농약과학회지 (Korean J. Pestic. Sci.)
Vol. 20, No. 4, pp. 361-368 (2016)
Open Access https://doi.org/10.7585/kjps.2016.20.4.361
ORIGINAL ARTICLES / BIOPESTICIDE

Online ISSN 2287-2051
Print ISSN 1226-6183

한국산 곤충병원성선충을 이용한 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)의 생물적 방제

유황빈 · 정영학[1] · 이상명[1] · 추호렬 · 이동운[2,*]
경상대학교 응용생물학과, [1]㈜SM바이오, [2]경북대학교 생태환경관광학부

Biological Control of Japanese Pine Sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) using Korean Entomopathogenic Nematode Isolates

Hwang Bin Yu, Young Hak Jung[1], Sang Myeong Lee[1], Ho Yul Choo and Dong Woon Lee[2,*]
Department of Applied Biology, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam, 52828, Republic of Korea
[1]SM Bio Co, Jinju, Gyeongnam, 52828, Republic of Korea
[2]School of Environmental Ecology and Tourism, Kyungpook National University, Sangju, Gyeongbuk, 37224, Republic of Korea

(Received on October 15, 2016. Revised on November 7, 2016. Accepted on November 17, 2016)

Abstract Japanese pine sawyer (JPS), *Monochamus alternatus* is a vector insect of pine wood nematode, *Bersaphlenchus xylophilus* in Korea and Japanese pine forest. This study was to evaluate the possibility of biological control of JPS with Korean entomopathogenic nematodes (EPNs). Korean EPNs (*Heterorhabditis* sp. Gyeongsan, *Steinernema carpocapsae* GSN1, *S. glaseri* Dongrae and *S. longicaudum* Nonsan strain) were infested bate insect, *Galleria mellonella* in log of dead pine tree. Result showed that, *S. carpocapsae* GSN1 strain has the highest pathogenicity. *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan and *S. carpocapsae* GSN1 had infested bate insect, which located in 7.5 cm depth of pine log. EPN has pathogenicity against larva and adult of JPS. Spray application of EPNs against adult of JPS, *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan strain showed higher pathogenicity than *S. carpocapsae* GSN1 strain. EPN infested larva of JPS was detected on bark spray treatment with *S. carpocapsae* GSN1 strain in dead pine log that naturally infested larva of JPS however, no EPN infested JPS was detected on soaking of pine log with suspension of *S. carpocapsae* GSN1 strain. Though EPN had found with low efficacy against JPS but still possible to apply to control the boring insect pest as they can control log dwelling insect.

Key words Biological control, entomopathogenic nematode, Japinese pine sawyer, Pine tree, Pine wood nematode

<< ORCID

Dong Woon Lee
http://orcid.org/0000-0001-9751-5390

*Corresponding author
E-mail: whitegrub@knu.ac.kr

서 론

소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 소나무류에 시들음병을 일으켜서 소나무를 죽게 하는 병원체이다. 소나무재선충은 북미 원산으로 1931년 미국에서 Steiner와 Buhrer가 대왕송(*Pinus palustris*)에서 분리하였고, 이 소나무재선충은 소나무뿐만 아니라 잣나무(*Pinus koraiensis*), 가문비나무(*Picea jezoensis*), 전나무(*Abies holophylla*), 히말리야시다(*Cedrus deodara*), 낙엽송(*Larix kaempferi*) 등에 기생한다(Mamiya, 1988).

미국과 북미대륙의 소나무 토착종들은 소나무재선충에 대해 저항성이나, 재선충이 다른 나라로 유입된 경우에는 그 나라의 토착 소나무류에는 높은 병원성을 나타내어 피해가 극심하게 나타나고 있다(Wingfield et al., 1984; Bergdahl, 1988; Dwinell, 1997).

아시아 지역에서는 일본에서 처음으로 1900년대 초부터 소나무재선충에 의한 피해가 나타나기 시작하여 1941년 이후부터 피해 누적량은 매년 100만 m^3 내외의 피해가 나타나, 일본의 소나무와 해송이 전멸 상태가 되었다(Maimya, 1988; Kishi 1995).

우리나라에서도 소나무재선충이 도입될 경우 발생할 피해를 우려해 식물 검역법을 강화하고, 유입 방지를 위해 노력하였으나 지역적으로 가까운 일본을 통해 들어온 소나무재선충병이 1988년 10월에 부산의 금정산 일대에서 확인되었고(Yi et al, 1989), 이 후 한국의 남부 지방을 중심으로 확산되던 것이 제주도와 내륙인 경기도, 강원도 지역에서도 피해가 발생하고 있다(Shin, 2008).

소나무재선충은 자체적으로 이동할 능력이 없기 때문에 매개충이 우화할 때 편승하여 이동하는데 우리나라에서는 솔수염하늘소와 북방수염하늘소가 소나무재선충의 매개충으로 알려져 있다(KFRI. 2007). 소나무재선충 피해가 만연되어 있는 남부지방에서는 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)가 주요 매개충이다(Kwon et al. 2006). 솔수염하늘소는 이동성이 없는 소나무재선충을 이동시켜주고, 소나무재선충은 건전한 소나무에 들어가 소나무를 죽여 솔수염하늘소의 산란처를 제공하는 상호 공생관계에 있다(Kim et al., 2003).

소나무재선충병의 방제는 이 둘의 관계를 단절 시키는 방법을 사용하고 있는데, 가장 주된 방법은 소나무재선충병에 걸린 소나무를 벌채하여 메탐소듐과 같은 약제를 이용해서 훈증하는 방법과 파쇄기를 이용한 파쇄, 이병목의 소각이 있고, 건전한 소나무에 에마멕틴 벤조에이트와 같은 나무주사 약제를 수간 주사하여 예방하는 방제 방법과 매개충의 우화시기에 살충제를 지상 또는 항공살포하는 방법이 있다(Shin, 2008). 한편 다양한 화학적 방제방법들은 생태계에 직간접적 피해를 주기 때문에 생태계에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 대체 방제방법이 필요하다.

