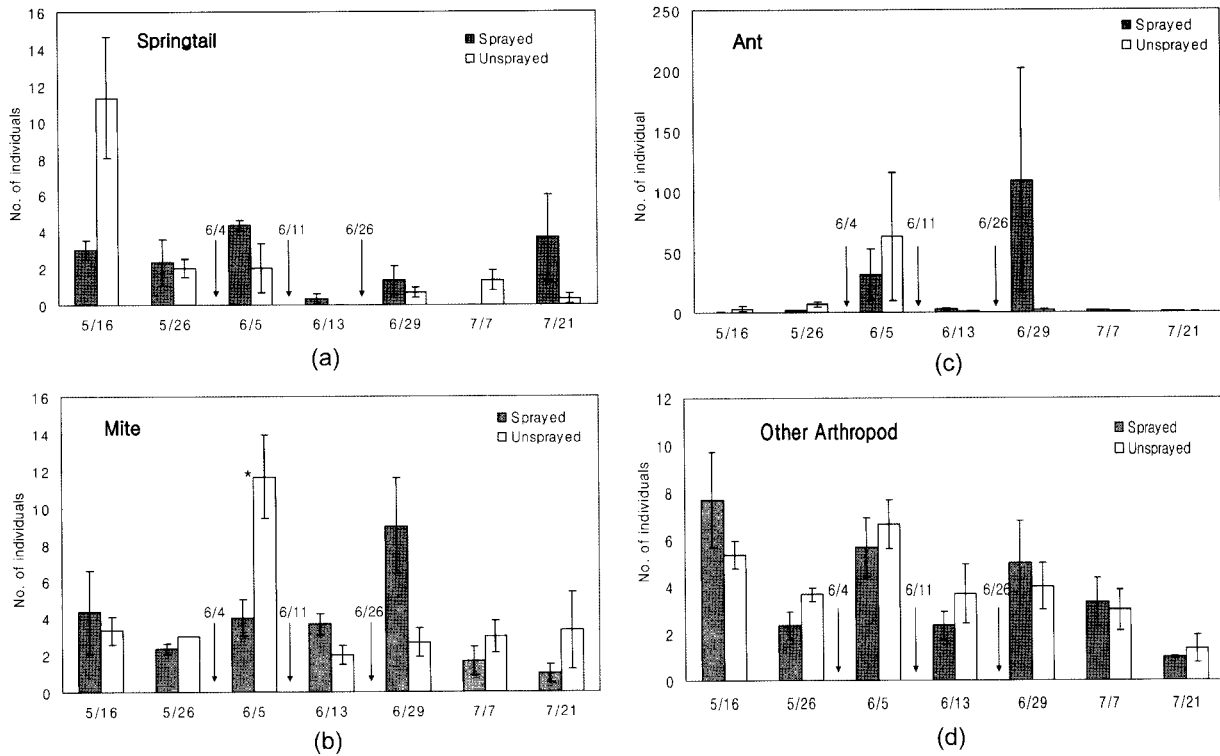


Figure 1. Change of abundance (mean  $\pm$  SD in no. individuals) of springtail (a), mite (b), ant (c), and other arthropods (d). The arrows with dates indicate the dates of pesticide applications, and the asterisk on the bars represent significant difference between the sprayed and unsprayed plots of  $p < 0.05$  in Mann-Whitney U-test.

Table 4. Populations of soil organism according to the pesticide application. Figures (mean with SD in parentheses) are number of individuals per 543 cm<sup>3</sup> of soils in arthropods and cfu/g in microorganisms. <sup>a</sup>before: the days of sampling prior to the day of pesticide application, 0: the day of the application, and 1, 2, 8, and 19 days after the application. <sup>b</sup>nonparametric Mann-Whitney U-test. <sup>c</sup>not significantly different between sprayed and unsprayed plots.

