

살충제 살포가 금정산 소나무림 내 무당거미(거미목: 왕거미과)의 생물적 형질에 미치는 영향

정종국* · 김준헌 · 김동수 · 정철의¹

국립산림과학원 산림병해충연구과, ¹안동대학교 식물의학과

Effect of Pesticide on Biological Traits of an Orb-web Spider, *Trichonephila clavata* Koch (Araneae: Araneidae) in *Pinus densiflora* Forests in Mt. Geumjeong, Korea

Jong-Kook Jung*, Junheon Kim, Dongsoo Kim and Chuleui Jung¹

Division of Forest Insect Pests and Diseases, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

¹Department of Plant medicine, Andong National University, Andong 36729, Korea

ABSTRACT: Debates over the ecological and public health impacts of aerial pesticide sprays are increasing. This is particularly true for controlling *Monochamus* beetles, which are vector insects of pinewood nematodes. In 2017, adult female orb-web spiders, *Trichonephila clavata*, were sampled from pine forests in Yangsan-si, Gyeongsangnam-do, Korea, where the aerial pesticide spray, fenitrothion or thiacloprid, was used for several decades. The biological traits of the spiders (body weight, body length, carapace width, and total hind leg length) were compared among treatment sites (no-spray, sprayed three times, and sprayed five times), and differences were observed. The body length, carapace width, and total hind leg length of the spiders in the sprayed areas were significantly shorter than in the no-spray area, but there were no differences between the area sprayed three or five times. These results indicate that repeated exposures to an aerial pesticide spray can alter morphological parameters, which influences population-level fitness. Future studies should monitor the spider long-term responses to pesticides (a direct effect) and prey availability (an indirect effect).

Key words: Thiacloprid, Non-target arthropods, Pine wilt disease, Environmental impact monitoring, Spider

초록: 최근 소나무재선충의 매개충을 방제하기 위한 방제법으로 널리 이용되고 있는 항공방제의 환경 영향에 대한 논의가 계속되고 있다. 본 연구에서는 2017년 경남 양산 금정산 일대를 무처리구와 처리구(3회 살포 및 5회 살포)로 구분한 뒤, 유인항공기로 살포된 티아클로프리트가 비표적 절지동물인 무당거미의 생물적 형질(체중, 체장, 머리가슴의 폭 및 뒷다리 전체 길이)에 미치는 영향을 조사하였다. 2017년 10월 11일에 각 조사구에서 성숙한 무당거미 암컷 성충을 채집하였다. 조사 결과, 무당거미의 생물적 형질은 살충제 살포 여부에 따라 통계적으로 유의하게 달라졌는데, 특히 체장, 머리가슴의 폭, 그리고 뒷다리의 전체 길이는 항공방제구에서 채집된 무당거미가 무처리구에서 잡힌 개체에 비해 짧은 것으로 나타났다. 그러나 살충제 살포 횟수에 따른 차이는 관찰되지 않았다. 결론적으로 무당거미의 형태적 특성은 살충제 살포에 의해 직접적 또는 간접적으로 영향을 받았을 가능성이 있으며, 이는 장기적으로 개체군의 건강성에 영향을 줄 것이라 생각된다. 따라서 향후 장기적으로 살충제(직접 효과)와 먹이 가용성(간접 효과)에 대한 무당거미의 반응에 대한 모니터링이 수행되어야 할 것이다.

검색어: 티아클로프리트, 비표적 절지동물, 소나무재선충병, 환경 영향 모니터링, 거미

소나무재선충(pine wood nematode)은 소나무에 치명적인

병을 야기하기 때문에 한국을 비롯하여 아시아와 유럽에서 심각한 문제가 되고 있다(Shin, 2008; Zhao et al., 2014). 솔수염 히늘소와 북방수염히늘소는 소나무재선충을 옮겨주는 중요한 매개충으로, 소나무재선충병의 확산 저지 및 방제를 위해서는

*Corresponding author: jk82811@korea.kr

Received June 30 2020; Revised July 14 2020

Accepted August 10 2020

매개충의 관리가 기본이다. 이들 매개충의 방제를 위해 과거에는 유인항공기를 이용한 살충제 살포가 주로 적용되었으나, 최근 들어 다양한 기계·물리적 방제방법(파쇄, 소각, 그물망 피복재 사용 등)과 예방나무주사법이 개발 적용되기 시작함에 따라 유인항공기를 이용한 살충제 살포 면적은 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있다.

