

항공살포에 따른 Fenitrothion의 산림환경 중 행적

김대균 · 김찬섭^{1*} · 이병무² · 최주현¹ · 박재읍¹

경기도 농업과학기술원, ¹농촌진흥청 국립농업과학원, ²국립한경대학교

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

Fate of Fenitrothion aerially applied to the Pine Forest

Dae-Gyun Kim, Chan-Sub Kim^{1*}, Byung-Moo Lee², Ju-Hyeon Choi¹ and Jae-Eup Park¹

Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwasung 445-785, Korea

¹National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon 441-707, Korea

²Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

Abstract Fate of fenitrothion aerially sprayed to control pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) was studied in a forest of Haman area. And the monitoring of fenitrothion was conducted in a stream flowed from forest area of Gijang sprayed fenitrothion. Fenitrothion 50% EC was diluted 100 times and applied two or three times using helicopter in Haman and Gijang, respectively. Average fenitrothion deposits on forest floor ranged from 6% of standard aerial application rate. Following to the second application, fenitrothion deposits in the pine needle ranged from 0.6 to 0.9 mg/kg and then rapidly decreased to 0.01 mg/kg after 109 days. Deposits on the plant washed off by rainfall and reached to soil surface was 1.3% of the application rate. All of fenitrothion on the ground resided in the forest floor covering the soil surface, where fenitrothion residues were decreased to a tenth at 109 days after the second application, but they were not detected in soil beneath it. And the only low level of fenitrothion residues, 0.0009 mg/L, was detected in runoff of the experimental forest just after aerial application. The concentration of fenitrothion in effluent from Gijang area was less than detection limit (0.0001 mg/L) during the entire period.

Key words Fenitrothion, Aerial application, Fate, Deposit, Wash-off

서론

국내에서 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus* Nickle, Pine wood nematode)은 1988년 부산 금정산에서 처음 발견되었으며(Yi et al., 1989), 원산지는 일본과 미국으로 소나무재선충병(Pine wilt disease)을 일으킨다(Forestry Research Institute, 1998; Hanawa et al., 2001; Yosimura et al., 1999). 소나무재선충병은 소나무에 치명적인 피해를 주는 병해로(Dwinell, 1997; Moon et al., 1993) 소나무재선충에 한번 감염되면 대부분이 고사한다(Choi and Moon, 1989). 최초 발견 이래 2006년에는 8개도 54 시군구 7,891 ha의 소나무

임지에 발생되어 1,368,527본의 피해목을 제거한 바 있다(Korea Forest Service, 2009). 스스로 이동능력이 없는 소나무재선충은 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus* Hope, Japanese pine sawyer)에 의해 전파되므로 매개충인 솔수염하늘소만 완전히 방제한다면 이론적으로 소나무재선충의 박멸이 가능하다(Aikawa and Togashi, 2000; Zhao et al., 1999; Lee et al., 1990). 국내에서는 1989년부터 소나무재선충 방제를 위하여 농약의 항공 살포, 고사목 벌채, 소각 등의 종합방제를 실시하고 있으며(Moon et al., 1995), 항공방제는 지상 살포가 어려운 산림의 특성상 앞으로도 계속될 소지가 크므로 산림에서의 살포농약의 행적과 환경독성 평가를 위한 기초자료로 매우 필요하다.

항공방제에 사용된 fenitrothion 유제는 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소 방제약제로 국내에 등록된 농약이며(Korea Crop Protection Association, 2005), 50여 년 전에 일본

*Corresponding author

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

E-mail: chskim@korea.kr

과 독일에서 개발된 유기인계농약으로 살충 대상 범위가 넓고 다른 유기인계 살충제에 비해 상대적으로 안전하여 널리 사용되고 있으며(Tomlin, 2009), 산림해충방제에도 널리 사용되고 있다(Ichikawa et al., 1994; Addison and Holmes, 1995).