Period	Organism	Sprayed Plot.	Unsprayed Plot.	n	M-U <sup>b</sup>
Before <sup>a</sup>	springtail	2.7 (1.8)	6.7 (6.7)	6	ns <sup>c</sup>
	mite	3.3 (3.1)	3.2 (1.0)	6	ns
	ant	0.8 (0.8)	4.8 (4.5)	6	ns
	other arthropod	5.0 (3.9)	4.5 (1.2)	6	ns
	fungi	264,449 (158,299)	297,615 (137,105)	6	ns
0, 1, 2 days	actinomycetes	116,404 (32,567)	128,556 (94,428)	6	ns
	bacteria	460,958 (93,452)	371,041 (116,428)	6	ns
	springtail	2.0 (2.0)	0.9 (1.6)	9	ns
	mite	5.6 (3.8)	5.4 (5.3)	9	ns
	ant	47.7 (106.3)	21.7 (61.6)	9	ns
8, 19 days	other arthropod	4.3 (2.7)	4.8 (2.4)	9	ns
	fungi	318,858 (163,002)	302,267 (172,521)	9	ns
	actinomycetes	84,423 (43,769)	76,327 (49,176)	9	ns
	bacteria	407,099 (117,618)	729,666 (694,337)	9	ns
	springtail	1.8 (3.6)	0.8 (1.0)	6	ns
8, 19 days	mite	1.3 (1.2)	3.2 (2.9)	6	ns
	ant	1.0 (1.1)	0.5 (0.5)	6	ns
	other arthropod	2.2 (2.1)	2.2 (1.6)	6	ns
	fungi	178,664 (60,160)	178,853 (66,544)	6	ns
	actinomycetes	121,897 (23,759)	125,373 (43,606)	6	ns
8, 19 days	bacteria	373,003 (112,736)	298,402 (141,519)	6	ns

체였고, 대조구는 150개체로서 방제구에서 개체수가 많았으나 통계적인 차이는 없었다(Mann-Whitney U-검정,  $p > 0.05$ ).

절족동물의 밀도변동을 나타낸 것이 Figure 1과 같다. 툯토기류는 전 조사시기에 걸쳐 방제구와 대조구에 밀도 차이는 없었으며(Figure 1의 a), 조사구 간의 밀도변동은 심하나 농약살포 이전과 이후에 일관된 변화가 나타나지 않았으며, 밀도는 조사시기간에는 달랐으나(Kruskal-Wallis 비모수 ANOVA,  $p < 0.01$ ), 방제구와 대조구의 밀도가 방제진후에 걸쳐 차이가 나지 않아(Table 4), 살충제 살포는 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 응애류의 경우, 1차 농약 살포(6월 4일) 1일 후 조사에서 방제구에서 밀도가 낮았으나( $p < 0.01$ ), 2차와 3차 농약 살포 후에는 반대 현상이 나타났다. 응애류의 경우에도 조사시기는 밀도변동에 영향을 주었으나( $p = 0.07$ ), 농약살포는 영향을 주지 않았다(Figure 1의 b, Table 4). 개미류는 조사시기별로 개체수의 변화가 가장 심하였고, 농약으로 인한 밀도변동의 효과는 감지되지 않았다(Figure 1의 c, Table 4). 개미류는 심한 변이로 인해 조사시기별 큰 차이에도 불구하고 조사시기별 비교에서 통계적인 차이 ( $H = 9.3$ ,  $p = 0.16$ )가 나타나지 않았다. 툯토기류, 응애류, 개미류를 제외한 절족동물에서도 밀도변동에 농약살포는 영향을 미치지 않았으나, 조사시기별로는 차이가 뚜렷하였다(Figure 1의 d, Table 4,  $H = 19.04$ ,  $p = 0.004$ ).

2. 토양미생물

조사지역의 토양미생물의 밀도(cfu/건조토양 1g)는 세균이  $45.8 \times 10^4$  ( $14.2 \times 10^4$ - $211.2 \times 10^4$ )로서 가장 높았고, 곰팡이  $26.4 \times 10^4$  ( $7.5 \times 10^4$ - $66.2 \times 10^4$ )였으며, 방선균은  $10.4 \times 10^4$  ( $0.8 \times 10^4$ - $26.2 \times 10^4$ )로 가장 낮았다. 살충제 살포 전후의 각 미생물군의 총 균체수를 비교한 결과(Table 4), 방선균, 곰팡이, 세균 모두 전 시기에 걸쳐 방제구와 대조구간에 차이가 나타나지 않았다( $p > 0.05$ ). 토양 미생물의 총 균체수의 변이계수는 방선균 50%, 곰팡이 54%, 세균 77% 등으로 절족동물 개체수(절족동물류 변이계수: 툯토기류 150%, 응애류 91%, 개미류 361%, 기타 절족동물류 67%)에 비해 변이 폭이 적어 상대적으로 안정적이었다.