다양한 방제법이 개발된 것 외에도 꿀벌 독성, 인체 유해성 등 여러 사회적 이슈가 제기되면서 소나무재선충병 매개충의 방제는 새로운 전환점을 맞이하고 있다. 실제 연면적 기준(면적 ha/1~5회/년), 2015년 85,183 ha에 대해 살충제가 살포되었으나, 살포횟수가 1~3회(/년)로 변경된 2016년부터는 22,131 ha로 대상 면적은 전년 대비 약 26% 수준으로 급감하였고, 이후에도 지속적으로 감소 중이다(2017년 20,543 ha; 2018년 13,964 ha; 2019년 10,440 ha)(Korea Forest Service, 2020). 이러한 면적 감소는 각 지방자치단체에서 유인항공기 지원을 요청하는 비율의 감소에 의한 것으로 소나무재선충병 예방 및 방제를 위한 다양한 선택지가 있는 현 시점에는 환경에 위해가 적을 가능성이 높은 방법을 선택하고 있는 것이라 추정된다.

환경 독성에 대한 관심이 높아지기 시작한 2000년대 이후, 지표적 절지동물에 대한 항공방제(Kwon et al., 2003, 2005a, 2005b; Kwon, 2008, 2010), 연막기 지상방제(Jang et al., 2017) 및 영양단계별 치사 및 아치사(Jung et al., 2018) 영향을 분석하는 연구가 수행되었다. 특히 일부의 연구에서 살충제 살포 후 일정 기간 개미류의 먹이 활동의 감소(Kwon, 2008), 살충제 살포 지역에서 보다 많은 절지동물이 치사되어 낙하하는(Jang et al., 2017) 등 산림 내에서 살충제의 살포가 생태계에 미치는 영향이 다소 있는 것으로 추정된다. 실내 실험이긴 하지만, 살충제에 노출되어 사망한 먹이 곤충의 부위에 따른 일본왕개미 일개미의 생존기간이 감소한다는 보고도 있다(Jung et al., 2018). 일부 실내 실험을 제외한 대부분의 연구는 산림 내에 트랩(함정 트랩, 다중갈매기트랩 등)을 설치하여 절지동물을 채집한 후 생물다양성(종수, 개체수, 다양성 지수 등)이나 종 구성의 유사도를 비교하였다(Kwon et al., 2003, 2005a, 2005b; Kwon, 2008, 2010; Jang et al., 2017). 그러나 이러한 모니터링 방법은 짧게는 1주일에서 길게는 4주일 정도 야외에 노출되는 트랩의 특성 때문에 살충제의 직접적인 영향을 확인하기 어려운 문제가 있고, 조사, 자료의 분석 및 결과 해석에 이르기까지 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다. 따라서 항공방제와 같은 살충제를 산림에 살포하였을 때의 환경 영향을 보다 신속하게 모니터링하는 방법적 개선이 필요한 상황이다.

일반적으로 거미류는 절지동물 중에서는 최상위 포식자군에 속하기 때문에 서식 환경의 교란(Pearce and Venier, 2006), 중

금속(Jung et al., 2005)이나 농약(Hodge and Vink, 2000)의 생물농축 효과 등 지표종으로 이용 가능한 장점이 있다. 특히 조망성 거미류는 부화 후 특정 지역에 정착하여 생활하므로 해당 지역의 환경 특성을 대변할 가능성이 높다. 본 연구의 재료인 무당거미(*Trichonephila clavata* Koch)는 거미목 왕거미과에 속하는 대형 거미 종으로(World Spider Catalog, 2020), 국내에 분포하는 다른 종과 비교해서 뚜렷한 형태적 차이를 보이기 때문에 누구나 쉽게 동정이 가능한 장점이 있다. 무당거미 암컷 성체의 크기는 약 20~30 mm 정도이며, 노란색 빛깔이 도는 거미줄을 이용하여 큰 크기의 그물을 만들며 산림 내부와 임도 주변 등 수목과 수목 사이에 큰 그물을 치고 생활한다. 특히 알집으로 월동 후 5월 하순경 부화하여 10~11월경 산란하기까지 오랜 기간 동안 서식 환경에 노출되기 때문에(Namkung, 2001) 살충제와 같은 교란에 대한 지표종으로 사용하기에 매우 좋은 생물 종이다. 일본에서는 본 종을 대상으로 먹이 자원의 제한에 따른 발육, 산란 및 개체군 밀도 등의 변화에 대하여 보고된 바 있다(Miyashita, 1986, 1990, 1991, 1992a, 1992b, 1992c). 또한 살충제 사용에 따라 과수원 내 거미류 밀도나 체장이 감소한다는 보고(Wisniewska and Prokopy, 1997)나 실내 검정으로 거미줄의 면적, 길이 등이 감소한다는 보고(Samu and Vollrath, 1992) 등이 있어 조망성 거미류의 일종인 무당거미 역시 항공방제의 영향을 받을 가능성이 있을 것이라 예상되었다.

따라서 본 연구에서는 소나무재선충병 매개충의 방제를 위한 방법 중 유인항공기(헬리콥터)를 이용한 살충제(티아클로프리트) 살포가 소나무림 내 무당거미의 생물적 형질(체중, 체장, 머리 가슴의 폭 및 뒷다리 전체 길이)에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 또한 살충제의 살포 횟수에 따라서도 무당거미의 생물적 형질이 차이가 있는지도 조사하였다.

