

곤충병원성 선충(Steinernematid와 Heterorhabditid)을 이용한 시설재배지 배추좀나방(*Plutella xylostella*)의 생물적 방제

김형환 · 조성래¹ · 이동운² · 전흥용 · 박정규³ · 추호렬^{3*}

원예연구소 원예환경과, ¹경남농업기술원 기술지원과, ²상주대학교 생물응용학과, ³경상대학교 응용생물환경학과, 농업생명과학연구원

Biological Control of Diamondback Moth, *Plutella xylostella* with Korean Isolates of Entomopathogenic Nematodes (Steinernematid and Heterorhabditid) in Greenhouse

Hyeong-Hwan Kim, Sung-Rae Cho¹, Dong-Woon Lee², Heung-Yong Jeon, Chung-Gyoo Park³ and Ho-Yul Choo^{3*}

Horticultural Environment Division, National Horticultural Research Institute, Suwon 441-440, Republic of Korea,

¹Division of Technology Service, Gyeongnam Agricultural Research and Extension Services, Jinju 660-360, Republic of Korea,

²Department of Applied Biology, Sangju National University, Sangju 742-711, Republic of Korea,

³Department of Applied Biology and Environmental Sciences, Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Republic of Korea

ABSTRACT : Five strains of Korean entomopathogenic nematodes (EPN), steinernematids and heterorhabditids were evaluated and tried in laboratory, pot, and vegetable greenhouses for environmentally friendly control of diamondback moth (DBM), *Plutella xylostella*, from 2002 to 2005. LC₅₀ values of five EPN strains against DBM were different depending on nematode strain and DBM instar. LC₅₀ value of *Steinernema carpocapsae* GSN1 (GSN1) was the lowest representing 2.6~3.9 infective juveniles (Ijs, 3rd stage) to 2nd to 4th instars of DBM. Pathogenicity of five effective strains against DBM was different depending on nematode strain, concentration, application times, and vegetable in pot. The most effective nematode was GSN1. *Steinernema* spp. was more effective than *Heterorhabditis* spp. against DBM. Two or three times of applications of EPN were effective regardless of nematode strain and concentration in pot. Efficacy of EPN was different depending on vegetable species. Efficacy was higher on Chinese cabbage, red mustard, and Ssamchoo than that on cabbage, kale, and leaf broccoli. Efficacy of GSN1, *Steinernema* GSNUS-10, *Steinernema* GSNUS-14, and *Heterorhabditis* GSNUH-1 was variable depending on nematode strain, concentration, application times, and vegetable in greenhouse experiments. GSN1 was the most effective and 100,000 infective juveniles per m² (=1×10⁹ Ijs/ha) resulted in higher efficacy. Three times of application of nematodes led to higher control efficacy than one or two applications. Efficacy of nematodes was higher on Chinese cabbage than cabbage or kale in greenhouse.

KEY WORDS : LC₅₀, pathogenicity, *Steinernema carpocapsae*, *Heterorhabditids*, Chinese cabbage, Control efficacy

초 록 : 2002년부터 2005년까지 엽채류 재배지역에 발생하여 많은 피해를 주고 있는 배추좀나방을 환경친화적으로 방제하기 위하여 우리나라 토양에서 분리한 steinernematid 선충과 heterorhabditid 선충,

