

## 항공살포에 따른 Acetamiprid와 Imidacloprid의 산림환경 중 행적

김찬섭\* · 권혜영 · 손경애 · 길근환 · 김진배

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부

(Received on November 8, 2012. Revised on November 19, 2012. Accepted on December 20, 2012)

### Fate of Acetamiprid and Imidacloprid aerially applied to the Pine Forest

Chan-Sub Kim\*, Hye-Young Kwon, Kyeong-Ae Son, Geun-Hwan Gil and Jin-Bae Kim

Department of Agro-Food Safety, National Academy of Agricultural Science,  
Rural Development Administration, Suwon 441-707, Korea

**Abstract** Fate of acetamiprid and imidacloprid aerially sprayed to control pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) were studied in a forest of Haman area. Acetamiprid 20% SL or imidacloprid 20% DC were diluted 100 times and applied two times as rate of 50 L/ha using an aircraft of Bell 206 L helicopter. Average acetamiprid deposits on forest floor ranged from 2 to 4% of standard aerial application rate. Following to the second application, acetamiprid deposits in the pine needle ranged 1.8~8.5 mg/kg and then gradually decreased to 1.2~2.1 mg/kg after 48 days. Deposits on the plant washed off by rainfall and reached to soil surface was ca. 17% of the application rate. All of acetamiprid on the ground resided in the forest floor covering the soil surface, where acetamiprid residues were decreased to a quarter at 48 days after the second application, but they were not detected in soil beneath it. And the only low level of acetamiprid residues, 0.0003 mg/L, was detected in the reservoir nearby the experimental forest on the day of aerial application. The acetamiprid detection was presumably due to spray drift. And average imidacloprid deposits on forest floor ranged from 1 to 3% of standard aerial application rate. Following to the second application, imidacloprid deposits in the pine needle analysed very low concentration of 0.1 mg/kg, but the amount of imidacloprid in wash-off in standard and two-fold treatment were ca. 8% and 4% of the application rate, respectively. Most of imidacloprid on the ground also resided in the forest floor, where imidacloprid residues were decreased to a twentieth at 111 days after the second application, and they were detected below 0.5% of the application rate in soil beneath it. And the low level of imidacloprid, 0.0003~0.0017 mg/L, were detected in the streams in the experimental forest. It was not to the level of contamination concerns.

**Key words** Acetamiprid, Imidacloprid, Aerial application, Fate, Wash-off

## 서 론

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus* Nickle, Pine wood nematode)은 일본과 미국에서 최초로 발견되었으며 (Forestry Research Institute, 1998b), 소나무에 치명적인 피해를 주는 소나무재선충병(Pine wilt disease)을 일으키는 것

(Hanawa et al., 2001; Yoshimura et al., 1999)으로 알려져 있다. 소나무재선충에 한번 감염되면 거의 대부분이 고사하므로(Choi and Moon, 1989; Dwinell, 1997; Moon et al., 1993) 소나무림에 중대한 위협이 되고 있는데 국내에서는 1988년 처음 부산에서 발견(Yi et al., 1989)된 후 8개도로 확대되어 2006년에는 7,891 ha의 소나무 임지에서 발생하였다(Korea Forest Service, 2009). 소나무재선충은 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus* Hope, Japanese pine sawyer)에 의해 전파되는데 솔수염하늘소의 성충이 건전한 소나무의 싹을 갹아먹을 때 상처부위를 통하여 재선충의 감염이

\*Corresponding author

Tel: +82-31-290-0588, Fax: +82-31-290-0508

E-mail: chskim@korea.kr

이루어진다(Forestry Research Institute, 1998a). 소나무재선충에 대한 직접 방제가 곤란하여 매개충인 솔수염하늘소를 대상으로 방제를 실시하고 있다(Aikawa and Togashi, 2000; Zhao et al., 1999; Lee et al., 1990).