비화학적 방법을 통한 소나무재선충병 방제는 식물체나 방선균과 같은 생물자원으로부터 살선충 물질을 탐색하여 적용하거나 매개충을 대상으로 한 곤충병원성곰팡이나 기생성 천적곤충을 이용한 방제방법 등이 연구되고 있는데(Lee et al., 2015; Shimazu, 2008; Shin et al., 2016) 곤충병원성선충도 잠재적 가능성이 있는 생물적 방제인자의 하나이다(Phan, 2008).

곤충병원성선충은 체내에 보유한 공생세균이 기주곤충 내에 분비되고, 이들이 기주에 패혈증을 유발시켜 치사시키는 생물적 방제인자로 대량증식이 가능하여 상업적으로 각종 해충의 생물적 방제를 위해 다양하게 사용되고 있다(Copping, 2001). 우리나라에서도 토착 곤충병원성선충의 발굴과 이용에 관한 다양한 연구들이 수행되었으나(Dolinski et al., 2012) 솔수염하늘소에 대한 방제연구는 수행된 바 없다.

따라서 본 연구는 국내에서 분리된 곤충병원성선충의 솔수염하늘소에 대한 생물적 방제인자로서의 활용 가능성을 알아보고자 수행하였다.

재료 및 방법

솔수염하늘소

솔수염하늘소는 소나무재선충병 피해지인 경남 진주시 인근 지역에서 솔수염하늘소 유충이 침입한 소나무를 벌채하여 경상대학교에 설치한 우화상에 보관하면서 목재 내에 들어 있는 유충을 수집하여 사용하거나 우화상에서 우화하는 성충을 채집하여 실험하였다.

곤충병원성선충

실험에 사용된 곤충병원성선충은 실험실에서 꿀벌부채명나방(*Galleria mellonella*) 노숙 유충을 이용하여 증식시켜 사용하였다(Woodring and Kaya, 1988). 9°C의 냉장고에 보관 되어있던 *Steinernema carpocapsae* GSN-1 계통, *S. longicaudum* Jiri 계통, *S. glaseri* Dongrae 계통, *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통을 꿀벌부채명나방 노숙유충에 접종하였고, 증식된 선충은 White trap을 설치(Woodring and Kaya, 1988)하여 수확하였다. 사용한 선충은 수확한지 2주 이내의 것을 사용하였다.

소나무 목재 내부의 미끼곤충에 대한 곤충병원성선충의 병원성

한국산 곤충병원성선충 중에서 병원성이 높다고 알려진 4종의 선충을 선발하여 목재내부와 수피 밑에 서식하는 솔수염하늘소 유충에 대한 병원성 검정을 수행하였는데 Steirnematid 3계통(*S. carpocapsae* GSN-1 계통, *S. longicaudum* Nonsan 계통, *S. glaseri* Dongrae 계통)과 Heterorhabditid 1계통(*Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통)을 이용하였다.

곤충병원성선충별 병원성 검정

한국산 곤충병원성선충들의 병원성을 검정하기 위하여 건조시킨 직경 10 cm, 길이 50 cm의 소나무(*Pinus densiflora*) 토막에 드릴로 깊이 2.5 cm, ¢0.5 cm의 구멍을 임의로 10곳에 뚫고, 미끼곤충으로 실험실에서 인공사료에 사육 중이던 꿀벌부채명나방 노숙유충 1마리씩을 넣고, 톱밥으로 구멍을 막았다. 그 후 각각의 선충을 토막 당 감염태 유충 50,000마리(infective juveniles=ijs)를 1 *l* 씩 가정용 분무기로 살포하고, 이 50 cm 소나무 토막 하나를 한 반복으로 3반복 수행하였다. 곤충병원성선충이 살포 된 나무토막은 실험실에 두면서 7일 후 각 구멍으로부터 꿀벌부채명나방을 핀셋으로 꺼내어 감염 여부를 현미경 하에서 조사하였다.

목재 내 깊이에 따른 곤충병원성선충의 병원성 실험

소나무 목재 내부에서 솔수염하늘소 유충의 서식 깊이는 산란 된 나무의 직경에 따라 다를 수 있기 때문에 매개충의 서식 깊이에 따른 곤충병원성선충의 *S. carpocapsae* GSN-1 계통과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통을 이용하여 실험하였다. 건조시킨 직경 10 cm, 길이 50 cm의 소나무 토막에 ¢0.5 cm 드릴로 10개의 구멍을 뚫었는데 구멍의 깊이는 각각 2.5 cm, 5 cm, 7.5 cm 깊이로 처리하였다. 천공한 구멍에 미끼곤충으로 꿀벌부채명나방 노숙유충을 1마리씩 넣고 톱밥으로 구멍을 막았다. 여기에 각각의 선충을 가정용 분무기를 이용하여 50,000 ijs 농도로 1 *l* 씩 살포한 뒤, 곤충병원성선충이 살포 된 나무토막은 실험실에 두면서 7일 후 각 구멍으로부터 꿀벌부채명나방을 핀셋으로 꺼내어 감염 여부를 현미경 하에서 조사하였다. 소나무 토막 하나를 한 반복으로 4반복 수행하였다.