환경에 살포된 농약은 대부분 살포지역의 식물체나 토양의 표층에 낙하하지만 일부는 비산되어 강우에 의해 유출 또는 용탈되어 지표수계와 지하수를 오염시킬 가능성이 있다(Kim et al., 2006). 그러나 지금까지 항공방제에 대한 환경오염 측면에서의 접근은 큰 관심사항이 아니어서 항공방제에 관한 연구는 대부분 산림 생태계의 식생, 곤충, 야생동물 등에 관한 조사나 산림병해충의 분포나 피해, 대책 등에 대한 것이었고, 살포농약의 행적에 대한 연구는 매우 드문 실정이다. 산림은 낙엽과 분해 중인 유기물을 포함하는 부엽토층이 토양의 표면을 덮고 있어 경작지와 상당히 다른 토양학적 특징을 나타내는데, 산림토양의 높은 투수성과 더불어 이 부엽토층이 강우에 의한 산림 경사면의 유실을 방지한다(William et al., 1985). 따라서 산림표층의 부엽토층과 그 밑의 토양에서의 농약의 잔류를 조사함으로써 농약의 지하수로의 이동 가능성을 파악할 수 있다. 이에 본 연구에서는 항공살포농약 fenitrothion 유제의 산림환경 내 분포, 이동 및 잔류소장, 수계 유출경로 파악 등의 행적 구명을 목표로 하였으며 아울러 배출수계에 대하여 검출수준을 지속적으로 측정함으로써 fenitrothion에 의한 음용수원 오염가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

시험장소

두 곳의 산림지역을 시험장소로 선정하였는데 항공 살포된 fenitrothion의 산림환경에서의 행적에 관한 실험은 경남 함안군 칠서면 태곡리 임야(3 ha)에서 실시하였고, 부산광역시 기장군 철마면 fenitrothion 방제지역(100 ha)에서는 수계로의 유출을 추적 조사하였다. 함안 행적시험구에서는 살포농약의 산림환경 내의 분포, 지표면으로의 이동 및 경로, 부엽토와 토양 중 잔류소장과 이동 및 물 중 잔류농도를 조사하였다. 기장 방제지역에서는 배출수계 말단의 한 지점(연구리 보림교)에서 지속적으로 물을 채취하여 fenitrothion의 수계로의 유출수준에 대한 평가를 실시하였다.

농약 살포

함안 행적시험구에는 Bell 206L 헬리콥터를 이용하여 2001년 6월 8일과 29일에 fenitrothion 50% EC 100배 희석액을 100 L/ha의 비율로 두 번 살포하였다. 기장 방제지역에서는 같은 희석액을 30 L/ha의 비율로 세 번 살포하였는데, 첫 번째는 2001년 6월 4일 H-500D 헬리콥터로 100 ha, 두 번째는 6월 11일 Bell 206L로 76 ha, 세 번째는 6월 20일에

AS350-B2 기종으로 49 ha에 살포하였다.

시료채취

함안 행적시험구에서는 항공 살포시 수목에 부착되는 양과 지표면에 낙하하는 양을 알아보기 위해 1차 살포시 세 지점, 2차 살포시 한 지점을 선정하였다. 각 지점별로 분묘 주변의 개활지와 주변의 숲속 지표면에 5반복으로 여지(Whatman No. 2, 지름 11 cm)를 4장씩 설치하여 살포 후 경과시간별 (1, 3, 9, 20시간)로 수거하였다. 또한 산림의 경계로부터 10, 50, 100, 150 m의 거리별로 다섯 지점씩을 선정하여 위와 같이 여지를 설치하여 인접지역으로의 비산정도를 알아보았다.