각 조사시기별 토양 미생물의 총 균체수 변화는 Figure 2와 같다. 곰팡이는 6월에 밀도가 가장 높았으며, 7월에는 감소하였다. 대조구와 방제구의 변화양상이 비슷하고, 농약살포 후 특별한 변화가 나타나지 않았으며, 모든 조사시기에 두 조사구간에 차이는( $p < 0.05$ ) 나타나지 않았으며, 살충제 살포전, 살포 후에 방제구와 대조구에서 밀도 차이가 나타나지 않아, 살충제 살포는 곰팡이의 밀도 변화에 영향을 주지 않았다(Table 4). 다만 균주 중 한 종류가 농약 살포 후 감소하는 경향을 보였다. 그 균주는 종

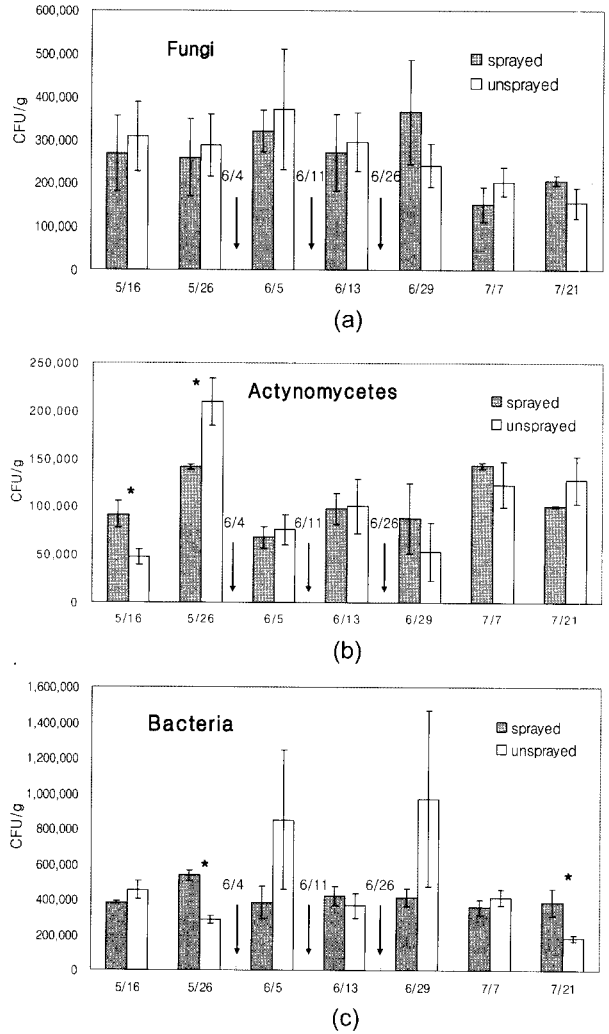
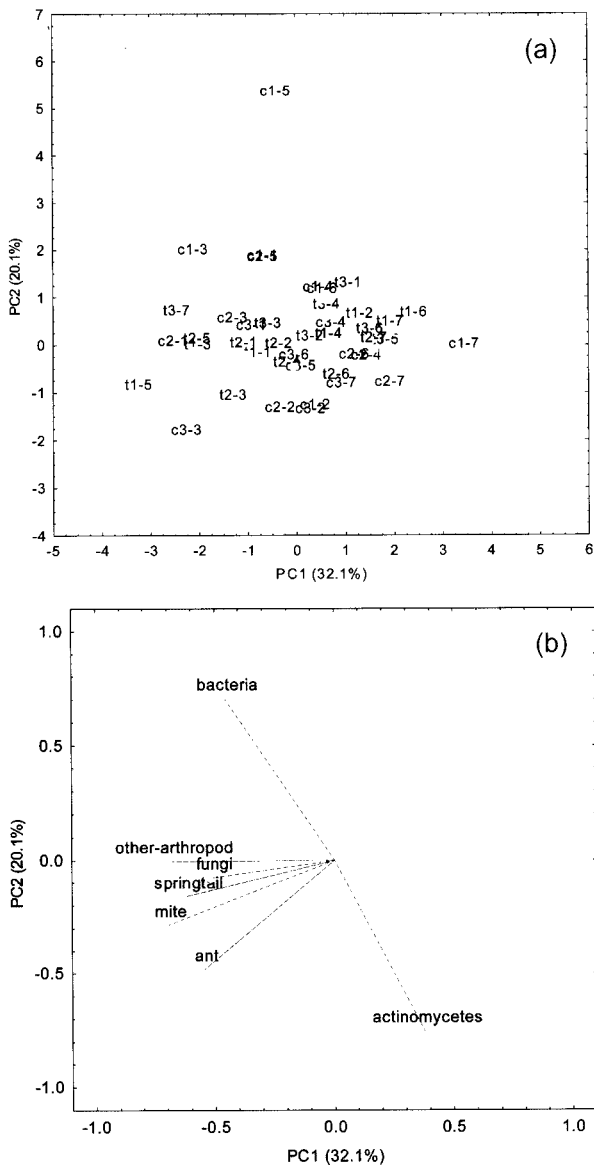