농도에 따른 곤충병원성선충의 병원성 실험

소나무 목재 내부에서 곤충병원성선충의 처리 농도에 따른 병원성을 검정하기 위해 전술한 방법과 동일하게 건조시킨 소나무에 직경 0.5 cm 드릴로 2.5 cm 깊이로 10개의 구멍을 천공한 뒤 꿀벌부채명나방 유충을 넣고, 톱밥으로 구멍을 막았다. 여기에 *S. carpocapsae* GSN-1 계통과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통을 각 나무토막에 25,000 ijs/*l*, 50,000 ijs/*l*, 70,000 ijs/*l*로 가정용 분무기로 살포하고, 7일 후 감염수를 조사하였다. 소나무 토막 하나를 한 반복으로 4반복 수행하였다.

솔수염하늘소에 대한 곤충병원성선충의 병원성

솔수염하늘소 유충에 대한 곤충병원성선충의 병원성과 증식

선행 실험에서 *S. carpocapsae* GSN-1 계통을 선발한 뒤 솔수염하늘소 유충에 대한 농도별 병원성 실험을 수행하였다. 직경 55×높이 15 mm 플라스틱 petri dish에 여과지(Whatman No.2) 두 장을 깔고, 침입태 유충을 0.5 ml 당 각각 5, 10, 20, 40, 80 ijs 농도로 골고루 접종하였다. 그리고 각 petri dish에 솔수염하늘소 유충 서식목에서 채집한 솔수염하늘소 유충 한 마리씩을 넣었다. 처리된 petri dish는 수분증발을 방지하기 위하여 랩으로 싸고, 통기를 위하여 4~5개의 구멍을 뚫은 다음, 25°C의 항온기에 보관하였다. 무처리는 살균수 0.5 ml만을 처리 하였으며 실험은 10마리의 솔수염하늘소 유충을 한 처리구로 하여 3반복으로 수행 하였다. 처리 후 7일째까지 24시간 간격으로 솔수염하늘소 유충의 치사 유무를 확인 하였다.

치사 된 솔수염하늘소 유충을 7일 후 임의로 5마리를 선택하여 White trap을 설치(Woodring and Kaya, 1988)하였다. White trap은 100×15 mm 크기의 perti dish에 55×15 mm 여과지(Whatman No.2)를 반쯤 걸쳐 놓은 다음 피펫을 이용하여 살균수 8 ml를 넣었다. 그리고 치사 된 솔수염하늘소 유충 한 마리를 여과지 위에 걸쳐 놓았다. 처리가 끝난 White trap은 25°C의 항온기에 보관 하면서 3일간 White trap으로 탈출한 선충수를 해부현미경 하에서 조사하였다. 유충 한 마리를 한 반목으로 5반복 조사하였다.

솔수염하늘소 성충에 대한 곤충병원성선충의 병원성

솔수염하늘소 성충에 대한 한국산 곤충병원성선충의 효과를 검정하기 위하여 한국산 곤충병원성선충 중 *S. carpocapsae* GSN-1 계통과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통을 실험에 이용하였다. 25×25 cm 플라스틱 cage에 20마리의 솔수염하늘소 성충을 넣고, 각각의 선충을 가정용 스프레이로 각각 500 ml에 1,000, 2,000, 4,000 ijs 농도로 살포하였다. 살포 후 먹이로 소나무 신초를 넣어주었다. 솔수염하늘소 성충 20마리를 한 처리구로 3반복 수행 하였다. 처리 후 5일간 치사 유무를 조사하였다.

곤충병원성선충의 솔수염하늘소 유충 서식목 처리효과

솔수염하늘소 유충이 서식하고 있는 곰솔 고사목에 곤충병원성선충 처리 시 솔수염하늘소의 치사에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 야외의 솔수염하늘소의 서식이 확인 된 임지에서 전년에 고사 된 곰솔을 1 m 크기로 잘라와 실험에 이용하였다. 직경 10-15 cm 내외의 나무를 이용하였는데 수피를 벗기지 않은 상태로 이용하였다. 곤충병원성선충은 *S. carpocapsae* GSN-1 계통을 이용하였는데 처리는 수침처리와 주관살포 등 두 가지 방법을 이용하였다.

수침처리는 500 *l* 용량의 플라스틱 물통에 물을 200 *l* 채우고, 곤충병원성선충을 *l* 당 25,000 ijs 농도로 처리하였다. 여기에 잘라온 곰솔 나무토막 3개를 넣었다. 무처리는 물만 채운 뒤 나무토막을 넣었으며 처리 후 차광막으로 덮은 뒤 7일 후에 나무를 꺼내어 수피를 벗겨내고, 침입공의 수와 솔

수염하늘소 유충 수, 치사 된 유충 수를 조사하였다. 한 개의 나무토막을 한 반복으로 3반복 처리하였다.

주관살포처리는 잘라온 곰솔 토막을 수피를 벗기지 않고, 수직으로 세워 놓은 뒤 *S. carpocapsae* GSN-1 계통의 곤충병원성선충을 가정용 분무기로 25,000 ijs/*l* 농도로 1 *l* 살포하였다. 무처리는 물만 1 *l* 살포하였다. 한 개의 나무토막을 한 반복으로 3반복 처리하였다. 처리 후 차광막을 덮은 뒤 7일 후 수피를 벗겨내고 침입공의 수와 솔수염하늘소 유충의 생충과 사충수를 조사하였다. 솔수염하늘소 유충 서식목 처리의 경우 3반복으로 처리하였으나 실제 서식하는 솔수염하늘소 유충수가 적어 Yamanaka (1993)의 조사방법을 활용하였다.

통계분석

솔수염하늘소 유충과 꿀벌부채명나방 유충에 대한 곤충병원성선충의 병원성은 접종농도에 따른 치사율을 구하여 Tukey's test로 처리 평균간의 유의성 차이를 검정하였다 (SAS/STAT® 9.3 user's guide, 2011).