함안 행적시험구에서는 솔잎의 잔류량을 알아보기 위하여 솔잎을 상단과 하단으로 구분하여 5회(6월 29일, 7월 6, 19일, 8월 16일, 10월 16일) 채취하였다. 고지가위를 이용하여 10주 이상의 소나무로부터 지상 4-5m의 솔잎과 지상 1-3m의 중간 이하의 솔가지를 절단한 다음 솔잎만을 모아 혼합하였다. 추가로 실험실내에서 1차 살포 20시간 후 채취한 3개소의 상단과 하단 솔잎시료 각각 50g씩을 2L 병에 넣고 수돗물 1L로 10분간 진탕하여 물에 씻겨 나오는 fenitrothion 양을 솔잎의 fenitrothion양과 비교하여 빗물에 씻겨 내리는 정도를 추정하였다. 수목에 부착된 fenitrothion의 지표면으로의 이동정도를 알아보기 위하여 2차 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 채취하였다. 일정면적 (35 × 31 cm)의 부엽토층과 그 아래의 토양층을 5 cm까지 3반복으로 5회(6월 28일, 7월 6, 19일, 8월 16일, 10월 16일) 채취하였다. 그리고 시험구의 계곡물은 6월 22일부터 10월 16일까지 살포시기와 강우기를 포함하여 8회, 인접 소류지의 물은 6월 7일부터 10월 16일까지 10회 채취하였다.

기장 방제지역에서는 솔잎의 잔류량을 알아보기 위하여 솔잎을 5회(6월 22, 29일, 7월 19일, 8월 16일, 10월 16일), 부엽토층과 부엽토층 밑의 토양은 4회(6월 29일, 7월 19일, 8월 16일, 10월 16일)을 채취하였는데 채취방법은 함안 행적시험구와 같았다. 그리고 배출수가 합류되는 소하천의 한 지점에서 살포시기와 강우기를 포함하여 6월 3일부터 10월 18일까지 16회(6월 3, 4, 8, 10, 11, 14, 17, 18, 20, 22, 29일, 7월 5, 13, 19일, 8월 16일, 10월 16일) 채취하였다.

잔류분석

여지는 가위로 5 mm로 잘라 100 mL 삼각플라스크에 넣

고 acetone 50 mL로 2회(1시간 + 30분) 추출하여 40°C에서 감압 농축한 다음 n-hexane으로 재용해하여 GLC/FPD (Flame photometric detector)로 분석하였다. 솔잎은 1 cm로 잘라 분쇄기에 넣고 20초간 마쇄하여 분석용 시료로 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 NH₄Cl 30 mL와 acetone 100 mL를 가하여 한 시간 동안 진탕 추출한 다음 Celite545를 깔고 여과하였다. 이 여과액을 분액여두에 옮겨 포화식염수 50 mL와 증류수 450 mL를 가하고 dichloromethane 50 mL로 2회 진탕 분배하여 얻은 유기용매층을 40°C에서 감압 농축한 다음 n-hexane/dichloromethane/acetonitrile(49.65/50/0.35, v/v/v) 혼합용매로 녹였다. 활성화시킨 Florisil(60~100 mesh, Sigma, USA) 5 g에 농축 시료를 가하여 위의 혼합용매 60 mL로 용출시킨 다음 감압 농축하고 n-hexane으로 재용해하여 GLC/FPD로 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 2회 진탕 분배하였다. 유기용매층을 40°C에서 감압 농축한 다음 n-hexane으로 재용해하여 GLC/FPD로 분석하였다.

분석에는 FPD가 장착된 Hewlett Packard 5890 Series II 가스 크로마토그래프를 사용하였으며, 분석용 칼럼으로 SPB-5(0.53 mm i.d. × 15 m, 0.5 μm thickness, Supelco, USA)를 사용하였다. 가스 크로마토그래프의 온도조건은 주입구 230°C, 검출기 250°C이었고, 칼럼은 180°C에서 4분 후 분당 20°C씩 상승시켜 270°C에서 1.5분간 유지하였다. 운반기체로는 헬륨을 분당 10 mL씩 흘려주었고, 연료기체로는 수소와 공기를 각각 분당 75 mL와 100 mL씩 공급하였다.