농약의 살포는 산림을 포함하여 농업의 생산에 있어서 중요한 일이지만 환경생태계에 의도하지 않은 악영향을 미칠 수 있다. 살포된 농약의 일부는 목표지역을 벗어나 하천이나 호수 등 수계에 직접 유입될 수 있고(Danish EPA 1997a), 목표지역에 살포된 농약도 강우 등 기상조건의 영향에 의하여 이동과 분해의 다양한 작용을 겪게 된다(Danish EPA, 1997b). 일반인들이 가장 우려하는 농약의 수계 유입은 살포 시 비산에 의한 지표수로의 직접유입과 침투수에 의한 지하수계 유입 및 비가 올 때와 그 후에 지표면을 흐르는 유출수에 의한 유입 등으로 구분할 수 있다(Leonard, 1990). 유출수에 의한 경우에는 살포 시 직접 또는 일단 식물체에 부착되었다가 강우에 씻겨 지표에 도달한 농약성분이 물에 녹거나 토양 등 부유입자에 흡착된 형태로 유출수에 의하여 이동하는 과정을 거치게 된다(Bailey et al., 1974). 따라서 산림환경에 살포된 농약이 환경생태계에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 살포농약의 분포양상과 산림환경을 구성하는 요소별 농약의 이동 및 잔류소장에 대한 이해가 필수적이다(Kim et al., 2006). 그러나 우리나라에서는 항공방제에 따른 환경 중에서의 농약의 잔류행적에 대한 연구는 그리 많지 않은 실정으로 흰불나방 방제에 따른 살충효과 및 기생성 천적에 대한 영향을 살펴본 경우(Chung and Ko, 1985)와 대전 근교 산림지역에서 실시한 오리나무 잎벌레 방제용으로 살포된 trichlorfon의 환경동태 연구보고(Lee et al., 1986) 및 cyfluthrin과 trichlorfon의 물에서의 동태와 수서생물에 미치는 영향(Lee et al., 1989)이 보고된 바 있는 정도로 농약살포의 균일성이나 살포 후의 행적에 대한 정량적 연구는 거의 없었다.

본 연구는 솔수염하늘소에 대한 산림항공방제농약으로 새롭게 개발 중인 acetamiprid 액제와 imidacloprid 분산성액제(Korea Crop Protection Association, 2005)의 산림환경 중 행적과 수계유출에 대한 시험을 경상남도 함안군의 산림 지역에서 실시한 결과이다. 항공방제 시 살포농약의 낙하량을 측정하여 단위면적 당 실제 살포량을 산출하고 살포의 균일성을 평가하였으며, 솔잎, 낙엽, 토양 및 빗물 중 농약 잔류량을 측정하여 잔류소장을 파악하였고 인접 배출수계의 물을 채취하여 농약의 잔류량을 지속적으로 분석 관찰하였다.

## 재료 및 방법

### 시험장소

인접한 두 곳의 임야를 시험장소로 선정하였다. 항공 살포된 acetamiprid의 산림환경에서의 행적에 관한 시험은 경

남 함안군 칠서면 천계리 임야(3 ha)에서 실시하였는데 시험지 경사면 하단에 소류지와 한 곳의 유출수 채취가 가능한 지점이 있다. Imidacloprid에 대한 시험은 같은 군의 대산면 대사리 임야(7 ha)에서 실시하였는데 처리구별로 유출수 채취가 가능한 지점이 한 곳씩 있다. 각각의 시험구에서 살포농약의 산림환경 내 분포, 지표면으로의 이동 경로, 부엽토와 토양 중 잔류소장과 물 중 잔류농도를 측정하였다.

### 농약 살포

Bell 206L 헬리콥터를 이용하여 2001년 6월 22일과 29일에 acetamiprid 시험구에는 20% SL(액제) 100배 희석액을 50 L/ha의 비율로 두 번 살포하였고, imidacloprid 시험구는 기준량(3 ha)과 배량(4 ha) 처리구로 나눠 20% DC(분산성액제) 100배 희석액을 각각 50 L/ha와 100 L/ha의 비율로 살포하였다.

### 시료채취

항공 살포시 수목에 부착되는 양과 지표면에 낙하하는 양을 알아보기 위해 처리구별로 한 지점을 선정하여 두 번의 살포시기에 낙하량을 측정하였다. 각 지점별로 분묘 주변의 개활지와 주변의 숲속 지표면에 5반복으로 여지(Whatman No. 2, 지름 11 cm) 4장과 초자 petridish(안지름 9 cm) 2개, 토양을 담은 플라스틱 petridish(안지름 8.6 cm) 2개씩을 설치하여 살포 후 경과시간별(2~24시간)로 수거하였다.

솔잎의 잔류량을 알아보기 위하여 솔잎을 상단과 하단으로 구분하여 7~8회(6월 22, 23, 28, 29일, 7월 6, 19일, 8월 16일, 10월 18일) 채취하였다. 고지가위를 이용하여 10주 이상의 소나무로부터 지상 4~5 m의 솔잎과 지상 1~3 m의 중간 이하의 솔가지를 절단한 다음 솔잎만을 모아 혼합하였다. 수목에 부착된 농약의 지표면으로의 이동정도를 알아보기 위하여 이차 살포 후 소나무 아래에 stainless-steel pan(35 × 31 cm)을 5반복으로 설치하여 빗물을 두 차례 수집하였다. 첫째는 살포 약 8시간 후(강우량 26.5 mm), 둘째는 그 후 7월 6일까지(강우량 105 mm)였는데 반복별로 빗물량을 기록하고 그 중 100 mL를 수거하여 합하였다. 지표면에 도달한 농약의 잔류소장을 조사하기 위하여 소나무 아래의 부엽토층과 부엽토층 밑의 토양을 채취하였는데 일정면적(35 × 31 cm)의 부엽토층과 그 아래의 토양층을 5 cm까지 3반복으로 5회(6월 28일, 7월 6, 19일, 8월 16일, 10월 18일) 채취하였다. Acetamiprid 시험구의 계곡물은 6월 23일부터 8월 16일까지 7회, 인접 소류지의 물은 6월 23일부터 10월 18일까지 8회 채취하였다. Imidacloprid 시험구의 계곡물은 배량 처리구의 경우 6월 28일부터 10월 18일까지 7회 채취하였고, 기준량 처리구의 경우는 6월 28일부터 8월 16일까지 6회 채취하였는데 10월 18일에는 물이 말라 채수할 수 없었다.