결 과

소나무 목재 내부의 미끼곤충에 대한 곤충병원성선충의 병원성

곤충병원성선충별 병원성 검정

한국산 곤충병원성선충 4종의 처리 결과 *S. carpocapsae* GSN-1 계통과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통이 각각 63.2%와 52.5%의 치사율을 나타내어(Fig. 1) 다른 선충들에 비하여 상대적으로 효과가 높았다(*df*=4, 10, *F*=23.66, *P*=0.0001).

목재 내 미끼곤충 서식 깊이에 따른 곤충병원성선충의 병원성

S. carpocapsae GSN-1과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 두 계통의 소나무 재목 내 서식깊이별에 따른 병원성 차이를 알아보기 위하여 미끼곤충인 꿀벌부채명나방 유충을 이용하여 실험한 결과 곤충병원성선충의 처리별에 따른 병원성은 처리 일별로 차이가 있었으나 미끼곤충의 서식 깊이별에 따라서는 처리 2일 후 *S. carpocapsae* GSN-1 계통만 7.5 cm 천공 깊이에서 다른 처리 깊이와 차이를 보였다(처리 2일째: *df*=8, 27, *F*=13.47, *P*=0.0001) (Fig. 2). *S. carpocapsae* GSN-1은 처리 1일 후부터 50% 이상의 기주 치사율을 보였으나 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통은 처리 3일 후에 50% 이상의 기주 치사율을 보였다(Fig. 2).

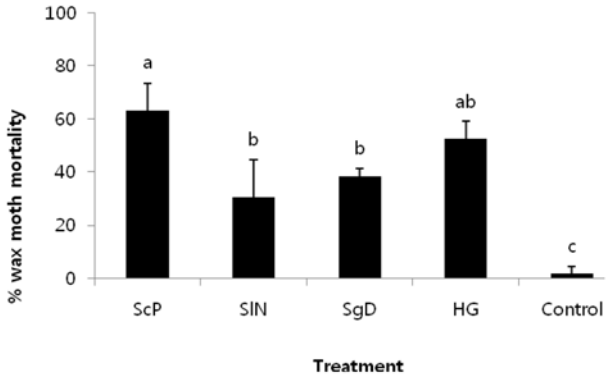

Fig. 1. Effect of Korean entomopathogenic nematodes on baited insect (3rd instar of *Galleria mellonella*) in pine log. Bars (±SD) with the same letter are not significantly different (Tukey's test, α=0.05). Bated insect was set 2.5 cm depth in pine log. ScP: *Steinernema carpocapsae* GSN-1 strain; SlN: *Steinernema longicaudum* Nonsan strain; SgD: *Steinernema glaseri* Dongrae strain; HG: *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan strain.

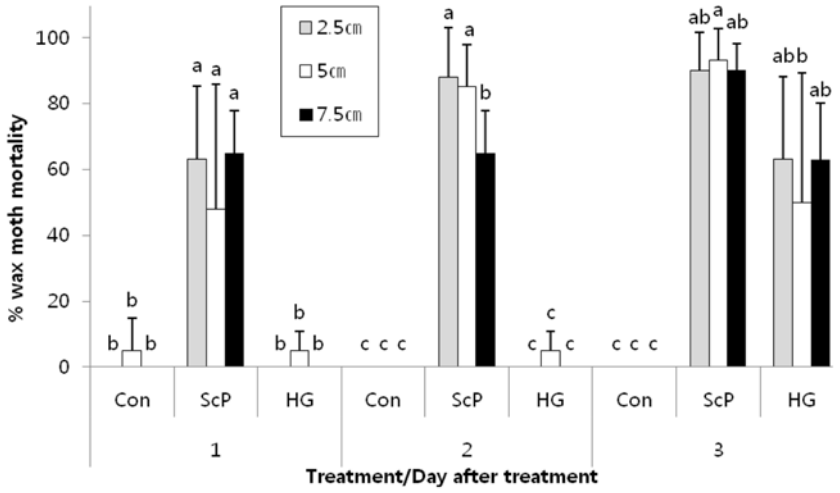

Fig. 2. Effect of Korean entomopathogenic nematodes on baited insect (3rd instar of *Galleria mellonella*) depending on location depth of bait in pine log. Bars (±SD) with the same letter in each days after treatment are not significantly different (Tukey's test, α=0.05). ScP: *Steinernema carpocapsae* GSN-1 strain; HG: *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan strain.

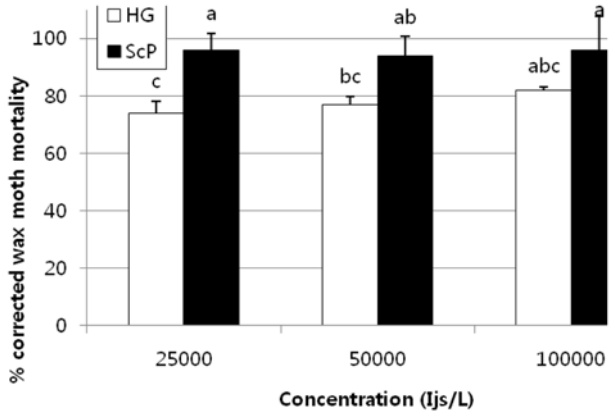

Fig. 3. Concentration effect of Korean entomopathogenic nematodes on baited insect (3rd instar of *Galleria mellonella*) in pine log. Bars (±SD) with the same letter are not significantly different (Tukey's test, α=0.05). Bated insect was set 2.5 cm depth in pine log. ScP: *Steinernema carpocapsae* GSN-1 strain; HG: *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan strain.