재료 및 방법

조사 지역

항공방제가 수행된 지역은 경남 양산시 동면에 위치한 금정산 일대로, 이 지역은 1988년 소나무재선충병이 발견된 이래 본 연구가 수행된 2017년까지 지속적으로 헬리콥터를 이용한 살충제 살포가 실시되어 왔다. 2017년 양산시청의 협조를 얻어 살충제 살포를 미 실시한 지역과 살충제 살포를 3회 및 5회 실시한 지역에 대한 정보를 확보하였다. 살충제는 소나무재선충병 매개충을 방제하기 위해 가장 많이 사용되고 있는 티아클로프리트 액상수화제 10% (칼립소)를 사용하였다.

무당거미의 채집은 유사한 환경 특성을 보이는 산의 북~서

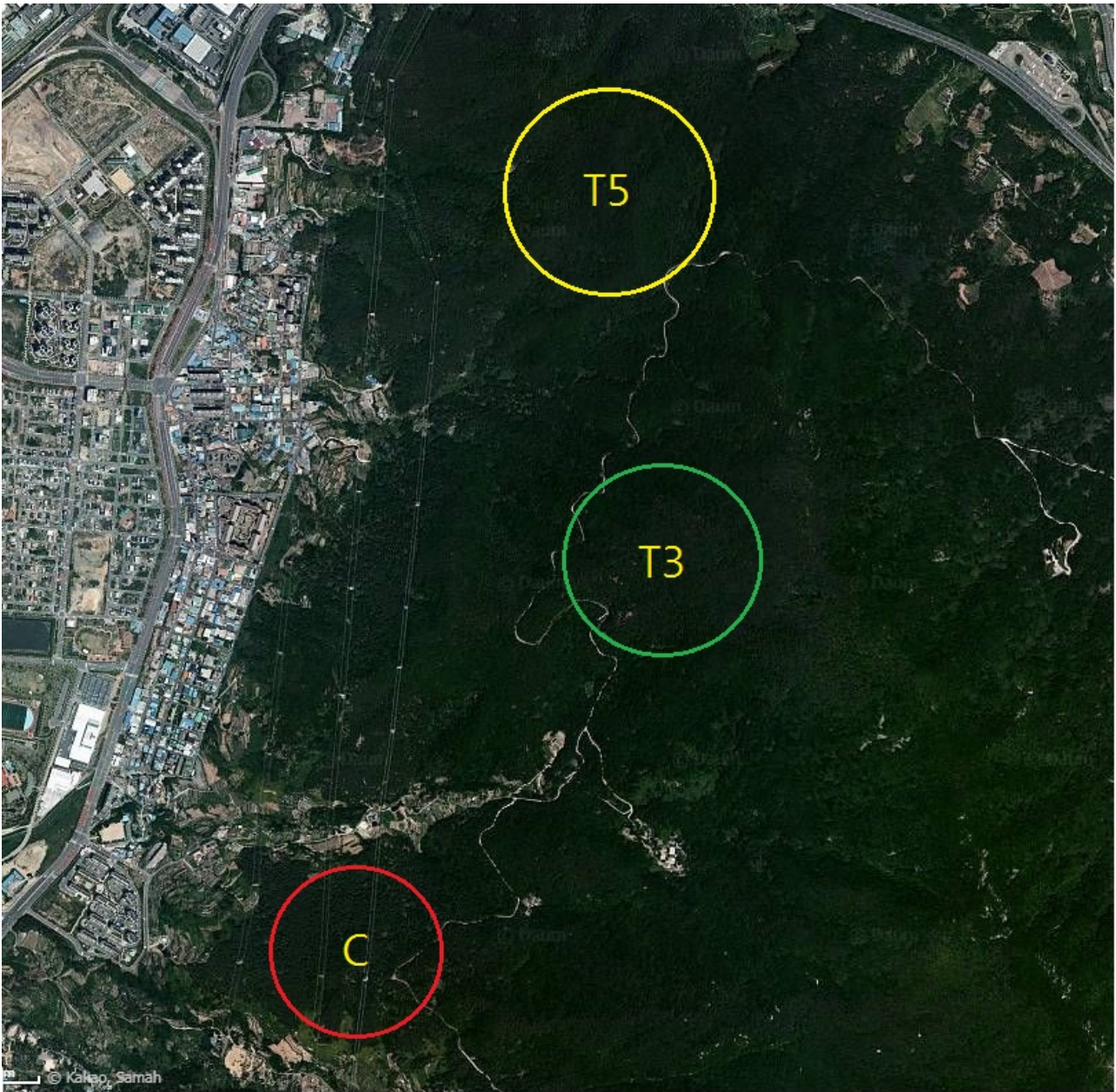


Fig. 1. *Trichonephila clavata* sampling sites in Yangsan, Gyeongsangnam-do, Korea. Treatment group abbreviations: C (no-spray); T3 (sprayed three times); T5 (sprayed five times).