**잔류분석**

여지는 가위로 5 mm로 잘라 100 mL 삼각플라스크에 넣고 acetonitrile 50 mL로 1시간 동안 진탕 추출하여 HPLC/UV로 분석하였다. 솔잎은 1 cm로 잘라 분쇄기에 넣고 20 초간 마쇄하여 시료로 분석용 사용하였고, 부엽토층은 썩지 않은 솔잎을 분쇄기로 분쇄하여 유기물층과 골고루 섞어 시료로 사용하였으며, 토양은 2 mm 체를 통과시켜 시료로 사용하였다. 솔잎과 부엽토는 각각 20 g, 토양은 50 g을 300 mL 삼각플라스크에 넣고 0.2 N NH<sub>4</sub>Cl 30 mL와 acetone 100 mL를 가하여 한 시간 동안 진탕 추출한 다음 Celite 545를 깔고 여과하였다. 이 여과액을 분액여두에 옮겨 포화 식염수 50 mL와 증류수 450 mL를 가하고 dichloromethane 50 mL로 3회 진탕 분배하여 얻은 유기용매층을 40°C에서 감압 농축한 다음 n-hexane/dichloromethane/acetonitrile (45/50/5, v/v/v) 혼합용매로 녹였다. 활성화시킨 Florisil(60~100 mesh, Sigma, USA) 5 g에 농축시료를 가하여 위의 혼합용매 50 mL를 흘려버리고 dichloromethane/acetonitrile (50/50, v/v) 혼합용매 60 mL로 용출시킨 다음 감압 농축하고 acetonitrile/0.02 M phosphate buffer, pH 7.0(30/70, v/v)으로 재용해하여 HPLC/UV로 분석하였다. 일부 시료는 Florisil 정제 전에 GPC로 한 번 더 불순물을 제거하였다. 빗물, 수계시료 등 물은 500 mL를 Whatman No. 2로 여과한 다음 분액여두에 옮겨 포화식염수 50 mL를 가하고 dichloromethane 50 mL로 3회 진탕 분배하였다. 유기용매층을 40°C에서 감압 농축한 다음 acetonitrile/0.02 M phosphate buffer, pH 7.0(50/50, v/v)으로 재용해하여 HPLC/UV로 분석하였다.

분석에는 UV/VIS photodiode-array detector가 장착된 Hewlett Packard 1100 HPLC를 사용하였으며, 분석용 칼럼으로 Zorbax XDB-C18(4.6 mm i.d. × 25 cm, 5 μm spherical, Agilent, USA)를 사용하였다. 이동상으로는 acetonitrile/0.02 M phosphate buffer, pH 7.0(50/50, v/v)을 1 mL/min의 속도로 흘려주었고, acetamidrid는 246 nm, imidacloprid는 270 nm에서 검출하였다.

**결과 및 고찰**

**살포농약의 산림환경 내 낙하**

Acetamidrid 시험구에서 여지를 사용하여 측정된 살포농약의 낙하 양상을 Table 1에 나타내었다. 시험지내 분묘 주변 개활지의 일차 살포 시 측정된 평균 낙하량은 4.06 mg/m<sup>2</sup>로 살포량 계산치인 10 mg/m<sup>2</sup> (0.1 kg a.i./ha)의 41% 수준이었고 이차 살포 시에 측정값은 계산치 대비 20%에 불과하였으나 반복간의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 인접 숲속 지표면의 낙하량은 일차 살포 시 0.38 mg/m<sup>2</sup>, 이차 살포 시 0.22 mg/m<sup>2</sup>로 살포량 계산치 대비 2~4% 수준이

**Table 1.** Deposition of acetamidrid in pine forest

HAA <sup>a)</sup>	Acetamidrid deposits (mg/m <sup>2</sup> )		
	Filter paper	Glass petridish	Soil in petridish
Opened site, first application			
2	4.06 ± 1.49	3.77 ± 1.58	0.19 ± 0.12
6.5	3.85 ± 1.46		
13	3.68 ± 1.16		
24	0.08 ± 0.04	3.09 ± 1.03	1.49 ± 0.70
Opened site, second application			
2	2.04 ± 0.52		
Covered site, first application			
2	0.38 ± 0.30	0.37 ± 0.31	< 0.005
6.5	0.26 ± 0.16		
13	0.56 ± 0.68		
24	0.14 ± 0.14	0.43 ± 0.32	0.04 ± 0.04
Covered site, second application			
2	0.22 ± 0.14		

<sup>a)</sup>Hours after application.