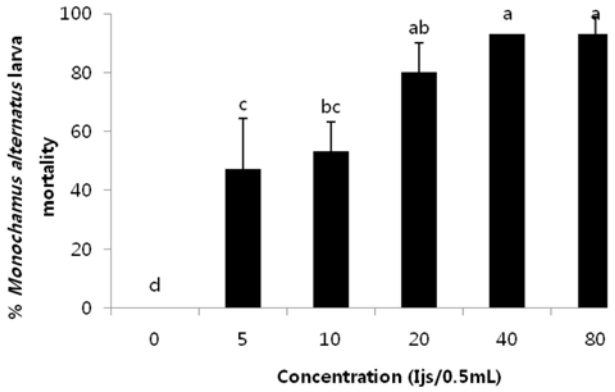

Fig. 4. Efficacy of Korean entomopathogenic nematode, *Steinernema carpocapse* GSN-1 strain on *Monochamus alternatus* larva in Petri dish. Bars (±SD) with the same letter are not significantly different (Tukey's test, α=0.05).

농도에 따른 곤충병원성선충의 병원성

곤충병원성선충 선발실험에서 선발된 *S. carpocapsae* GSN-1 계통과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통을 이용하여 소나무 목재 내부에서 미끼곤충에 대한 농도별 병원성을 검정한 결과 선충의 종류에 따라서만 차이가 있었고, 각 선충의 처리 농도별에 따라서는 차이를 보이지 않았다(*df*=6, 14, *F*=99.96, *P*=0.0001)(Fig. 3). *S. carpocapsae* GSN-1 계통이 모든 처리 농도에서 90% 이상의 보정사충율을 보여 80% 내외의 보정사충율을 보인 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통에 비하여 높은 병원성을 보였다(Fig. 3).

솔수염하늘소에 대한 곤충병원성선충의 병원성

솔수염하늘소 유충에 대한 곤충병원성선충의 병원성과 증식

소나무 목재 내에서 미끼곤충을 이용하여 한국산 곤충병원성선충의 병원성 검정을 수행 한 결과 선발 된 *S. carpocapsae*

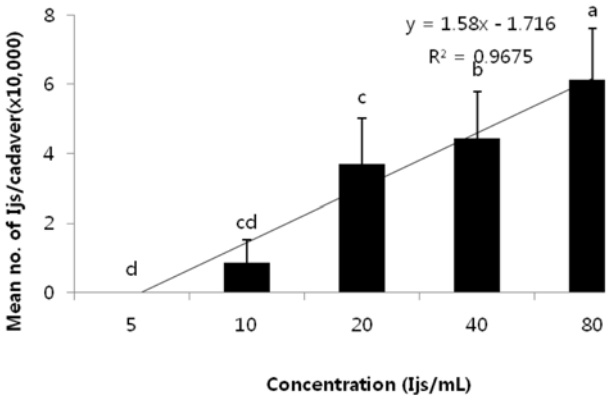

Fig. 5. Progeny production of *Steinernema carpocapse* GSN-1 strain in *Monochamus alternatus* larvae. Bars (±SD) with the same letter are not significantly different (Tukey's test, α=0.05).

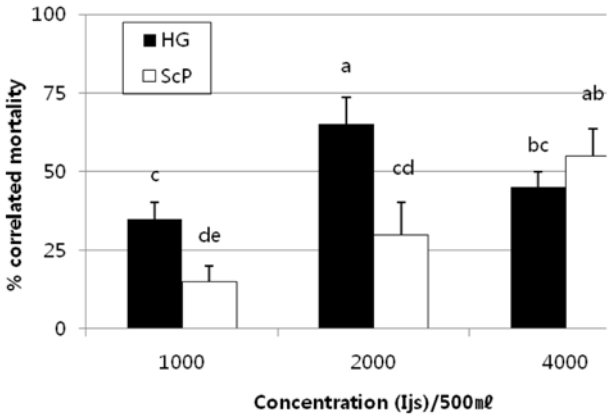

Fig. 6. Effect of *Steinernema carpocapsae* GSN-1 strain and *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan strain on *Monochamus alternatus* adult. Bars (±SD) with the same letter are not significantly different (Tukey's test, α=0.05).

GSN-1 계통의 솔수염하늘소 유충에 대한 병원성을 검정한 결과 20마리 이상 처리 시 90% 이상의 치사율을 나타내었다(*df*=5, 12, *F*=45.36, *P*=0.0001) (Fig. 4).

S. carpocapsae GSN-1 계통의 솔수염하늘소 유충에서 증식은 접종농도에 비례하여 증가하였다(*df*=5, 12, *F*=91.46, *P*=0.0001)(Fig. 5). 5 ijs 접종 시에는 증식 유충이 없었으나 80 ijs 처리에서는 6만마리 이상의 유충 증식수를 보였다 (Fig. 5).

솔수염하늘소 성충에 대한 곤충병원성선충의 병원성

한국산 곤충병원성선충 *S. carpocapsae* GSN-1 계통과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통을 솔수염하늘소 성충을 대상으로 살포한 결과 미끼곤충인 꿀벌부채명나방 유충이나 솔수염하늘소 유충과는 달리 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통에서 높은 치사율을 보였다(*df*=9, *F*=3.47, *P*=<0.0098) (Fig. 6). *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통은 2000 ijs 처리에서 65%의 가장 높은 보정사충율을 보였는데 *S. carpo-*

Table 1. Effect of entomopathogenic nematode, *Steinernema carpocapsae* GSN-1 strain on *Monochamus alternatus* larvae which sit in pine tree log

Treatment	Number of entrance hole of *M. alternatus*	Number of *M. alternatus* larva (No. of nematode infested cadaver)	
		In bark	In wood
Nematode spray	29	2	13
Spray control	35	1(1)	21
Timber soak	7	1	3
Soak control	15	1	2

Spray treatment was treated the nematode on surface of log with home sprayer. Timber soak treatment was soaked pine tree log which lived *M. alternatus* larva. Mortality was check at 7 days after treatment.

capsae GSN-1 계통은 동일 농도에서 30%의 보정사충율을 보였다(Fig. 6).