사면의 소나무림에서 2017년 10월 11일에 수행하였으며, 다음과 같이 3개의 구역으로 나누어 수행하였다. 먼저 살충제 살포를 실시하지 않은 무처리구(C, N 35° 18' 02", E129° 02' 04", 면적 20 ha)와 살충제 살포 구역으로 구분하였다. 살충제 살포 구역은 다시 3회 살포구(T3, N 35° 18' 35", E129° 02' 31", 면적 24 ha)와 5회 살포구(T5, N 35° 19' 08", E129° 02' 39", 면적 40 ha)로 구분하였다(Fig. 1). 모든 조사구는 해발고도 200 ~ 300 m 사이에 위치하였다. 살충제 살포 헬리콥터를 이용하여 2

~3주 간격으로 5월 하순 ~ 8월 초순 사이에 실시하였다.

조사 방법

무당거미의 채집은 3개 처리구에서 동일한 날짜(2017년 10월 11일)에 수행하였다. 각 처리구별로 약 1 ha에 해당하는 면적을 조사자 2명이 1시간 동안 도보로 이동하면서 암컷 성충(개체 수, C = 52; T3 = 32; T5 = 17)을 채집하였다. 채집한 무당거미는

현장에서 70% 에틸알코올 병에 넣어 실험실로 운반하였다. 생물적 형질 측정을 위해서 버니어캘리퍼스(Sanling Group Ltd., Zhejiang, China; 0.01 mm accuracy)를 이용하여 체장(body length), 머리가슴의 폭(carapace width) 및 뒷다리의 전체 길이(hind leg length)를 측정하였고, 5일 동안 60°C 건조기에 넣어 완전히 건조시킨 후 전자저울(Mettler Toledo ML204, 스위스)을 이용하여 건중량(body weight)을 측정하였다.

자료 분석

모든 통계 분석 전에 자료의 정규성 검정을 수행하였다(library 'car'의 'qqp' function)(Fox et al., 2017). 이 중에서 체장, 머리가슴폭 및 뒷다리의 전체 길이는 정규성을 보여 자료의 변형 없이 분석을 수행하였으나, 체중은 정규성을 보이지 않아 로그-변환(log(X+1)) 후 분석하였다. 이후 미방제구(C), 살충제 살포 3회 처리구(T3) 및 살충제 살포 5회 처리구(T5)간 무당거미 체중(BW), 체장(BL), 머리가슴폭(CW) 및 뒷다리의 전체 길이(HL)의 비교를 위해서 일원분산분석(One way ANOVA)을 수행하였다('aov' function). 분산분석 시 통계적 유의성이 확인되면, 사후검정(Tukey's HSD test)을 수행하여 그룹 간의 차이를 비교하였다('TukeyHSD' function). 자료의 정규성 검정, 분산분석 및 사후검정을 위해서 오픈소스 프로그램인 R 3.3.2.(R Core Team, 2016)을 이용하였다.

결과

무당거미의 밀도 비교

조사지에서 채집한 무당거미 암컷 성충의 개체수는 무처리구에서 53개체, 살충제 살포를 3회와 5회 처리한 지역에서는 각각 33개체와 18개체로 살충제를 살포한 지역의 밀도가 다소 적었다.

무당거미의 생물적 형질 비교

무당거미의 생물적 형질은 살충제 살포 여부에 따라 달라지는 것이 확인되었으나, 살충제 살포 횟수에 따른 차이는 관찰되지 않았다(Fig. 2). 체중의 경우, 살충제 살포 지역(T3 및 T5)에 비해 무처리구의 평균 무게가 약간 무거운 것으로 측정되었으나 통계적 유의성은 관찰되지 않았다($F = 2.81$; d.f. = 2, 98; $P = 0.065$)(Fig. 2a). 이에 비해 체장($F = 22.97$; d.f. = 2, 98; $P < 0.001$), 머리가슴의 폭($F = 13.80$; d.f. = 2, 98; $P < 0.001$), 그리고 뒷다리의 전체 길이($F = 12.05$; d.f. = 2, 98; $P < 0.001$)는 무처리구에서 채집된 무당거미가 살충제 살포 지역(T3 및 T5)에 비해 통계적으로 유의미하게 큰 것으로 나타났다(Fig. 2b~d).