Figure 2. Change of density (colony forming unit, cfu/g of mean  $\pm$  SD) of fungi (a) actinomycetes (b), and bacteria (c). The arrows with dates indicate the dates of pesticide spraying, and the asterisks on the bars represent significant difference between the sprayed and unsprayed plots of  $p < 0.05$  in Mann-Whitney U-test.

명확인을 위해 국립산림과학원의 수병균주보관실에서 보존중이다. 조사시기간의 비교에서도 별다른 차이가 나타나지 않아( $H = 5.2$ ,  $p = 0.52$ ), 곰팡이류는 밀도변화가 적은 것으로 나타났다. 방선균은 곰팡이와도 밀도변화 양상이 달라, 5월 26일에 최성기에 도달한 후 6월에는 낮은 밀도를 유지하다가 7월에는 증가하였으며, 조사시기별로 밀도차가 뚜렷하였다( $H = 19.3$ ,  $p = 0.003$ ). 대조구와 방제구의 밀도변화가 비슷한 추세를 보이고 있고, 살충제 살포 이후에도 이러한 추세가 변하지 않았다(Figure 2의 c). 살포 전후 시기별로 밀도를 비교한 경우에도 곰팡이와 마찬가지로 전 시기에 차이가 나타나지 않아(Table 4), 방선균류도 살충제 살포로 인한 영향이 나타나지 않았다.

세균은 살충제 살포전인 5월 26일 조사에서는 방제구에서 균체수가 많았으나, 1차 및 3차 살충제 살포 직후의 조사에서는 방제구는 대조구의 절반 이하의 균체수가 나타



**Figure 3.** Two-dimensional ordination using principal components analysis of study plots (a) and of soil organisms (b). The captions for the plots indicate the sprayed plots (t1, t2, and t3) and the unprayed plots (c1, c2, and c3) in each of the sampling dates (1: 16 May, 2: 26 May, 3: 5 June, 4: 13 June, 5: 29 June, 6: 7 July, and 7: 21 July in 2002). See Tables 1 and 2 for environments and vegetation of the plots. Pesticide was three times applied over the sprayed plots at 4 June, 11 June, and 26 June in 2002.

났으나, 통계적인 차이는 없었다(Figure 2의 c). 마지막 살포 후 23일이 경과한 7월 21일 조사에서는 방제구에서 균체수가 높았다( $p < 0.05$ ). 따라서 세균의 경우 비록 일관된 변화와 통계적인 효과는 인정되지 않았지만, 살충제 살포로 인한 영향의 가능성을 완전히 배제하기는 어렵다. 만일 이를 살충제의 효과로 본다면, 약해로 인해 일시적으로 감소했다가, 일정기간이 지난 후 살충제분해 세균의 등장으로 균체수가 증가한 것으로 볼 여지는 있을 것이다. 군주별로는 농약살포이후 뚜렷한 감소나 증가양상을 보인 종류는 없었다. 조사시기별로 밀도 차이는 없었다( $H = 6.2, p = 0.4$ ).