었다.

수집방법에 따른 차이를 살펴보면 여지에서의 농도는 살포 13시간 후까지는 비슷한 수준을 유지하였으나 살포 다음 날에는 급격히 감소하여 개활지의 경우 살포 2시간 후 농도의 5%에 불과하였다. 솔숲에 설치한 여지의 경우도 비슷한 양상이었으나 그 정도는 심하지 않았다. 같은 시간대에 초자 petridish에서 측정된 농도는 거의 차이가 없는 것으로 보아 두꺼운 종이판 위에 부착한 여지에 부착되었던 acetamidrid가 이슬에 의하여 씻겨 내렸을 것으로 생각되지만 확인시험은 하지 못하였다. 그리고 petridish에 담긴 토양에서는 앞의 두 방법에 비하여 매우 다른 결과를 나타내었는데, 개활지와 솔숲 모두 다른 방법의 초기농도의 5%로 측정되었으나 24시간 경과 후에는 초기농도의 8배 이상으로 증가하였다. 초기농도 분석치가 낮은 것은 acetamidrid의 토양반감기가 1일 정도로 분해가 매우 빠르고(Tomlin, 2009), 시료운반과 분석과정이 적절하지 못하였을 것으로 설명할 수 있다. 다음날 농도가 증가한 것은 솔잎에 부착된 농약이 이슬에 의해 씻겨 내리거나 솔숲 내 공기 중에 존재하던 농약이 온도가 내려감에 따라 지표면에 침적되었을 것으로 생각된다.

Imidacloprid 시험구의 살포농약의 낙하 양상은 Table 2로 나타내었다. 시험지내 개활지에서 측정된 평균 낙하량이 0.26~0.78 mg/m<sup>2</sup>로 살포량 계산치인 10 mg/m<sup>2</sup>(0.1 kg a.i./ha)의 8% 미만으로 나타난 것으로 보아 측정장소가 협소하여 인접 수목에 의한 차폐효과로 낙하량이 적게 측정되었을 것으로 생각되었다. 인접 숲속 지표면의 낙하량은 일차 살포

**Table 2.** Deposition of imidacloprid in pine forest

HAA <sup>a)</sup>	Imidacloprid deposits (mg/m <sup>2</sup> )		
	Filter paper	Glass petridish	Soil in petridish
Opened site, standard treatment, first application			
3.5	0.55 ± 0.23	0.78 ± 0.31	0.61 ± 0.27
7.5	0.36 ± 0.09		
13	0.37 ± 0.17		
24	0.02 ± 0.01	0.57 ± 0.26	0.87 ± 0.40
Opened site, standard treatment, second application			
2	0.42 ± 0.54		
Opened site, two-fold treatment, second application			
2	0.26 ± 0.12		
Covered site, standard treatment, first application			
3.5	0.32 ± 0.26	0.33 ± 0.26	0.26 ± 0.22
7.5	0.27 ± 0.22		
13	0.21 ± 0.17		
24	0.03 ± 0.04	0.25 ± 0.18	0.71 ± 0.66
Covered site, standard treatment, second application			
2	0.08 ± 0.11		
Covered site, two-fold treatment, second application			
2	0.08 ± 0.04		

<sup>a)</sup>Hours after application.

시 0.33 mg/m<sup>2</sup>, 이차 살포 시 0.08 mg/m<sup>2</sup>로 살포량 계산치 대비 1~3% 수준이었다. 수집방법에 따른 차이는 acetamiprid에 비하면 매우 균일한 것으로 생각되었다. 여지 측정값이 다음날 감소하는 경향은 imidacloprid도 acetamiprid와 마찬가지로 이슬에 씻겨 내렸을 것으로 생각된다. 주목해야할 것은 petridish에 토양을 담아 수집한 낙하량 결과는 살포 당일에 비하여 다음날 증가하였으며, 특히 개활지보다 숲속에 서 크게 증가하였다. 이것은 acetamiprid의 양상과 유사하지만 숲속에 부착된 농약이 이슬에 씻겨 내렸을 가능성이 온도 하강에 따른 침적 가능성 보다 높을 것으로 생각된다.