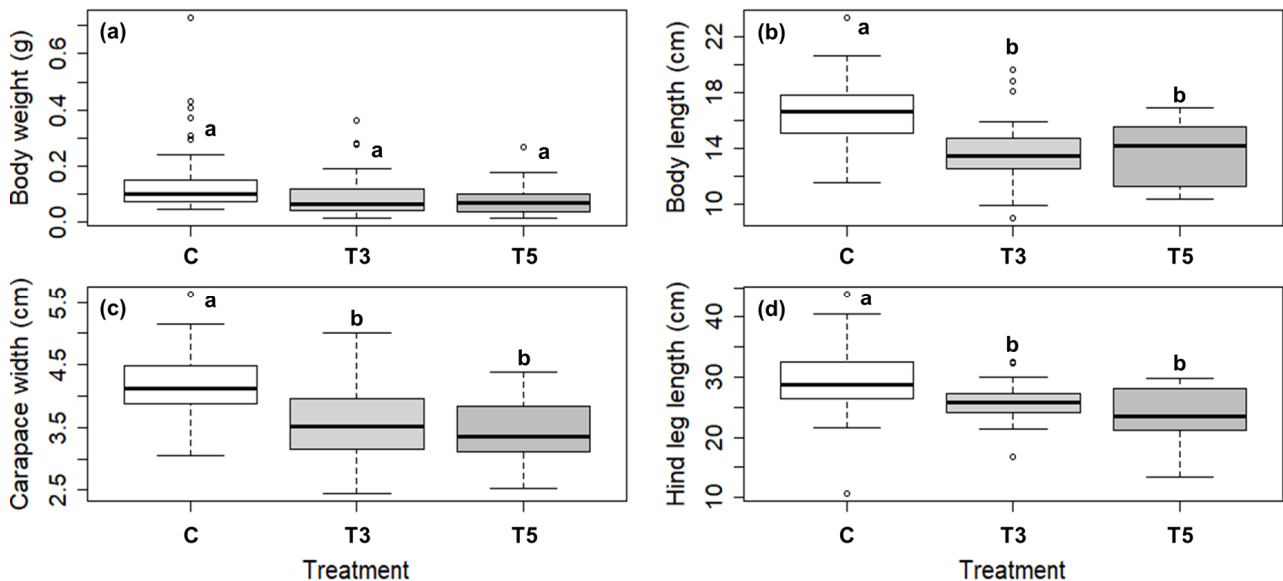


Fig. 2. Comparison of *Trichonephila clavate* (a) body weight, (b) body length, (c) carapace width, and (d) total hind leg length among the treatment groups. Treatment group abbreviations: C (no-spray); T3 (sprayed three times); T5 (sprayed five times). Letters indicate statistical significance ($P < 0.05$) between treatment sites.

고찰

무당거미 생물적 형질 변화에 미치는 직·간접적 영향

본 연구를 통해 무당거미의 전반적인 생물적 형질이 살충제 (티아클로프리트)의 살포 여부에 따라 달라지는 것이 확인되었다. 특히, 체중에 비해 체장, 머리가슴의 폭 및 뒷다리의 길이가 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 기존에 거미류와 살충제의 관계에 대한 연구에서 살충제가 살포된 지역의 거미의 크기가 감소한다는 보고(Wisniewska and Prokopy, 1997)와 유사한 결과이다. Wisniewska and Prokopy (1997)는 살충제가 살포된 나무에서 채집된 거미류 중 조망성 거미류의 크기가 살충제가 살포되지 않은 나무에서 채집된 거미류에 비해 뚜렷하게 감소한다고 보고한 바 있다. 다른 형질과 달리 체중은 처리 구간에 차이가 없었는데, 이는 먹이 섭취량에 따라 복부의 크기가 크게 달라지는 거미류의 특성 때문이라 생각된다. 즉, 살충제 처리 지역의 먹이량 감소가 무당거미의 크기 성장에 영향을 주었을 가능성이 있다. 그러나 본 연구의 결과가 무당거미의 생물적 형질의 크기 변화가 살충제로 사용된 티아클로프리트에 의한 직접적인 영향이라고 단정 짓기에는 다소 무리가 있을 것이라 생각된다. 무당거미의 생물적 형질의 변화의 원인에는 여러 가지 요소가 복합적으로 작용할 수도 있기 때문이다.