### 3. 군집변화

토양생물의 군집이 농약에 의해 변화를 받았는지를 평가하기 위해 다변량분석기법인 주성분분석(principal components analysis)을 실시한 결과는 Figure 3과 같다. 제일 주성분인 PC 1은 전체 변량의 32.1%, 제2 주성분인 Factor 2는 20.1%를 설명하여 두 가지 변수에 의해 전체 변량의 52.2%가 설명되었다. PC 1에 의해 방선균류가 다른 생물군과 분리되었으며, PC 2에 의해 세균, 다른 생물군, 방선균의 3그룹으로 분리되어, 이차원 공간상에서 방선균, 세균, 그리고 다른 생물군의 3그룹으로 나누어졌다. 이러한 것은 토양에 서식하는 절족동물은 미생물중 곰팡이류와는 밀접한 관계를 가지나, 세균은 다음으로 절족동물과 관련성이 높으며, 방선균은 관련성이 상대적으로 약함을 나타내는 것으로 판단된다.

각 조사구의 조사시기별 factor score를 이용하여 PC 1과 PC 2에 대한 2차원 분포를 나타낸 결과, 6월 29일 조사된 대조구 c1이 다른 군집과 분리되었고, 나머지는 좌표상의 원점을 기준으로 응집된 현상을 보이고 있어, 농약살포로 예상되는 군집의 변화는 없었던 것으로 판단된다. 각 군집의 factor score를 통계 검정한 결과에서도 PC 1과 PC 2는 농약살포의 영향은 나타나지 않았으나(Table 5), PC 1은 조사시기별로 차이가 있는 것으로 나타나 조사시기 내에서 군집구조는 비교적 심하게 변화한 것으로 나타났다. 따라서 토양의 생물군집은 5월 하순으로부터 7

**Table 5.** Two-way analysis of variance (ANOVA) to test effects of date and pesticide application on the two principal components (PC) of the communities of soil organisms.

Factor	Variable	SS	DF	MS	F	p
PC 1	date	41.34	6	6.89	4.75	0.002
	pest. spray	0.0002	1	0.0002	0.0001	0.99
	date × pest.	10.03	6	1.67	1.15	0.36
PC 2	date	8.62	6	1.44	1.18	0.35
	pest. spray	0.27	1	0.27	0.22	0.64
	date × pest.	14.72	6	2.45	2.01	0.097



월 하순에 이르는 초여름의 비교적 짧은 기간 동안에도 균집구조의 변화가 심한 것으로 나타났는데(Table 5), PC 1이 방선균과 다른 생물군을 구별하는 변수이고, 방선균이 조사시기별로 밀도 차가 다른 생물군에 큰 점을 감안하면, 방선균의 밀도변화가 토양 생물군집의 시계열적 변화의 주체가 될 것으로 사료된다. 짧은 조사 기간 내에서 통계적으로 유의한( $p < 0.05$ ) 균집변화가 나타나는 것은 장마기간이 끼여 있어 토양습도와 같이 미생물의 서식에 결정적인 영향을 주는 서식환경이 급변하기 때문으로 사료된다.

### 고찰 및 결론

산림에서 생산된 유기물은 토양에서 분해되어 대기와 식물의 구성성분으로 환원되는데, 이러한 탄소순환의 과정에 미생물과 절족동물이 상호 밀접하게 작용하여 중추적인 기능을 수행한다(Lussenhop, 1992). 미생물과 절족동물의 긴밀한 관계에도 불구하고 토양생물군집에 대한 대다수의 연구는 미생물군이나 절족동물군 별도로 수행되고 있으며, 두 생물군을 동시에 연구한 예는 매우 드문 편이고, 국내에서는 아직 수행된 예가 거의 없는 것으로 알고 있다. 본 연구는 이런 점에서 나름의 가치를 갖는다고 할 수 있다. 본 연구에서는 생물군집에 대한 분석 결과 절족동물류와 가장 밀접한 미생물군은 곰팡이이고, 그 다음으로는 세균, 그리고 방선균은 비교적 관련성이 약하게 나타났다. 토양 절족동물류의 먹이원은 다양하여 일반화하기는 어려우나, 먹이계층구조의 기저층을 구성하는 톱토기류와 응애류 중에는 곰팡이류를 주로 섭식하는 종들이 많으며, 세균은 소형 절족동물 보다는 선충이나 원생동물과 같은 미소 동물군에 의해 주로 섭식된다(Griffiths와 Bardgett, 1997). 선충이나 원생동물은 톱토기류나 응애류와 같은 소형 절족동물에 포식됨으로서, 세균은 이차적으로 절족동물과 연결된다. 그에 비해 방선균은 절족동물의 먹이로서의 역할이 곰팡이나 세균에 비해 상대적으로 약하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 나타난 토양생물군들 간의 관계는(Figure 3b) 이러한 토양 생물군집의 먹이망 구조에서 비롯된 결과로 보여 진다.