**살포농약의 지표 도달**

Acetamiprid 시험구 살포농약의 지표 도달량을 살포 시에 직접 지표면으로 낙하한 낙하량과 빗물에 의하여 씻겨 내린 양의 합으로 구하여 Table 3으로 나타내었다. 6월 29일 2차 방제 완료 약 8시간 후 26.5 mm의 강우 시에 수집한 빗물을 분석한 결과 acetamiprid의 농도는 0.0789 mg/L이었고, 6월 30일부터 7월 6일까지 수집한 빗물 중 농도는 0.0060 mg/L이었다. 수집된 빗물량 또는 강우량과 용기면적으로 계산한 결과 acetamiprid 1.71 mg/m<sup>2</sup> 정도가 빗물에 씻겨 지표면에 도달한 것으로 판단되었고, 전체 지표 도달량은 살포량의 20% 수준인 2.01 mg/m<sup>2</sup>으로 추정되었다.

Imidacloprid 시험구 살포농약의 지표 도달량은 Table 4로

**Table 3.** Total acetamiprid deposited on the forest floor

Route	When application	By wash-off		Total
		First <sup>a)</sup>	Second <sup>b)</sup>	
Concentration (mg/m <sup>2</sup> )	0.30	1.59	0.12	2.01
Rate (%)	3.0	15.9	1.2	20.1

<sup>a)</sup>In 26.5 mm rainfall at 8 hours after second application.

<sup>b)</sup>In total 105 mm rainfall during June 30~July 6.

**Table 4.** Total imidacloprid deposited on the forest floor

Route	When application	By wash-off		Total
		First <sup>a)</sup>	Second <sup>b)</sup>	
Concentration (mg/m <sup>2</sup> )	0.20	0.72	0.06	0.98
Rate (%)	2.0	7.2	0.6	9.8
Concentration (mg/m <sup>2</sup> )	0.40	0.72	0.11	1.23
Rate (%)	2.0	3.6	0.6	6.2

<sup>a)</sup>In 26.5 mm rainfall at 8 hours after second application.

<sup>b)</sup>In total 105 mm rainfall during June 30~July 6.

나타내었다. 2차 방제 완료 약 8시간 후 수집한 빗물을 분석한 결과 기준량과 배량 처리구 imidacloprid의 농도는 각각 0.0356 mg/L와 0.0358 mg/L이었고, 6월 30일부터 7월 6일까지 수집한 빗물 중 농도는 각각 0.0032 mg/L와 0.0056 mg/L이었다. 수집된 빗물량 또는 강우량과 용기면적으로 계산한 결과 기준량과 배량 처리구에서 각각 0.78 mg/m<sup>2</sup>와 0.83 mg/m<sup>2</sup>의 imidacloprid가 빗물에 씻겨 지표면에 도달한 것으로 판단되었고, 전체 지표 도달율은 각각 10%와 6% 수준으로 추정되었다.

**산림환경 매체 중 잔류행적**

Acetamiprid 시험구의 숲잎 중 농약 잔류량 변화를 Table 5에 나타내었다. 숲잎 중 acetamiprid 함량은 이차 방제 직후 상단부의 1.78 mg/kg에서 111일 경과 후인 10월 18일에는 검출한계(0.01 mg/kg) 미만으로 감소하였고, 같은 기간 동안에 하단부에서는 3.18 mg/kg에서 검출한계 미만으로 감소하였다. Acetamiprid는 식물체에서 분해가 느린 것(Tomlin, 2009)으로 알려져 있어 살포 후 48일까지의 잔류양상은 예상 가능한 것이고 차에 대한 MRL 3 mg/kg(Korea Food and Drug Administration, 2011)에 비하여도 안전하다고 할 수 있다. 그러나 살포 111일 후에 검출한계 미만으로 감소한 것은 설명하기 곤란하다.

Imidacloprid 시험구의 숲잎 중 농약 잔류량 변화를 Table 6에 나타내었다. Imidacloprid 함량은 상단부에서 일차 방제 직후와 다음날 각각 0.21 mg/kg과 0.02 mg/kg으로 분석되

**Table 5.** Dissipation of acetamiprid residues in pine needle after second application in Haman forest

Vertical position	Acetamiprid (mg/kg) at days after second application							
	-7 <sup>c)</sup>	-6	-1	0	7	20	48	111
Upper <sup>a)</sup>	2.16	0.40	1.02	1.78	0.53	1.18	2.10	< 0.01
Lower <sup>b)</sup>	8.48	2.27	3.92	3.18	1.57	0.36	1.21	< 0.01

<sup>a)</sup>4~5 m above the ground and directly exposed to the pesticide.  
<sup>b)</sup>1~3 m above the ground and covered with other pine trees.  
<sup>c)</sup>First application.