곤충병원성선충의 솔수염하늘소 유충 서식목 처리효과

솔수염하늘소의 산란공은 탈출공에 비하여 크기가 작아 다른 천공성 곤충의 것과 쉽게 구별이 되지 않는다(Zhao et al., 2008). 특히 수피가 쌓여 있는 상태에서의 구별은 판별이 곤란하여 본 실험에서는 무작위로 선정한 솔수염하늘소 유충 서식목을 사용하였는데 실제 침입공의 수나 침입공 내 서식하는 유충수는 차이가 많았다(Table 1). 곤충병원성선충 주관살포처리의 경우 침입공은 29개였으나 침입공에 서식하는 유충은 목질부 속에 21마리, 수피 아래쪽에 1마리였고, 수침처리목의 경우 곤충병원성선충 처리목에서는 7개의 침입공과 4마리 유충만 확인되었다. 곤충병원성선충에 감염된 하늘소 유충의 수는 수관살포처리에서 22마리의 서식 유충들 중 수피 아래에 서식하던 한 마리만이 감염되었으며 수침처리의 경우 감염 된 유충이 없었다(Table 1).

고 찰

곤충병원성선충은 다양한 해충에 대한 우수한 생물적 방제 인자로 인식되고 있으며 우리나라에서도 1980년대 중반 이후부터 활발한 연구를 수행하여 토착 곤충병원성선충 자원의 발굴과 활용에 관한 연구들이 수행되어 오고 있다(Kaya et al., 2006). 우리나라에서 곤충병원성선충을 이용한 해충방제는 주로 시설재배지의 나방류 해충을 대상으로 한 연구들이 많이 수행(Dolinski et al., 2012)되었으나 밤바구미(*Curculio sikkimensis*)나 복숭아명나방(*Dichocrocis punctiferalis*), 밤애기잎말이나방(*Cydia kurokoi*)과 같은 종실해충이나 노랑털알락나방(*Pryeria sinica*)과 같은 산림해충을 대상으로 수행 된 연구들도 있다(Choo et al., 2001; Lee et al., 2006). 산림해충들 중 하늘소류는 나방류 해충들과 달리 유충이 잎과 같은 노출된 곳에 서식하지 않고, 목재 내에 서식하기 때문에 훈증제를 제외한 일반 살포형식의 방제제 적용이 어려운 현실이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 목재 내부에 있는 하늘소 유충을 곤충병원성선충이 치사 시킬 수 있는지 여부에 초점을 두어 실험을 수행하였는데 목재 내부에 있는 기주곤충을 치사 시켰다. Phan (2008)은 톱밥을 채워놓은 용기에 솔수염하늘소 유충을 넣고, 곤충병원성선충 *S. carpocapsae*와 *S. glaseri* 처리 시 기주가 있는 조건에서는 *S. glaseri*의 경우 12-16 cm까지 이동하여 솔수염하늘소에 감염을 일으켰다고 하여 목재 내부에 있는 해충에 대해서도 곤충병원성선충의 침입가능성을 제시한 바 있는데 본 연구에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 실험에 이용한 선충들 중 *S. carpocapsae* GSN-1 계통과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통이 다른 두 선충들에 비하여 목재 내에 있는 꿀벌부채명나방에 대한 병원성이 높았는데 이러한 차이는 곤충병원성선충 자체가 가지고 있는 병원성의 차이나 목재내부에 서식하는 기주곤충을 탐색하는 능력의 차이에 기인할 것으로 생각된다. Phan (2008)의 선행연구에서도 탐색형의 기주 탐색전략을 가지는 *S. glaseri*가 잠복형 기주 탐색 전략을 갖는 *S. carpocapsae*에 비하여 톱밥 속에 있는 솔수염하늘소 유충으로의 이동력이 높았다고 하였는데 본 연구에서는 *S. carpocapsae*의 병원성이 더 높게 나타나 병원성의 차이가 주된 요인으로 생각된다. 한편 본 연구에서는 수체 내 서식 깊이별 실험에서 시간대별 감염력을 조사하였는데 *S. carpocapsae* GSN-1 계통은 24시간 후에도 50% 이상의 기주곤충에 대한 치사율을 보였고, 72시간이 지난 후 모든 깊이에서 90% 이상의 감염율을 나타내었지만 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통의 경우 24시간 후에는 매우 낮은 감염율을 보였고, 72시간 후에도 50% 내외의 낮은 감염율을 보였다. 이러한 침입속도의 차이도 전술한 바와 같이 각 선충 종이나 계통이 가지고 있는 기주탐색 능력의 차이나 병원성의 차이에 기인한 것으로 생각된다. Choi et al. (2006)은 우리나라에서 탐색 된 heterorhabditis속 선충들 간에도 녹색콩풍뎅이(*Popillia quadriguttata*) 유충이나 주황긴다리풍뎅이(*Ectinohoplia rufipes*) 유충에 상이한 병원성을 보인다고 하였다.

솔수염하늘소 성충에 곤충병원성 선충을 직접살포 시에도 병원성을 나타내었는데 꿀벌부채명나방 유충에 대한 실험과

는 달리 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통의 병원성이 더 높게 나타났다. 일반적으로 Heterorhabditis속 선충들은 Steinernema속 선충들에 비하여 딱정벌레목 해충에 병원성이 높은데 기주 탐색 특성에도 차이를 보여 heterorhabditis 선충들의 경우 탐색형의 기주 탐색 특성을 가지고 있고, *S. carpocapsae*의 경우 잠복형의 기주탐색 특성을 가지고 있다 (Grewal et al., 1994). 따라서 활동성이 많은 솔수염하늘소 성충의 경우 탐색형의 기주탐색 습성을 지닌 선충의 감염력이 상대적으로 더 높았을 것으로 생각된다.