본 연구에서 사용되었던 살충제인 fenitrothion은 접촉성 유기인계 농약으로서, 살충은 신경전달물질인 acetylcholine의 대사를 담당하는 cholinesterase를 저해하여 다양한 기관의 신경작용을 방해함으로써 이루어진다(Bennett, 2001; Nath와 Kumar, 1999; Villatte와 Bachmann, 2002). 토양에 살충제가 침투하는 경우, 살충 작용으로 인해 절족동물에서는 밀도의 감소가 예상되지만, 토양에 서식하는 미생물의 경우에는 약해로 인한 감소(Pandey와 Singh, 2004; Tu와 Miles, 1976)와 농약분해 미생물의 증가(Topp 등, 1997;

Trabue와 Ou, 2001)의 가능성이 상존하기 때문에, 살충제에 대한 미생물의 반응은 절족동물에 비해 보다 복잡한 양상을 띠게 될 것이다. 본 연구에서 비록 총 균체수에서는 조사된 3개 미생물군 모두 농약살포에 대한 영향이 나타나지 않았지만, 균주별로는 곰팡이에서 농약살포 후 밀도가 감소하는 한 종의 균주가 있었으나, 농약살포 후 증가반응을 보이는 균주는 발견되지 않았다(김경희 미발표자료).

김선희와 문경애(1999)는 소나무림에서 솔잎혹파리 지면처리 약제로 사용되는 diazinon과 ethoprophos의 두 약종을 처리한 결과 농약 처리구에서 무처리구에 비해 미생물 활성도가 다소 증가하나 통계적인 유의성은 없어 토양 미생물 활성에 별다른 영향을 미치지 못할 것으로 보았고, 또한 살충제 살포는 낙엽분해율에 영향을 미치지 않은 것으로 보고하였다. 노정구와 백옥련(1981)은 곰팡이 살균제인 Isoprothiolane, 살충제인 Acephate, 제초제인 Butachlor의 3가지 농약에 의한 토양미생물의 영향을 조사한 결과 곰팡이 살균제만이 곰팡이의 수를 약간 감소시켰을 뿐 살충제와 제초제는 별다른 영향을 미치지 않은 것으로 보고하였다. 대다수의 유사한 연구들도 살충제 처리로 인한 토양 미생물에 대한 영향은 비교적 미미한 것을 나타내고 있다(양창술, 1984; Dirak과 Ozcelik, 1998; Schuster와 Schroder, 1990; Hart와 Brookes, 1996). 그러나 과다한 살충제를 옹용하는 경우에는 토양 미생물에 영향이 나타나기도 한다(Tu와 Miles, 1976). 따라서 본 연구에서 3회에 걸쳐 살포한 fenitrothion이 토양 미생물의 균체수 변화에 대해 별다른 영향을 주지 않은 것은 기존 연구결과 등과 거의 일치하는 현상으로 볼 수 있다. 다만 세균의 경우 살충제 효과의 가능성을 완전히 배제하기는 어렵기 때문에 추가 검정작업이 필요한 것으로 사료된다. 그리고 분해성이 높은 유기인산계 농약을 2년 이상 계속해서 살포하게 되면, 농약분해 미생물이 생성되어 분해가 촉진되는 것으로 알려져 있다(Oshihiro 등, 1996). 피해특성상 장기간에 걸쳐 항공방제를 실시할 수 밖에 없는 소나무재선충병 피해지에서는 농약분해 미생물들이 생겨날 것으로 예견되며, 이들 미생물들은 항공방제의 위해를 막는 완충작용을 할 것으로 기대된다.