**Table 6.** Dissipation of imidacloprid residues in pine needle after second application in Haman forest

Vertical position	Imidacloprid (mg/kg) at days after second application							
	-7 <sup>c)</sup>	-6	-1	0	7	20	48	111
Standard treatment								
Upper <sup>a)</sup>	0.21	0.02	< 0.01	0.08	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Lower <sup>b)</sup>	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Two-fold treatment								
Upper	1.80	NS <sup>d)</sup>	< 0.01	0.12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Lower		NS	< 0.01	0.04	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

<sup>a)</sup>4~5 m above the ground and directly exposed to the pesticide.  
<sup>b)</sup>1~3 m above the ground and covered with other pine trees.  
<sup>c)</sup>First application.  
<sup>d)</sup>Not sampled.

었고, 이차 방제 직후에 0.08 mg/kg, 7일 경과 이후에는 검출한계(0.01 mg/kg) 미만이었다. 같은 기간에 하단부에서는 일차 살포 직후에 0.10 mg/kg으로 측정된 외에는 모든 시료에서 검출한계 미만이었다. Imidacloprid와 acetamiprid의 수용해도가 각각 610 mg/L와 4,250 mg/L이고(Tomlin, 2009), 빗물 중 농도도 acetamiprid가 높았음에도 불구하고 imidacloprid의 솔잎 중 농도가 acetamiprid에 비하여 현저히 낮은 이유로는 imidacloprid의 빠른 광분해 특성(Tomlin, 2009)으로 부분적인 설명이 가능할 것 같다. 그리고 살포 전 2일 전까지 내린 약 200 mm의 강우로 인해 솔잎 내의 습도가 상당히 높았고, 솔잎에 맺힌 이슬이 미처 마르기 전부터 방제가 실시되었기 때문에 아침 7시경에 살포된 imidacloprid와 한 시간 삼십분 뒤에 살포된 acetamiprid의 솔잎 중 잔류양상이 크게 차이가 나는 것으로도 추론할 수 있다.

Acetamiprid 시험구의 산림 지표면에 도달한 농약의 잔류소장을 추적한 결과는 Table 7과 같았다. 2차 방제 직후의

부엽토 중의 농도는 강우로 인하여 측정하지 못하였으나 전 날 채취시료 중의 잔류농도와 지표 낙하량과 wash-off량을 감안하면 3.5 mg/m<sup>2</sup> 정도일 것으로 추정된다. 부엽토 중의 농도는 이차살포 48일 경과 후 4분의 1 수준으로, 111일 경과 후 100분의 1 이하 수준으로 감소하였으며, 부엽토 밑 토양층에서는 acetamiprid가 검출되지 않은 것으로 보아 지표도달 acetamiprid의 대부분이 지표면의 부엽토층에 머물러 이차 방제 후 105 mm 이상의 강우가 있었지만 부엽토층을 지나 토양층까지는 도달하지 못하였거나 토양층에서 신속하게 분해되었을 것으로 판단되었다.

Imidacloprid 시험구의 산림 지표면 도달 농약의 잔류소장 결과는 Table 8에 나타내었다. 2차 방제 직후의 부엽토 중의 농도는 강우로 인하여 측정하지 못하였으나 전 날 채취시료 중의 잔류농도와 지표 낙하량과 wash-off량을 감안하면 기준량과 배량 처리구 각각 4.6 mg/m<sup>2</sup>과 4.1 mg/m<sup>2</sup> 수준으로 계산되었다. 부엽토 중의 농도는 이차살포 111일 경과 후

**Table 7.** Dissipation of acetamiprid deposited on forest floor

Component	Acetamiprid (mg/m <sup>2</sup> ) at days after second application				
	-1	7	20	48	111
Litter <sup>a)</sup>	1.57 ± 0.66	3.20 ± 2.57	2.00 ± 1.22	0.93 ± 0.48	< 0.02
Soil <sup>b)</sup>	< 0.003	< 0.002	< 0.003	< 0.002	< 0.004

<sup>a)</sup>All organic matter including litter and decomposing organic layers.  
<sup>b)</sup>Soil under litter layer.

**Table 8.** Dissipation of imidacloprid deposited on forest floor

Component	Imidacloprid (mg/m <sup>2</sup> ) at days after second application				
	-1	7	20	48	111
Standard treatment					
Litter <sup>a)</sup>	3.72 ± 3.22	1.40 ± 0.89	2.68 ± 2.13	0.75 ± 0.42	0.23 ± 0.22
Soil <sup>b)</sup>	< 0.004	< 0.004	0.02	0.03 ± 0.01	0.01
Two-fold treatment					
Litter	2.94 ± 1.54	1.52 ± 0.92	0.48 ± 0.41	0.39 ± 0.16	0.20 ± 0.12
Soil	< 0.004	< 0.004	0.07 ± 0.05	0.09 ± 0.07	0.04 ± s0.01

<sup>a)</sup>All organic matter including litter and decomposing organic layers.

<sup>b)</sup>Soil under litter layer.