대부분의 곤충병원성선충들은 나방류나 딱정벌레 유충들을 방제 대상으로 하지만 솔수염하늘소 성충에 대해서도 병원성이 있었는데 Lee et al. (2005)은 본 실험에 이용한 선충인 *S. carpocapsae* GSN-1과 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통 등을 이용하여 녹색콩풍뎅이 성충에 대한 병원성이 있음을 확인 한 바 있다. 아울러 비행력이 있는 성충들이 곤충병원성선충에 감염 된 상태로 다른 곳으로 이동 할 경우 곤충병원성선충을 확산시키는 매개자가 될 수 있는 가능성을 언급하였는데 솔수염하늘소의 경우도 가능성이 있을 것으로 생각된다.

곤충병원성선충이 목재 내부의 미끼곤충을 탐색하여 병원성을 나타내고, 솔수염하늘소 유충과 성충에 대한 치사효과를 나타냄에도 불구하고, 솔수염하늘소 유충 서식목에 곤충병원성선충을 직접 살포하거나 곤충병원성선충 현탁액에 수침 처리시 감염충의 발생은 매우 적었다. 수피 부분 살포처리의 경우 수피 아래에 서식하던 솔수염하늘소 유충 한 마리에서만 감염이 확인되었고, 목재 내부에 서식하던 21마리의 유충은 감염이 되지 않았다. 아울러 수침처리의 경우 비록 개체수는 적었지만 목재내부에 있던 7마리나 수피 아래에 있던 한 마리 모두 곤충병원성선충에 감염이 되지 않았다. 반면 Yamanaka (1993)가 야외에서 솔수염하늘소 유충 서식 벌채목에 *S. carpocapsae* Mexican 계통을 분무처리하였을 때에는 처리시기나 처리물량에 따라 병원성에 차이는 있었지만 16.7-100%의 방제효과를 보였다. 이러한 병원성의 차이는 본 실험에서는 분무살포 후 7일만에 효과를 조사하였는데 Yamanaka (1993)의 경우 처리 30일 후 조사를 하여 곤충병원성선충이 기주를 탐색하여 침입할 수 있는 시간이 더 길었기 때문으로 생각된다. 또한 본 실험은 건물의 옥상에서 차광막을 설치한 상태로 실험을 하여 지표면에 수분이 없었으나 Yamanaka (1993)는 상대습도가 70% 내외인 상태로 실험을 수행하여 선충의 생존에 유리한 조건이 형성되었을 것으로 생각된다. 한편 본 실험에서 선충 현탁액에 솔수염하늘소 서식목을 수침 처리한 경우 선충에 감염 된 개체가 나오지 않았는데 이는 수침처리의 경우 나무가 물 위로 뜨고, 곤충병원성선충은 중력에 의해 상대적으로 용기의 바닥 쪽으로 가라앉기 때문에 기주로의 이동이 제한적이어서 감염이 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 향후 나무가 물에 뜨지 않고, 잠기는 수준의 현탁액 처리를 한다면 방제효과를 더 향상 시킬 수 있을 것으로 생각된다. 비록 곤충병원성선충이 솔수염하늘소 서식 벌채목에서 실용적인 효과를 나타내지 못하였지만 천공성 해충의 방제에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

Literature Cited

Bergdahl, D. R. (1988) Impact of pine wood nematode in north America: present and future. J. Nematol. 20:260-265.

Choi, W. G., P. J. Ha, S. M. Lee, H. Y. Choo and D. W. Lee (2006) Pathogenicity of Korean entomopathogenic nematodes on larva of *Popillia quadriguttata*, *Ectinohoplia rufipes* and *Phyllopertha diversa* (Coleoptera: Rutelidae) and persistence in golf courses. Korea J. Pestic. Sci. 10:107-116. (In Korean)

Choo, H. Y., H. H. Kim, D. W. Lee, S. M. Lee, S. H. Park, Y. M. Choo and J. K. Kim (2001) Practical utilization of entomopathogenic nematodes, *Steinernema carpocapsae* Pocheon strain and *Heterorhabditis bacteriophora* Hamyang strain for control of chestnut insect pests. Korean J. Appl. Entomol. 40:69-76. (In Korean)

Copping, L. G. (2001) A world compendium the manual of biocontrol agents. BCPC. Alton, UK.

Dolinski, C., H. Y. Choo and L. W. Duncan (2012) Grower acceptance of entomopathogenic nematodes: case studies on three continents. J. Nematol. 44:226-235.

Dwinell, L. D. (1997) The pinewood nematode: regulation and mitigation. Ann. Rev. Phytopathol. 35:153-166.

Grewal, P. S., E. E. Lewis, R. Gaugler and J. F. Campbell (1994) Host-finding behavior as a predictor of foraging strategy in entomopathogenic nematodes. Parasitol. 108: 207-215.

Kaya, H. K., M. M. Aguillera, A. Alumai, H. Y. Choo, M. de la Torre, A. Fodor, S. Ganguly, S. Hazir, T. Lakatos, A. Pye, M. Wilson, S. Yamanaki, H. Yang and R. U. Ehlers (2006) Status of entomopathogenic nematodes and their symbiotic bacteria from selected countries or regions of the world. Biological Control 38:134-155.

Kim, D. S., S. M. Lee, Y. J. Chung, K. S. Choi, Y. S. Moon and C. G. Park (2003) Emergence ecology of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), a vector of pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Korean J. Appl. Entomol. 42:307-313. (In Korean)

Kishi, Y. (1995) The pinewood nematode and Japanese pine sawyer. Thomas, Tokyo, p302.