*Corresponding author. E-mail: hychoo@gnu.ac.kr

5계통을 이용하여 실내 petri dish, pot 및 엽채류 재배 온실에서 병원성과 방제효과를 조사하였다. 곤충병원성 선충 5계통의 배추좀나방에 대한 반수치사농도(LC₅₀)를 조사한 결과, 선충의 계통과 배추좀나방의 령기에 따라 차이가 있었다. 반수치사농도는 *Steinernema carpocapsae* GSN1(GSN1) 계통이 배추좀나방 2~4령충에서 2.6~3.9마리로 가장 낮았다. 배추좀나방에 대한 pot에서의 병원성 실험결과도 선충의 계통, 처리농도, 처리횟수 및 엽채류의 종류에 따라 차이가 있었다. 병원성이 가장 높았던 선충은 GSN1 계통이었고, *Steinernema* 계통 선충들이 *Heterorhabditis* 계통 선충들보다 높았다. 선충의 처리회수에 따른 배추좀나방의 유충 치사율에서는 선충의 계통과 처리농도에 관계없이 1회 처리보다 2회와 3회 처리에서 방제효과가 높았다. 배추, 양배추, 케일, 적겨자, 싹추 및 잎브로콜리에 발생하는 배추좀나방에 곤충병원성 선충을 처리한 결과 배추, 싹추, 적겨자에서는 방제효과가 높았으나, 양배추, 케일, 잎브로콜리에서는 효과가 낮았다. 시설 내 배추, 양배추 및 케일 포장에서 GSN1, GSNUS-14 및 *Heterorhabditis* GSNUS-1 계통의 배추좀나방 유충에 대한 방제효과는 선충 계통, 처리농도, 처리회수 및 엽채류의 종류에 따라 다양하게 나타났다. 선충 계통 간에는 GSN1이 방제효과가 높았고, 처리농도에서는 m²당 100,000마리(720,000마리/7.2 m²=1×10⁹마리/ha)가 다른 두 농도처리보다 높았다. 처리회수에서는 3회 처리가 1회와 2회 처리보다 높았고, 엽채류 종류에 따라서는 배추가 양배추나 케일보다 높았다.

검색어 : 반수치사농도(LC₅₀), 병원성, *Steinernema carpocapsae*, *Heterorhabditis*, 배추, 방제효과

배추좀나방은 배추, 무, 양배추, 유채 등 십자화과 작물에 대하여 전세계적으로 피해를 주고 있는 식엽성 해충의 하나로 세계적으로 년 간 10억불 이상의 방제비용이 들고 있는 주요 해충이다(Talekar and Shelton, 1993; Kennedy and Collier, 2000). 우리나라에서도 배추좀나방은 제주도부터 강원도의 고랭지 재배지까지 전국적으로 발생하여 심한 피해를 주고 있는 실정이다(Kim and Lee, 1991; Song, 1992) 방제는 주로 화학적 방제에 의존하고 있다(Chung, 1992; Cho *et al.*, 2001). 배추좀나방은 기온이 낮은 지역에서는 년 2-4회 발생하기도 하지만(Kennedy and Collier, 2000) 우리나라에서는 10-12세대를 경과하는 것으로 알려져 있다(Kim and Lee, 1991). 배추좀나방은 이러한 많은 발생세대와 각종 살충제의 오·남용 등으로 인하여 농약에 대한 저항성 발달이 전세계적으로 보고되고 있고(Tabashnik, 1994), 우리나라에서도 1990년대 초반부터 피레스로이드계통이나 유기인계 뿐만 아니라 BT제에 대한 약제저항성이 보고되고 있다(Kim *et al.*, 1990; Song, 1991, 1992; Cho *et al.*, 2001). 따라서 농약에 대한 저항성 발달에 효율적인 관리 방법이 요구되고 있다. 한편 배추와 같은 싹채류 작물의 경우 우리나라에서는 생식으로 많이 이용하고 있기 때문에 농약 사용에 대한 소비자들의 거부감이 많아 친환경 재배에 대한 요구도가 높은 작물이다. 농약에 대한 잠재적 위험성의 회피와 싹채류 소비자의 안전성을 확보할 수 있는 대체 방법의 하나는 곤충병원성선충을 이용한 생물적 방제이다.