그러나 fenitrothion에 대한 감수성이 높을 것으로 예상되는 절족동물에서 별다른 영향이 나타나지 않은 것은 다소 의외의 결과라 할 수 있다. 부산의 항공방제지인 철마 지역에서 항공방제 직후 낙엽층에서는 0.335 kg a.i./ha의 농약이 검출된 데 비해, 토양 층에서는 1/10 수준인 0.03 kg a.i./ha의 농약이 검출되었다(이영득 등, 2003). 살균하지 않은 사양토에서 fenitrothion의 반감기는 일주일 이내였으며(EXTONET), 일본에서 조사된 반감기는 2-4일이었다(INCHEM). 일반적으로 소나무림 낙엽층의 두께는 활엽수림에 비해 두꺼운 편이다. 본 조사지 낙엽층의 두께

는 평균 4 cm 가량으로(Table 1) 소나무림으로는 얇은 편이고, 토양에 침투하는 살충제의 양은 낙엽층의 두께와 반비례할 것이기 때문에, 비록 토양에 잔류된 살충제의 양을 측정하지는 않았지만, 부산 지역 항공방제지에서 검출된 수준 또는 그 이상의 농약이 토양으로 침투되었을 가능성이 높다. 따라서 항공방제시 우려되는 토양 절족동물의 급격한 감소는 현행 항공방제시 소나무림에 낙하되는 농약의 투여량으로는 나타나지 않을 것으로 사료된다. 그러나 토양 절족동물류의 경우 미생물에 비해 표본간 변이가 심했는데, 이처럼 높은 표본변이도 농약살포 영향의 정확한 평가를 가로막는 원인으로 간과할 수는 없을 것이다. 현지외 조사, 농약살포방법의 상이, 상위분류군 수준의 단층적인 분석 등 본 연구는 여러 점에서 한계를 가지며, 따라서 본 연구의 결과로서 항공방제가 토양생태계에 미치는 영향을 일반화하는 것은 무리일 것이다. 따라서 항공방제가 토양생태계에 미치는 영향을 좀더 정확하게 평가하기 위해서는, 현지조사, 상위 및 하위 분류군 및 기능군에 대한 다층적인 영향평가, 탄소와 질소의 분해능(Fließbach와 Mader, 2004), 미생물의 대사기능, 독성실험 및 위험도 평가 등 다각도의 종합적인 연구가 추후 수행되어야 할 것이다. 그럼에도 불구하고, 본 실험결과는 소나무재선충병 피해림에서 실시되는 항공방제의 약해로 인해 토양 미생물이나 절족동물의 현저한 감소나 군집구조의 급격한 변화와 같은 생물상의 교란이 일어날 가능성은 희박함을 나타낸다고 할 수 있다.