결과 및 고찰

살포농약의 산림환경 내외 낙하

함안 행적시험구에서 여지를 사용하여 측정한 살포농약의 낙하 양상을 Table 1에 나타내었다. 시험지내 분묘 주변 개활지 평균 낙하량은 12.7 mg/m²로 살포량 계산치인 50 mg/m²(0.5 kg a.i./ha)에 비하여 매우 낮은 수준이었고 방제시기, 지점 및 반복간의 차이도 매우 큰 것으로 나타났다. 인접 솔숲 지표면의 낙하량은 2.82 mg/m²로 살포량 계산치 대비 6% 수준이었고 동일 지점 내 반복간의 변이는 심하였으나 방제시기와 지점 간 평균치의 변이는 상대적으로 적었다. 반복간의 변이가 큰 것은 일반 농경지에 비해 입체적 굴곡이 심한 산림지형의 특성 때문인 것으로 사료된다.

Table 1. Deposition of fenitrothion in Haman pine forest

HAA ^{a)}	Fenitrothion deposits (mg/m ²)		
	Site 1	Site 2	Site 3
Opened site, first application			
1	0.026 ± 0.022	19.41 ± 6.92	27.15 ± 13.88
3	0.014 ± 0.002	9.45 ± 2.32	18.71 ± 14.14
9	0.011 ± 0.003	6.46 ± 2.27	10.02 ± 2.97
20	0.031 ± 0.030	2.33 ± 0.32	6.95 ± 1.75
Opened site, second application			
1	4.12 ± 1.96		
Covered site, first application			
1	2.15 ± 2.80	4.54 ± 3.32	3.34 ± 3.16
3	1.07 ± 1.22	4.65 ± 3.38	1.17 ± 0.65
9	1.00 ± 1.40	2.99 ± 2.15	1.45 ± 1.16
20	0.42 ± 0.25	3.40 ± 1.05	1.82 ± 0.48
Covered site, second application			
1	1.24 ± 0.58		

^{a)}Hours after application.

그러나 개활지의 평균 낙하량이 살포량 계산치의 25%에 불과하고 방제시기와 지점별 변이가 큰 것은 낙하량 측정방법이 부적절하였음을 의미한다고 생각된다. 즉 헬리콥터 조종자의 비행경로 회피 또는 살포 일시 증지에 따른 결과일 것으로 추정된다. 따라서 계산치를 시험구의 살포 추정량으로 사용하였다. 동일한 수집판에 부착된 여지 4장을 살포 후 경과시간별로 수집하여 측정한 잔류량은 개활지와 솔숲에서 둘 다 감소하는 것으로 나타났으나, 20시간 후인 다음 날 오전 6시경에는 솔숲에서 회수한 여지 중에서는 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 솔잎에 부착된 농약이 이슬에 의해 씻겨 내리거나 솔숲 내 공기 중에 존재하던 농약이 온도가 내려감에 따라 지표면에 침적되었을 것으로 생각된다.

시험구 외부에서 측정한 fenitrothion의 비산정도를 Table 2에 나타내었다. 시험구로부터 10 m 떨어진 지점에서의 비산 낙하량은 0.007 mg/m²으로 살포량 대비 0.002% 미만으로

Table 2. Drift of fenitrothion away from Haman pine forest

HAT ^{a)}	Fenitrothion deposit (mg/m ²)			
	10 m	50 m	100 m	150 m
1	0.007 ± 0.003	< 0.004	< 0.004 ^{c)}	< 0.004
3	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
9	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
20	< 0.004	< 0.004 ^{b)}	< 0.004	< 0.004

^{a)}Hours after application.

^{b)}Included two samples of 0.017 and 0.036 mg/m².

^{c)}Included one sample of 0.027 mg/m².