첫 번째는 먹이자원의 양과 무당거미의 밀도의 관계인데, 무당거미의 밀도는 무처리구에서 높았기 때문에 종내 경쟁은 무처리구가 더 높았을 수 있지만, 살충제 살포로 먹이자원이 감소한다면 밀도가 낮더라도 살충제 처리구에서의 종내 경쟁 역시 심해질 가능성도 배제할 수 없다. 본 연구에서는 무당거미의 알 덩어리에 대한 사전조사가 이뤄지지 않았기 때문에 초기 무당거미의 밀도를 모르며, 먹이자원의 양에 대해서도 조사가 이뤄지지 않아 명확한 원인 분석은 한계가 있다. 그러나 티아클로프리트와 동일 계열의 살충제인 티아메톡삼을 살포하였을 때 초식성 곤충의 밀도가 감소한다는 보고가 있기 때문에(Bredeson et al., 2015), 티아클로프리트가 살포된 소나무림 내 무당거미의 먹이자원이 되는 곤충류의 밀도 역시 감소하였을 가능성이 높다. 또한 일부 연구에서는 살충제 살포로 인한 먹이원 감소가 거미류의 밀도와 생물적 형질에 영향을 준다고 보고하고 있다. 예를 들어, 과수원 내 거미류에 대한 연구에서 살충제 살포로 인해 먹이원이 감소하고 이에 따라 거미류의 밀도도 감소한다고 보고되었으며(Markó et al., 2009), 먹이원의 감소가 성장 및 산란 능력(Miyashita, 1986), 개체군 밀도(Miyashita, 1986; 1992c), 성장률 및 체장(Miyashita, 1991) 등의 생물적 특성과 밀접한 연관성을 맺고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 살충제

살포에 따른 먹이자원의 변화가 무당거미의 밀도 및 생물적 형질에 미치는 영향은 향후 보완 연구를 통해 검증이 필요하다.

두 번째는 살충제 성분의 생물농축으로 인해 무당거미의 발육이 제한되었을 가능성이다. 먹이사슬을 통해 네오니코티노이드 계열 살충제 성분이 포식자에게 일부 전달될 가능성은 보고된 바 있으나(Douglas et al., 2014; Jung et al., 2018), 생물농축에 대해서는 알려진 바 없다. 참고로 저농도의 살충제 성분에 노출되었을 때 행동에 문제가 발생할 가능성은 있지만, 시간이 경과하면 회복하는 사례가 있기도 하다. 실제 살충제에 노출된 북방수염하늘소와 이를 섭식한 일본왕개미를 대상으로 한 실험에서 일부 일개미가 중독 증상을 보이다가 회복되는 것이 확인된 바 있다(Jung et al., 2018). 그러나 무당거미와 같은 대형 포식성 절지동물이 먹이 섭식을 통해 저농도의 네오니코티노이드 계열 살충제 성분에 노출되었을 때 일어나는 현상 또는 가능성은 알려진 바 없다. 따라서 향후 티아클로프리트 등 네오니코티노이드 계열의 약제를 처리하였을 때 피식자-포식자 관계 변화 또는 포식자의 생물적 형질에 미치는 영향에 대한 생물검정을 실시할 필요가 있을 것이다.

살충제 살포의 영향 평가를 위한 지표종으로서의 무당거미

본 연구를 통해 무당거미의 생물적 형질이 살충제 살포 지역에서 유의미하게 감소하는 것이 확인되었다. 물론 각 형질의 크기 감소가 갖는 의미와 왜 이런 형질의 크기 감소가 나타나는지에 대한 원인이 명확하게 밝혀진 것은 아니다. 그럼에도 향후 살충제 살포가 비표적 절지동물에 미치는 영향을 조사하는데 있어 무당거미를 지표종으로 사용하는 것은 여러 측면에서 가능하다고 판단된다. 그 이유는 무당거미는 소나무림 내 광범위하게 분포하고 있으며, 무당거미와 같은 조망성 거미류는 정착 후 이동이 제한적이므로 살충제 살포 시 변화하는 먹이 자원의 양의 변화 또는 발육에 미치는 다른 환경 요소의 변화에 민감하게 반응할 가능성이 높기 때문이다(Miyashita, 1986; 1990; 1991; 1992a; 1992b; 1992c). 또한 개체군의 밀도가 감소하더라도 살충제 살포 지역에서 공통적으로 발견이 되기 때문에 지표종으로써 유리한 장점도 확인되었다. 따라서 무당거미를 대상으로 향후 살충제가 살포되는 산림 지역에 대한 환경 영향 평가가 가능하리라 생각된다.

소나무재선충병 매개충 방제를 위한 네오니코티노이드 계열 약제의 전망

유럽에서는 네오니코티노이드 계열의 살충제(이미다클로

프리드, 티아메톡삼, 클로티아니딘)가 꿀벌에 위해성이 높다는 이유로 종자 소독용으로의 사용을 금지한 바 있다(EU regulation No 485/2013, 2013). 또한 티아클로프리드의 경우, 미국에서 농약업체의 자진 등록 철회로 현재 재고분이 소진되는 향후 수 년 내에 사용이 종료될 것이라 예상된다(US EPA, 2014). 유럽의 경우, 티아클로프리드가 지하수에 미치는 영향과 생식과 관련된 인체 독성에 대한 우려를 이유로 2020년 사용이 금지되었다(European Commission, 2020).