두 처리에서 20분의 1 수준으로 감소하였으며, 부엽토 밑 토양층의 농도는 이차 살포 20일 이후부터 111일 후까지 기준량과 배량 처리구 각각 0.01~0.03 mg/m<sup>2</sup>과 0.04~0.09 mg/m<sup>2</sup> 수준으로 계산되었다. 물에 대한 용해도가 acetamiprid의 7분의 1에 불과한 imidacloprid가 토양층에 검출된 것은 imidacloprid가 토양에서 느리게 분해되는 반면 acetamiprid는 빠르게 분해되기 때문(Tomlin, 2009)일 것으로 추정된다. 즉, 두 농약의 부엽토층에서의 잔류양상이 유사한 점으로 미루어 acetamiprid도 부엽토층에서 밑의 토양층으로 이동이 일어나지만 토양층에서 빠르게 분해되어 검출되지 않은 것으로 설명할 수 있다.

### 수계유출

Acetamiprid 시험구의 계곡수와 인접 소류지의 물을 지속적으로 분석한 결과 이차 살포 당일과 다음날 소류지에서 0.0003 mg/L의 매우 낮은 수준으로 검출된 것을 제외하고는 전 기간 동안 검출한계(0.0002 mg/L) 수준이거나 그 미만이었다. 살포 당일과 다음날 계곡 유출수에서는 검출되지 않았으나 인접 소류지에서 검출되었고 소류지의 위치와 시험구의 지세를 감안하면 항공살포 시의 비산에 의한 것으로 추정된다.

Imidacloprid 기준량과 배량 처리구의 계곡수에서는 이차 살포 당일에 각각 0.0017 mg/L와 0.0016 mg/L로 다소 높게 검출되었고, 다음날과 7일 후에는 각각 0.0005 mg/L와 0.0003 mg/L 수준이었으나 20일 이후에는 모두 검출한계(0.0002 mg/L) 미만이었다.

이는 앞서 살펴본 부엽토와 그 밑 토양의 농약 잔류 양상과 일치한다. 따라서 강우에 의한 acetamiprid 살포지 인접 수계로의 유출 가능성은 거의 없을 것으로 판단된다. Imidacloprid의 경우 시험구로부터 강우 유출물을 100%로 가정하고 계곡수에서 검출된 농도에 근거하여 농약의 유출량을 계산하여도 1% 미만으로 계산되었으며 수분보유력이 높은 산림특성을 감안하면 그보다 훨씬 낮은 수준이었을 것으로 추정된다. 검출수준은 일본의 공공수역 농약 수질지침

0.2 mg/L의 100분의 1 미만으로 우려할 수준이 아니라고 판단된다.

이상의 결과를 종합하면 acetamiprid 20% 액제나 imidacloprid 20% 분산성액제를 헬리콥터를 이용하여 산림에 살포할 경우 비산과 강우 유출 및 흡착 토양의 유실에 의한 지표수계의 오염 및 지하수로의 용탈 가능성은 거의 없을 것으로 판단되었다.

### 감사의 글

본 연구는 2012년 농촌진흥청의 “농약행적 예측기법과 잔류모니터링을 조합한 수계오염성 평가(과제번호: PJ008631)”와 2001년 농촌진흥청의 “농업환경 중 잔류농약의 영향 평가 연구”의 연구비 지원으로 수행된 결과의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

### Literature Cited

- Aikawa, T. and K. Togashi (2000) Movement of *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) in tracheal system of adult *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Nematology* 2:494~500.
- Bailey, G. W., A. R. Swank, Jr. and H. P. Nicholson. (1974) Predicting pesticide runoff from agricultural land: A conceptual model. *J. Environ. Qual.* 3:95~117.
- Choi, Y. E. and Y. S. Moon (1989) Survey on distribution of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) and its pathogenicity to pine trees in Korea. *Korean J. Plant Pathol.* 5:277~286.
- Chung, S. B. and J. H. Ko (1985) Aerial application tests with some low toxicity insecticides against the fall webworm, *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae). *Korean J. Environ. Agric.* 4:108~113.
- Danish EPA (1997a) Deposits of pesticides on the soil surface. *Pesticides Research*. No. 27.
- Danish EPA (1997b) Surface run-off of pesticides from

farmland to streams and lakes. Pesticides Research. No. 29.

Dwinell L. D. (1997) The pinewood nematode: Regulation and mitigation. Annual Review of Phytopathology 35:153~166.

Forestry Research Institute (1998a) Vector insect of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) (1) Pine sawyers (*Monochamus alternatus*). Forestry Information 82:49~52.

Forestry Research Institute (1998b) Occurrence and control of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). Forestry Information 83:63~64.

Hanawa, F., T. Yamada and T. Nakashima. 2001. Phytoalexins from *Pinus Strobus* bark infected with pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Phytochemistry. 57:223~228.