## 인용문헌

1. 국립산림과학원. 2005. 2004년도 산림병해충발생예찰조사연보. 연구보고 05-03호. 170p. 성문사, 서울.
2. 기상청. <http://www.kma.go.kr/kor/weather/climate/>
3. 김선희, 문경애. 1999. 솔잎혹파리 방제사업이 토양의 이화학적 특성, 낙엽의 분해 그리고 토양미생물 활성에 미치는 영향. 환경관리학회지 5: 153-161.
4. 김찬섭, 신상철. 2001. 소나무재선충 피해림 항공방제의 생태계 영향(II)-'메프유제'의 산림환경의 행적-. 월간 임업정보 126: 54-56.
5. 노정구, 백옥련. 1981. 수답용 농약의 토양미생물에 대한 영향. 한국농화학회지 24(3): 174-180.
6. 농약공업협회. 2003. 농약사용지침서. 342-343pp. 삼정인쇄공사.
7. 문성기. 2000. 종다양성확보에 의한 건강한 생태계유지가 최우선. 14-16p. 한국수목보호연구회(주최), 산림청(주관), 소나무재선충 매개충 살충 목적의 항공방제 살포. 공청회 자료, 임업연구원 산림과학관, 서울.
8. 이창근, 변병호, 박지두, 양성일, 장경한. 1989. 우리나라에서 발생한 소나무재선충 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner Nickle)과 매개충. 임업 연보 38: 141-149.
9. 양창술. 1984. 농약이 토양미생물상에 미치는 영향 -유기인산계 살충제 및 살충제산포에 따른 담토양미생물상의 변화. 한국토양비료학회 17(3): 299-306.
10. 이영득, 김찬섭, 권태성. 2003. 소나무재선충 피해림 항공방제의 생태계 영향(9) 항공살포농약 '메프유제'의 산림환경 중 행적(2차년도). 월간 임업정보 141: 58-61.
11. 정영진. 2002. 우리나라에서의 소나무재선충 피해발생과 확산현황. 수목보호 7: 1-9.
12. Bennett, S.M. [http://www.the-piedpiper.co.uk/th13\(h\).htm](http://www.the-piedpiper.co.uk/th13(h).htm)
13. Dirak, M. and S. Ozcelik. 1998. Effect of some pesticides on soil microorganisms. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 60:916-922.
14. EXOTONET. <http://extonet.orst.edu/pips/fenitrot.htm>
15. Fließbach, A. and P. Mader. 2004. Short- and long-term effects on soil microorganisms of two potato pesticide spraying sequences with either glufosinate or dinoseb as defoliants. Bio. Fertil Soils 40: 268-276.
16. INCHEM. 2004. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc133.htm>
17. Griffiths, B.S. and R.D. Bardgett. 1997. Interactions between microbe-feeding invertebrates and soil microorganisms. Pages 165-182 in J.D. van Elsas, J.T. Trevors and E.M.H. Wellington, ed. Modern Soil Microbiology. Marcel Dekker, Inc., New York.
18. Hart, M.R. and P.C. Brookes. 1996. Soil microbial biomass and mineralization of soil organic matter after 19 years of cumulative field applications of pesticides. Soil Bio Biochem 28: 1641-1649.
19. Kishi, Y. 1995 The Pine Wood Nematode and the Japanese Pine Sawyer. Thomas Company, Tokyo, 302pp.
20. Kobayashi, F. 1988. The Japanese pine sawyer. In: Dynamics of forest insect populations, A.A. Berryman (ed), pp. 431-453.
21. Lussenhop, J. 1992. Mechanisms of microarthropod-microbial interactions in soil. Pages 1-13 in M. Begon and A.H. Fitter, ed. Advances in Ecological Research. Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, London.
22. Mota, M.M., H. Braasch, M.A. Bravo, A.C. Penas, W. Bergermeister, K. Metge and E. Sousa. 1999. First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe. Nematology 1: 727-734.
23. Ohshiro, K., T. Kakuta, T. Sakai, H. Hirota, T. Hoshino and T. Uchiyama. 1996. Biodegradation of organophosphorus insecticides by Bacteria isolated from turf green soil. J. Ferment. Bioeng. 82(3): 299-305.
24. Pandey S. and D.K. Singh. 2004. Total bacterial and fungal population after chlorpyrifos and quinaphos treatments in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) soil. Chemosphere 55: 197-205.
25. Schuster, E. and D. Schroder. 1990. Side-effects of sequentially- and simultaneously-applied pesticides on non-target soil microorganisms: Laboratory experiments. Soil Biol. Biochem 22: 375-383.

26. StatSoft, Inc. 2001. STATISTICA for Windows [Computer program manual]. Version 6, Tulsa.
  27. Topp, E., T. Vallaeys and G. Soulas. 1997. Pesticides: microbial degradation and effects on microorganisms. Pages 547-575 in J.D. van Elsas, J.T. Trevors and E.M.H. Wellington. e.d. Modern soil microbiology. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong.
  28. Trabue, S.L., A.V. Ogram and L.T. Ou. 2001. Dynamics of carbofuran-degrading microbial communities in soil during three successive annual applications of carbofuran. *Soil Biology and Biochemistry* 33:75-81.
  29. Tu, C.M. and J.R.W. Miles. 1976. Interaction between insecticides and soil microbes. *Res. Rev.* 64: 17-65.
  30. Villatte, F. and T.T. Bachmann. 2002. How many genes encode cholinesterase in arthropods. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 73: 122-129.
  31. Zar, J.H. 1999. *Biostatistical Analysis*. Fourth edition. Prentice Hall International, Inc., USA. 663pp.
- 

(2005년 8월 16일 접수, 2005년 9월 9일 채택)