미국과 유럽의 동향과 달리, 국내에서는 네오니코티노이드 계열의 살충제 사용에 대해서 관련 규정이 마련되지 않은 상황이다. 다만, 티아클로프리드의 인체 독성에 대한 문제 제기 및 미국 환경청에서 약제의 등록이 취소되는 등 사회적으로 이슈가 되고 있어 사용되는 약제의 변화가 예상된다. 티아클로프리드와 달리, 유럽연합(EU)에서는 아세타미프리드에 대한 판단을 유보하여 2033년까지 사용할 수 있도록 발표하여(European Commission, 2020) 국내에서도 당분간 소나무재선충병 매개충 방제를 위한 약제로 사용이 가능한 상황이라 판단된다. 그러나 국내 여건을 종합하여 볼 때 약종은 변경되더라도 소나무재선충병의 확산을 막기 위한 살충제 살포는 당분간 지속될 가능성이 높기 때문에 소나무재선충병 매개충 방제를 위해서는 네오니코티노이드 계열 약제를 대체할 신규 약제의 선발이 필요할 것이다. 따라서 신규 약제가 선발될 경우, 유인항공기를 이용한 살충제 대면적 살포가 무당거미 등 비표적 절지동물에 미치는 영향을 평가하기 위한 추가 연구가 필요할 것이다.

결론

본 연구를 통해 무당거미의 형태적 크기 감소는 항공방제에 사용된 살충제와 직접적 또는 간접적으로 연관되었을 가능성이 발견되었다. 다만, 본 연구는 무당거미의 성장이 종료된 시점에 한 번만 조사되었기 때문에 방제 이전의 무당거미 형질의 특성을 비교하지 못한 부분은 추가 연구를 통해 보완이 필요하다. 물론 소나무재선충병 매개충 방제를 위한 살충제 살포는 통상 4월 하순부터 8월 중 하순까지 이뤄지는 것에 비해, 월동 알에서 부화한 무당거미가 출현하는 시기는 5월부터이므로 살충제 살포 전과 후에 대한 비교가 어려운 것이 현실이다. 따라서 살충제 살포가 비표적 절지동물에 미치는 직·간접적 영향에 대해서는 장기적이고 정밀한 모니터링이 필요할 것이라 판단된다. 이를 위해서는 살충제 살포가 실시된 지역 내 먹이 자원에 대한 검토나 살충제의 잔류에 대한 검사와 살충제 살포에 사용된 약제가 무당거미에 대한 급성 또는 만성 독성이 여부에 대해서도 생물검정법을 이용하여 검토할 필요가 있을 것이다.

사사

본 연구는 국립산림과학원의 “2017년 국립산림과학원 석박사연구원 지원 사업”의 지원을 받아 수행되었습니다.

저자 직책 & 역할

정중국 : 국립산림과학원, 임업연구사; 실험설계, 실험수행 및 분석, 원고 작성

김준현 : 국립산림과학원, 임업연구사; 자료 검토 및 원고 작성

김동수 : 국립산림과학원, 임업연구사; 원고 검토 및 작성

정철의 : 안동대, 교수; 원고 검토 및 작성

모든 저자는 원고를 읽고 투고에 동의하였음

Literature Cited

- Bredeson, M.M., Reese, R.N., Lundgren, J.G., 2015. The effects of insecticide dose and herbivore density on tri-trophic effects of thiamethoxam in a system involving wheat, aphids, and ladybeetles. *Crop Prot.* 69, 70-76.
- Douglas, M.R., Rohr, J.R., Tooker, J.F., 2014. Neonicotinoid insecticide travels through a soil food chain, disrupting biological control of non-target pests and decreasing soya bean yield. *J. Appl. Ecol.* 52, 250-260.
- European Commission, 2020. Some facts about neonicotinoids. https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/approval_active_substances/approval_renewal/neonicotinoids_en (assessed on 29 January, 2020).
- EU regulation No 485/2013, 2013. EU regulation No 485/2013 of May 2013 amending Implementing Regulation (EU) No 540/2011, as regards the conditions of approval of the active substances clothianidin, thiamethoxam and imidacloprid, and prohibiting the use and sale of seeds treated with plant protection products containing those active substances. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2013/485/oj (assessed on 12 July, 2019).
- Fox, J., Weisberg, S., Adler, D., Bates, D., Baud-Bovy, G., Ellison, S., Firth, D., Friendly, M., Gorjanc, G., Graves, S., Heiberger, R., Laboissiere, R., Monette, G., Murdoch, D., Nilsson, H., Ogle, D., Ripley, B., Venables, W., Winsemius, D., Zeileis, A., R-Core, 2017. Package ‘car’, version 2.1-6. <https://cran.r-project.org/web/packages/car/car.pdf> (accessed on 20 Dec, 2017)
- Hodge, S., Vink, C.J., 2000. An evaluation of *Lycosa hiliaris* as a bioindicator of organophosphate insecticide contamination. in: *Proceedings of the New Zealand plant protection conference.* New Zealand Plant Protection Society, pp. 226-229.