곤충병원성선충 *Steinernema* spp.와 *Heterorhabditis*

spp.는 공생세균인 *Xenorhabdus* spp. (*Steinernematidae*의 공생세균)와 *Photorhabdus* spp. (*Heterorhabditidae*의 공생세균)와 작용하여 기주 곤충에 패혈증을 일으켜 24-48시간 이내에 기주를 치사시킬 수 있는 우수한 생물적 방제인자이다. 또한 식물체는 물론 척추동물이나 어류와 같은 비표적 생물에 안전하고, 대량생산과 장기보관이 가능하며 화학 방제제와도 일부를 제외하고는 혼용이 가능하여 활용 가능성이 높은 생물적 방제인자이다(Kaya, 1990; Hara *et al.*, 1991; Kaya and Gaguler, 1993). 곤충병원성선충은 거의 대부분의 곤충목에 병원성을 가질 정도로 기주범위가 넓은데 특히 나방류 유충과 토양서식 해충에 효과적이다(Kaya and Gaguler, 1993). 이러한 장점으로 인하여 곤충병원성선충은 미국이나 유럽, 일본 등지에서 상용화되고 있고, 우리나라에서도 근래에 상용화 되어 생물적 방제인자로 활용되고 있다. 상용화 되어 있는 곤충병원성선충은 *S. carpocapsae*를 비롯하여 *S. feltiae*, *S. glaseri*, *S. kushidai*, *H. bacteriophora*, *H. heliothis*, *H. megidis* 등인데(Thomson, 1992) 곤충병원성선충도 일반 천적류와 같이 지역생태계를 공유해온 토착종을 이용하는 것이 비 방제 대상 해충에 대한 위험성과 같은 생태적 악영향을 최소화 할 수 있는 방법이다(Blackshaw, 1988). 한편 곤충병원성선충은 일반적으로 자외선과 건조에 약하기 때문에(Gaugler and Boush, 1978; Kaya and Gaguler, 1993) 노지보다는 시설재배지에 적용이 용이하다.

우리나라에서 시설엽채류의 재배면적은 지속적으로 증가하고 있는 상황으로 1990년에 8,569 ha, 총생산량

217,433톤에서 2004년 현재 14,146 ha에 491,973톤이 생산되고 있다(Ministry of Agriculture and Forestry, 2004). 그리고 시설재배지에서는 일반 노지재배에서는 크게 문제시 되지 않던 해충들이 피해를 주거나, 년 중 발생하여 지속적인 피해를 주고 있다. 그러나 생식용으로 주로 이용되는 소비 형태의 특성으로 인하여 농약의 사용은 제한적이며 지속적이고, 반복적인 해충의 발생은 농약 저항성의 출현을 촉진시키고 있다.

따라서 본 연구는 우리나라 토양에서 분리한 steinernematid 선충과 heterorhabditid 선충을 이용하여 실내 petri dish에서 병원성 검정과, pot 및 온실재배 엽채류의 배추좀나방에 대한 방제효과를 조사하여 생물적 방제 가능성을 알아보기 위하여 수행하였다.

재료 및 방법

곤충병원성 선충과 배추좀나방 : 2001년부터 2002년까지 경상대학교 선충실험실에서 전국의 산림, 원예작물 재배지 및 휴한지에서 토양을 채취하여 실내에서 꿀벌부채명나방(*Galleria mellonella*)을 미끼 곤충으로 이용하여 (Dutky et al., 1964) 14계통의 곤충병원성 선충 steinernematid와 heterorhabditid를 선별하였다. 그리고 꿀벌부채명나방에 재접종하여 침입수와 증식률을 조사하여 병원성과 증식률이 우수하였던 *Steinernema* sp. GSNUS-10 (GSNUS-10), *Steinernema* sp. GSNUS-14(GSNUS-14), *Heterorhabditis* sp. GSNUH-1(GSNUH-1) 계통 및 시판 중인 *S. carpocapsae* GSN1(GSN1) 계통과 1995년에 토양에서 분리하여 실험실에서 누대증식 중이던 *H. bacteriophora* 함유(HbH) 계통을 이용하여 실험을 수행하였다. 각각의 곤충병원성 선충들은 꿀벌부채명나방 노숙유충에 증식시켜 White trap을 이용하여 수거한 뒤 10°C 냉장고에 보관하면서 3주 이내의 선충을 실험에 이용하였다 (Woodring and Kaya, 1988).

배추좀나방은 원예연구소 해충연구실에서 유채(*Brassica campestris* subsp. *napus* var. *nippo-oleifera*)를 이용하여 누대사육하고 있던 유충을 이용하였다. 2령, 3령, 4령 유충으로 구분하였다.