극히 적은 양이었다. 이는 농약살포 시 항공기가 산림 밖의 농경지와 민가에 피해가 가지 않도록 시험구 경계 수심 m 안쪽까지만 농약을 살포한 때문으로 보인다. 살포시 헬기가 산림의 외곽지역까지 살포할 경우에는 비산정도가 심해질 가능성이 있다. 산림으로부터 100 m, 150 m 지점에서는 대부분 0.004 mg/m² 미만으로 측정되었다.

살포농약의 지표 도달

함안 행적시험구에서의 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 fenitrothion의 농도는 0.0292 mg/L 이었고, 6월 30일부터 7월 6일까지 수집한 빗물 중 농도는 0.0006 mg/L이었다. 수집된 빗물량 또는 강우량과 용기면적으로 계산한 결과 fenitrothion 0.65 mg/m² 정도가 빗물에 씻겨 지표면에 도달한 것으로 판단되었고, 전체 지표 도달량은 살포량의 6.9% 수준인 3.47 mg/m²으로 추정되었다.

Table 3. Total fenitrothion deposited on the forest floor in Haman

Route	When application	By wash-off		Total
		First ^{a)}	Second ^{b)}	
Concentration (mg/m ²)	2.82	0.59	0.06	3.47
Rate (%)	5.6	1.2	0.1	6.9

^{a)}In 26.5 mm rainfall at 8 hours after second application.

^{b)}In total 105 mm rainfall during June 30~July 6.

Table 4. Dislodgeable fraction of fenitrothion deposited on pine needle by washing

Vertical position	Fenitrothion (mg/kg)		B/A
	Pine needle (A)	Water ^{a)} (B)	
Upper	0.67 ± 0.60	0.22 ± 0.19	0.36
Lower	0.19 ± 0.15	0.07 ± 0.05	0.38

^{a)}Reduced to residues in pine needle.

함안 행적시험구에서 1차 살포 20시간 후 채취한 솔잎 중 fenitrothion의 물로 추출되는 정도를 솔잎 중 잔류량에 대비하여 Table 4로 나타내었다. 물로 추출되는 비율은 상단엽과 하단엽에서 36~38%로 대등하였다. 이로써 살포 후 20여 시간이 경과하여도 많은 강우가 있을 경우에는 상당한 양의 fenitrothion이 지표면으로 빗물에 씻겨 내릴 수 있음을 나타냄과 동시에 앞의 여지를 이용한 낙하량 측정 결과에서 유추하였듯이 이슬에 의한 씻김효과의 가능성도 높을 것으로 생각된다.

산림환경 매체 중 잔류행적

함안 행적시험구의 솔잎 중 fenitrothion의 잔류량 변화를 Table 5에 나타내었다. Fenitrothion 함량은 2차 방제 직후 상단부의 0.92 mg/kg에서 109일 경과 후인 10월 16일에는 0.011 mg/kg으로 감소하였고, 같은 기간 동안에 하단부에서는 0.64 mg/kg에서 0.007 mg/kg로 감소하였다. Fenitrothion의 솔잎 중 잔류량 수준을 국내 농산물 중 잔류허용기준과 비교하여 보면 방제 48일 후에는 가장 낮은 기준인 파에 대한 기준치인 0.02 mg/kg(Korea Food and Drug Administration, 2011)보다는 상회하나 모든 작물에 대한 기준치보다는 낮은

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

Vertical position	Fenitrothion(mg/kg) at days after second application							
	-20 ^{c)}	-8	-1	0	7	20	48	109
Upper ^{a)}	0.67	0.10	0.16	0.92	0.35	0.21	0.04	0.01
Lower ^{b)}	0.19	0.15	0.05	0.64	0.10	0.06	0.02	0.01

^{a)}4~5 m above the ground and directly exposed to the pesticide.

^{b)}1~3 m above the ground and covered with other pine trees.

^{c)}First application.