- Jang, T.W., Jung, J.-K., Kim, M., Kim, J., Jung, C., Koh, S., 2017. Effect of ground-fogging on target and non-target insects in Korean pine forests. *J. Korean For. Soc.* 106, 509-517.
- Jung, C.S., Lee, S.B., Jung, M.P., Lee, J.H., Lee, S., Lee, S.H., 2005. Accumulated heavy metal content in wolf spider, *Pardosa astrigera* (Araneae: Lycosidae), as a bioindicator of exposure. *J. Asia-Pacific Entomol.* 8, 185-192.
- Jung, J.K., Jung, C.S., Koh, S.H., 2018. Lethal and sublethal effects of thiacloprid on non-target carpenter ant, *Camponotus japonicus* Mayr (Hymenoptera: Formicidae). *J. Asia-Pacific Entomol.* 21, 1321-1325.
- Korea Forest Service, 2020. Statistics of aerial spray of pesticides for the vector insects of pine wood nematode. http://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_02_02_04_07&cmsId=FC_002506 (assessed on 22 June, 2020).
- Kwon, T.S., 2008. Change of abundance of arthropods in pine forests caused by aerial insecticide spray. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 54, 92-106.
- Kwon, T.S., 2010. Effect of the application of an organophosphate pesticide (fenitrothion) on foraging behavior of ants. *J. Korean For. Soc.* 99, 179-185.
- Kwon, T.S., Kim, K.H., Kim, C.S., Lee, J.H., Yun, C.W., Hong, Y., Kim, J.T., 2005b. Effects of pesticide (fenitrothion) application on soil organisms in pine stand. *J. Korean For. Soc.* 94, 420-430.
- Kwon, T.S., Park, Y.S., Kwon, Y.H., Song, M.Y., Shin, S.C., Park, J.D., 2003. Effects of aerial pesticide application on arthropod communities in pine forests. *J. Korean For. Soc.* 92, 608-617.
- Kwon, T.S., Song, M.Y., Shin, S.C., Park, Y.S., 2005a. Effects of aerial insecticide sprays on ant communities to control pine wilt disease in Korean pine forests. *Appl. Entomol. Zool.* 40, 563-574.
- Markó, V., Keresztes, B., Fountain, M.T., Cross, J.V., 2009. Prey availability, pesticides and the abundance of orchard spider communities. *Biol. Control* 48, 115-124.
- Miyashita, T., 1986. Growth, egg production, and population density of the spider, *Nephila clavata* in relation to food conditions in the field. *Res. Popul. Ecol.* 28, 135-149.
- Miyashita, T., 1990. Decreased reproductive rate of the spider, *Nephila clavata*, inhabiting small woodlands in urban areas. *Ecol. Res.* 5, 341-351.
- Miyashita, T., 1991. Direct evidence of food limitation for growth rate and body size in the spider, *Nephila clavata*. *Acta. Arachnol.* 40, 17-21.
- Miyashita, T., 1992a. Feeding rate may affect dispersal in the orb-web spider, *Nephila clavata*. *Oecologia* 92, 339-342.
- Miyashita, T., 1992b. Variability in food consumption rate of natural populations in the spider, *Nephila clavata*. *Res. Popul. Ecol.* 34, 15-28.
- Miyashita, T., 1992c. Food limitation of population density in the orb-web spider, *Nephila clavata*. *Res. Popul. Ecol.* 34, 143-153.
- Namkung, J., 2001. The spiders of Korea. *Kyohaksa*, p. 232.
- Pearce, J.L., Venier, L.A., 2006. The use of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) and spiders (Araneae) as bioindicators of sustainable forest management: A review. *Ecol. Indicators* 6, 780-793.
- R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, online at <http://www.R-project.org> (accessed on 7 March 2018).
- Samu, F., Vollrath, F., 1992. Spider orb web as bioassay for pesticide side effects. *Entomol. Exp. Appl.* 62, 117-124.
- Shin, S.C., 2008. Pine wilt disease in Korea, in: Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y (Eds.), *Pine wilt disease*. Springer, Japan. pp. 26-32.
- US EPA, 2014. Thiacloprid notice of registration review case closure. Docket number: EPA-HQ-OPP-2012-0218.
- Wisniewska, J., Prokopy, R.J., 1997. Pesticide effect on faunal composition, abundance, and body length of spiders (Araneae) in apple orchards. *Environ. Entomol.* 26, 763-776.
- World Spider Catalog, 2020. World Spider Catalog. Version 21.5. Natural History Museum Bern, online at <http://wsc.nmbe.ch> (accessed on 23 July 2020).
- Zhao, L., Mota, M., Vieira, P., Butcher, R.A., Sun, J., 2014. Interspecific communication between pinewood nematode, its insect vector, and associated microbes. *Trends Parasitol.* 30, 299-308.