Korea Forestry Research Institute (KFRI). (2007) Damage characteristics and control strategies of pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* in Korean white pine forest. Korea Forest Research Institute, Seoul. pp 1-12. (In Korean)

Kwon, T. S., J. H. Lim, S. J. Sim, Y. D. Kwon, S. K. Son, K. Y. Lee, Y. T. Kim, J. W. Park, C. H. Shin, S. B. Ryu, C. K. Lee,

S. C. Shin, Y. J. Chung and Y. S. Park (2006) Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. slatuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. Jour. Korean For. Soc. 95:543-550.

Lee, C. M., T. H. Lim, S. M. Lee, L. S. Mun, S. S. Han, and D. W. Lee (2015) Nematicidal and reproduction supression activity of actinomyces isolates against pine wood nematode, *Bersaphelenchus xylophilus*. Korea J. Pestic. Sci. 19:141-150. (In Korean)

Lee, D. W., J. Y. Yang, G. Y. Han, H. Y. Choo, S. M. Lee, H. H. Kim, C. G. Park and Y. M. Choo (2006) Entomopathogenic nematodes for biological control of *Pryeria sinica* Moore (Lepidoptera: Zygaenidae) and persistence on *Euonymus japonica* Thunberg foliage. J. Asia-Pacific Entomol. 9:165-172.

Lee, K. S., D. W. Lee, H. H. Kim, S. M. Lee, H. Y. Choo and H. K. Shin (2005) Pathogenicity of entomopathogenic nematodes to *Popillia quadriguttata* (Coleoptera: Scarabaeidae) adult. Korean J. Appl. Entomol. 44:145-150.

Mamiya, Y. (1988) History of pine wilt disease in Japan. J. Nematol. 20:219-226.

Phan, L. K. (2008) Potential of entomopathogenic nematodes for controlling the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*. In Pine wilt disease: Zhao, B. G., Eds; Springer, Japan. pp.26-32.

SAS/STAT® 9.3 user's guide. (2011) SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Shimazu, M. (2008) Biological control of the Japanese pine sawyer beetle, *Monochamus alternatus*. In Pine wilt disease: Zhao, B. G., Eds; Springer, Japan. pp.351-370.

Shin, J. H., O. G. Kwon, C. M. Lee, S. M. Lee, Y. H. Choi, J. H. Kim, Y. S. Kim and D. W. Lee (2016) Nematicidal activity of *Eclipta prostrate* extract and terthiophene against pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Korean J. Pestic. Sci. 20:56-65. (In Korean)

Shin, S. C. (2008) Pine wilt disease in Korea. In Pine wilt disease: Zhao, B. G., Eds; Springer, Japan. pp.26-32.

Wingfield, M. J., R. B. Blanchette and T. H. Nicholls (1984) Is the pine wood nematode an important pathogen in the United States? Journal of Forestry 82:232-235.

Woodring, J. L. and H. K. Kaya (1988) Steinernematidae and Heterorhabditidae nematodes: a handbook of techniques. Southern Coop. Ser. Bull. 331, Alkansas Agri. Exp. Stn. USA.

Yamanaka, S. (1993) Field control of the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae by *Steinernema carpocapsae* (Nematoda: Rhabditida). Jap. J. Nematol. 23:71-78.

Yi, C. K., B. H. Byun, J. D. Park, S. I. Yang and K. H. Chang (1989) First finding of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer) Nickle and its insect vector in Korea. Res. Rep. For. Res. Inst. 38:141-149. (In Korean)

Zhao, B. G., K. Futai, J. R. Sutherland and Y. Takeuchi (2008) Pine wilt disease. Springer, Japan.

한국산 곤충병원성선충을 이용한 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)의 생물적 방제

유황빈 · 정영학[1] · 이상명[1] · 추호렬 · 이동운[2,*]

경상대학교 응용생물학과, [1]㈜SM바이오, [2]경북대학교 생태환경관광학부

요 약 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)는 우리나라와 일본의 소나무림에서 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)을 전파하는 매개충으로 알려져 있다. 본 연구는 곤충병원성선충을 이용하여 솔수염하늘소의 생물적 방제 가능성을 알아보기 위하여 수행하였다. 실험에 이용한 한국산 곤충병원성선충 4종(*Heterorhabditis* sp. Gyeongsan, *Steinernema carpocapsae* GSN1, *S. glaseri* Dongrae, *S. longicaudum* Nonsan 계통)은 소나무 고사목 내의 미끼곤충인 꿀벌부채명나방 유충을 치사시켰는데 *S. carpocapsae* GSN1의 병원성이 가장 높았다. 두 선충 모두 7.5 cm 깊이에 있는 꿀벌부채명나방을 치사시켰다. 곤충병원성선충은 솔수염하늘소 유충과 성충 모두에 병원성을 보였는데 성충에 대한 분무처리 시 *S. carpocapsae* GSN1 계통보다 *Heterorhabditis* sp. Gyeongsan 계통의 병원성이 높았다. 솔수염하늘소 유충이 서식하고 있는 소나무 벌채목에 대한 *S. carpocapsae* GSN1 계통의 수피면 분무처리와 벌채목 수침 처리 시 분무처리에서만 선충에 감염 된 유충이 확인되었다. 곤충병원성선충은 고사목 수체 내 솔수염하늘소 유충 방제의 실용성은 낮았지만 수체 내 해충에 대한 방제 가능성은 있어 추후 천공성 해충의 방제에 활용 가능성이 있을 것으로 생각된다.

색인어 곤충병원성선충, 생물적 방제, 소나무, 소나무재선충, 솔수염하늘소