Table 6. Dissipation of fenitrothion deposited on forest floor in Haman

Component	Fenitrothion (mg/m ²) at days after second application				
	-1	7	20	48	109
Litter ^{a)}	0.94 ± 0.64	2.26 ± 1.32	1.04 ± 0.36	0.47 ± 0.18	0.41 ± 0.19
Soil ^{b)}	< 0.001	< 0.001	< 0.001	NA ^{c)}	NA

^{a)}All organic matter including litter and decomposing organic layers.

^{b)}Soil under litter layer.

^{c)}Not analysed.

Table 7. The changes of fenitrothion deposited in Gijang forest

Component	Fenitrothion (mg/m ²) at days after third application				
	2	9	29	57	118
Pine needle (mg/kg)	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
Litter ^{a)}	NS ^{c)}	0.67 ± 0.49	0.12 ± 0.07	0.04 ± 0.04	0.02 ± 0.01
Soil ^{b)}	NS	< 0.001	< 0.001	NA ^{d)}	NA

^{a)}All organic matter including litter and decomposing organic layers.

^{b)}Soil under litter layer.

^{c)}Not sampled.

^{d)}Not analysed.

것으로 나타났으며 109일 경과 후에는 가장 낮은 파에 대한 기준치보다도 낮게 나타났다.

함안 행적시험구의 산림 지표면에 도달한 fenitrothion의 잔류소장을 추적한 결과는 Table 6과 같았다. 2차 방제 직후의 부엽토 중의 농도는 강우로 인하여 측정하지 못하였으나 전날 채취시료 중의 잔류농도와 지표 낙하량과 wash-off량을 감안하면 4 mg/m²을 상회할 것으로 추정된다. 부엽토 중의 농도는 2차 살포 109일 경과 후 약 10분의 1 수준으로 감소하였으며, 부엽토 밑 토양층에서는 fenitrothion이 검출되지 않은 것으로 보아 지표도달 fenitrothion의 대부분이 지표면의 부엽토층에 흡착되어 2차 방제 후 105 mm 이상의 강우가 있었으나 부엽토층을 지나 토양층까지는 도달하지 못한 것으로 판단되었다.

기장 방제지역에서 솔잎과 산림 지표면에 도달한 fenitrothion의 잔류소장을 추적한 결과는 Table 7과 같았다. 솔잎 중 fenitrothion 함량은 3차 방제 2일 후부터 118일 후까지 대부분 0.01 mg/kg 수준을 유지하였다. 이 수준은 함안 행적시험구의 결과와 비교하면 단위면적당 살포수준이 30%에 불과한 것을 감안하더라도 지나치게 낮은 것으로 살포 전 2일 동안 부산지역에 내린 185 mm의 강우가 원인일 수도 있을 것으로 생각된다. 즉 함안 행적구의 낙하량 측정에서 살포 다음날 솔숲 설치 여지에서의 fenitrothion의 증가와 같이 이슬에 의한 씻김효과가 극대화된 것으로 추정할 수도 있을 것이다. 한편 최종 살포 9일 후의 부엽토 중의 농도는 함안 행적시험구 2차 살포 7일 후 농도와 비교하여 30% 수준으로 단위면적당 살포량과 살포회수를 감안하면 비슷한 비율의 fenitrothion이 지표면에 도달했을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 부식토층에서의 소실은 함안 행적구에 비하여 상당히 빠르게 진행되었다. 토양층의 농도는 0.001 mg/m² 미만으로 측정되어 함안 행적시험구와 마찬가지로 fenitrothion의 대부분이 부엽토층을 지나 토양층까지는 도달하지 못한 것으로 판단되었다.