Kim, C. S., B. M. Lee, B. J. Park, P. K. Jung, J. H. Choi and G. H. Ryu (2006) Runoff of diazinon and metolachlor by rainfall simulation and from soybean field lysimeter. The Korean Journal of Pesticide Science 10:279~288.

Korea Crop Protection Association (2005) Agrochemicals Use Guide Book.

Korea Food and Drug Administration (2011) MRLs for pesticides in foods.

Korea Forest Service (2009) <http://www.forest.go.kr>, Press Release.

Lee, S. K., Y. H. Kim and J. K. Roh (1986) Environmental fate of trichlorfon used to control *Agelastica coerulea* B. in forest by aerial application. Korean J. Environ. Agric. 5:119 ~129.

Lee, S. K., Y. H. Kim, T. W. Kim and J. K. Roh (1989) Fates of cyfluthrin and trichlorfon in water and their impacts on aquatic organisms following aerial application over the forest. J. Environ. Agric. 8:17~29.

Lee, S. M., H. Y. Choo, N. C. Park, Y. S. Moon and J. B. Kim (1990) Nematodes and insects associated with dead trees, and pine wood nematode detection from the part of *Monochamus alternatus*. Korean J. Appl. Entomol. 29:14~19.

Leonard, R. A. (1990) Movement of pesticides into surface waters. In Cheng, H. H(ed.). Pesticide in the soil environment: Process, Impacts, and Modeling, SSSA, Madison, WI, 303.

Moon, Y. S., S. M. Lee, C. K. Yi and K. S. Kim (1993), Pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus* Nickle). Res. Rep. For. Res. Inst. 47:140~152.

Tomlin, C. D. S. (2009) The Pesticide Manual. Crop Protection Publications.

Yi, C. K., B. H. Byun, J. D. Park, S. I. Yang and K. H. Jang (1989) Occurrence of pine wood nematode <*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle> and insect vector in Korea. Res. Rep. For. Res. Inst. 38:141~149.

Yoshimura, A., K. Kawasaki, F. Takasu, K. Togashi, K. Futai and N. Shigesada (1999) Modeling the spread of pine wilt disease caused by nematodes with pine sawyers as vector. Ecology 80:1691~1702.

Zhao, J.-N, C.-Q. Zhang, J.-C. Dai, S.-L. Sun and G.-X. Zhou (1999) Studies of emergence emigration of *Monochamus alternatus* and its ability to carry nematodes. Forest Research 12:572~576.

## 항공살포에 따른 Acetamiprid와 Imidacloprid의 산림환경 중 행적

김찬섭\* · 권혜영 · 손경애 · 길근환 · 김진배

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부

**요 약** 소나무재선충 매개충인 솔수염하늘소 방제용으로 살포되는 농약성분의 산림환경 중 분포, 이동 및 잔류소장 등 행적을 파악하고 방제지역으로부터 수계유출에 대한 평가를 목적으로 acetamiprid 액제와 imidacloprid 분산성 액제에 대한 행적실험을 경상남도 함안군 소재 산림에서 실시하였다. 농약의 살포량은 100배 희석액 50 L/ha이었는데 imidacloprid는 배량 시험을 추가하였고 Bell 206L 헬리콥터로 두 번 살포하였다. Acetamiprid의 평균 지표면 낙하량은 표준살포량의 2~4% 수준이었다. 솔잎 중의 잔류량은 살포 직후에 1.8~8.5 mg/kg이었으나 48일 후에는 1.2~2.1 mg/kg로 감소하였고, 빗물에 씻겨 내린 양은 살포량의 17% 수준이었다. 토양표면에 도달한 acetamiprid의 대부분은 부엽토층에 존재하였으며 살포 48일 후에는 표면도달량의 4분의 1 수준으로 감소하였고, 부엽토 밑 토양에서는 전 기간 동안 검출되지 않았다. Acetamiprid는 인접 소류지에서 비산에 의하여 0.0003 mg/L의 낮은 수준으로 검출된 외에는 검출되지 않았다. Imidacloprid의 평균 지표면 낙하량은 표준살포량의 1~3% 수준이었다. 솔잎 중의 잔류량은 살포 직후에도 0.1 mg/kg 수준에 불과하여 솔잎에는 수분과다 등의 원인으로 거의 부착되지 않은 것으로 판단되었으나, 목질부로부터 빗물에 씻겨 내린 양은 살포량의 4~8% 수준이었다. 토양표면에 도달한 imidacloprid의 대부분도 부엽토층에 존재하였으며 살포 111일 후에는 표면도달량의 20분의 1 수준으로 감소하였고, 부엽토 밑 토양에서는 살포량의 0.5% 미만으로 검출되었다. Imidacloprid는 계곡수에서 0.0003~0.0017 mg/L의 낮은 수준으로 검출되었으나 수계오염을 우려할 수준은 아니었다.

**색인어** Acetamiprid, Imidacloprid, 항공방제, 행적, Wash-off