수계유출

함안 행적시험구의 계곡수와 인근 소류지 및 기장 방제지

역 배출수계의 물을 지속적으로 분석한 결과 2차 살포당일의 계곡수에서 0.0009 mg/L의 매우 낮은 수준으로 검출된 것을 제외하고는 전 기간 동안 검출한계(0.0001 mg/L) 미만이었다. 이는 앞서 살펴본 부엽토와 그 밑 토양의 fenitrothion 잔류 양상과 일치한다. 따라서 강우에 의한 fenitrothion 살포지 인접 수계로의 유출 가능성은 거의 없을 것으로 판단된다. 살포당일 시험지 내 계곡수의 검출된 fenitrothion도 토양에 대한 흡착력으로 인하여 소류지까지는 도달하지 못한 것으로 보이며 국내 음용수 중 잔류허용기준 0.04 mg/L (National Institute of Environmental Research, 2002)에 비교하면 우려할 상황이 아니라고 판단된다.

이상의 결과를 종합하면 fenitrothion 유체를 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

- Addison, J. A. and S. B. Holmes (1995) Comparison of forest soil microcosm and acute toxicity studies for determining effects of fenitrothion on earthworm, ecotoxicology and environmental safety 30:127~133.
- 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.
- 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.
- Dwinell, L. D. (1997) The pinewood nematode: Regulation and mitigation. Annual Review of Phytopathology 35:153~166.
- Forestry Research Institute (1998) 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.
- Ichikawa, R., A. Soutome, M. Nakashima and Y. Maesawa (1994) Influence of helicopter's downwash upon the dispersion of sprayed chemicals. Journal of Pesticide Science 19:1~9.
- 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. 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.
- 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.
- Moon, Y. S., S. M. Lee, J. D. Park and Y. H. Yeo (1995) Distribution and control of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) and pine sawyer (*Monochamus alternatus*) as insect vector. FRI. J. For. Sci. 51:119~126.
- National Institute of Environmental Research (2002) The drinking water standard. p131 in Comparison of water quality standards (for policy makers).
- Tomlin, C. D. S. (2009) The Pesticide Manual. Crop Protection Publications.
- William, L. P. and R. F. Fisher (1985) The forest floor. p. 55, In Properties of Forest Soils., John Wiley and Sons.
- 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., C. Zhang, J. Dai, S. Sun and G. Zhou (1999) Studies of emergence emigration of *Monochamus alternatus* and its ability to carry nematodes. Forest Research 12:572~576.

항공살포에 따른 Fenitrothion의 산림환경 중 행적

김대균 · 김찬섭^{1*} · 이병무² · 최주현¹ · 박재음¹

경기도 농업과학기술원, ¹농촌진흥청 국립농업과학원, ²국립환경대학교

요 약 소나무재선충 매개충인 솔수염하늘소 방제용으로 살포되는 농약성분의 산림환경 중 분포, 이동 및 잔류소장 등 행적을 파악하고 방제지역으로부터 수계로의 유출농도 수준 및 유출경로에 대한 정량적 평가를 목적으로 산림해충방제용 fenitrothion 유제에 대한 행적시험과 수계유출량 조사를 실시하였다. 행적시험 장소는 경남 함안군 칠서면 태곡리 소재 산림이었고, 유출량조사는 부산 기장군 철마면 소재 방제지역 산림에서 실시하였다. 함안 행적시험구에서 fenitrothion의 평균 지표면 낙하량은 표준살포량의 6% 수준이었다. 솔잎 중의 잔류량은 살포 직후에 0.6~0.9 mg/kg이었으나 109일 후에는 0.01 mg/kg로 감소하였고, 빗물에 씻겨 내린 양은 살포량의 1.3% 수준이었다. 토양 표면에 도달한 fenitrothion의 모두는 부엽토층에 존재하였으며 살포 109일 후에는 표면도달량의 10분의 1 수준으로 감소하였고, 부엽토 밑 토양에서는 전 기간 동안 검출되지 않았다. Fenitrothion은 시험구 내 계곡수에서 살포 당일에만 0.0009 mg/L의 낮은 수준으로 검출되었다. 기장 방제지역 배출수계에서는 전 기간 동안 검출한계 미만(0.0001 mg/L)이었다.

색인어 Fenitrothion, 항공방제, 행적, 낙하, wash-off