실내실험

곤충병원성 선충은 GSNUS-10 계통과, GSNUS-14 계통, GSNUH-1 계통, GSN1 계통, HbH 계통을 이용하여 배추좀나방 유충을 대상으로 실내에서 병원성을 검정하

였는데, 배추좀나방은 실내에서 사육한 유충들 중 건강한 유충만을 골라 실험에 사용하였다. 직경 5.5×1.5 cm 플라스틱 Petri dish에 여과지(Whatmann #2) 2장을 깔고, 배추잎을 직경 5.0 cm 크기로 잘라 넣었다. 여기에 배추좀나방 2령, 3령, 4령충을 구분하여 한 마리씩 방사하였다. 각각의 Petri dish에 5, 10, 20, 40, 80, 160마리/0.5 ml의 농도로 선충 현탁액을 만들어 micro pipette으로 0.5 ml씩 접종하였다. 무처리는 살균수만 0.5 ml 처리하였다. 처리 후 Petri dish를 랩으로 싼 다음 25±2°C, 상대습도 60±5%, 16L : 8D 광 조건의 항온기에 넣었다. 선충 처리 후 24시간 간격으로 5일 동안 선충에 의한 배추좀나방의 치사유무를 육안으로 조사하였고, 이를 다시 해부현미경하에서 치사된 유충을 해부하여 선충에 의한 치사유무를 재확인 하였다. 실험은 10마리 유충을 1반복으로 하여 5반복으로 실험하였다.

Pot실험

1) 선충의 처리농도와 횟수에 따른 배추좀나방 방제효과
실내 병원성 검정에서 이용하였던 곤충병원성 선충을 이용하여 실험을 수행하였고, 배추좀나방은 온실에서 유채로 누대사육하던 개체를 이용하였다. 50-60일묘의 배추 한 주가 심겨져 있는 육묘용 pot (8×7 cm) 한 개씩을 아크릴 곤충사육상자(30×30×28.5 cm)에 넣고, 2령과 3령충을 각각 5마리씩 잎에 부착시킨 2시간 후 완전히 정착된 것을 확인한 다음, 가정용 소형분무기(대성, 클로버)로 곤충병원성 선충을 1,000마리, 3,000마리, 9,000마리/30 ml 농도로 살포하였는데, 3일 간격으로 각각 1회, 2회, 3회 살포하였다. 무처리는 살균수 30 ml만을 살포하였다. 선충 처리 후 곤충사육상자는 25±3°C, 60±5% 상대습도, 16L : 8D 광 조건의 항온기에 보관하였고, 5일후 유충의 치사유무를 조사하였다. 실험은 한 개의 상자를 1반복으로 하여 5반복으로 수행하였다.

2) 엽채류 종류에 따른 배추좀나방 방제효과

쌈채류 종류에 따른 곤충병원성 선충의 배추좀나방 방제효과를 알아보기 위하여 배추(*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis* (Lour.) Rupr., 신춘 1호, 동부한농화학)와 양배추(*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L., 동북, 농우바 이오), 케일(*Brassica oleracea* L. var. *acephala* Alef., 케일 티비시, 아시아종묘), 적겨자(*Brassica juncea* L., 제일 적겨자, 제일종묘농산), 쌈추(*Brassica lee* ssp. *namai* cv., 제일조선쌈배추, 제일종묘농산) 및 잎브로콜리(*Brassica oleracea* var. *botrytis* aut *italiana* L., 브로콜리녹국, 아시

아종묘)를 이용하여 실험을 수행하였다. 육묘용 트레이에 각각의 싹채류 종자를 파종하여 유리온실에서 3주 동안 키운 후 떡잎이 2~3장이 나왔을 때, 육묘용 pot (8×7 cm)로 이식하였다. 그리고 30~40일 동안 관행적 방법에 따라 육묘를 재배하였다. 떡잎이 5~6장이 되면 각각의 pot 한 개씩을 곤충사육상자(30×30×28.5 cm)에 넣고, 선충의 처리농도와 횟수에 따른 병원성 검정과 동일한 방법으로 실험을 수행하였는데, 선충은 1회만 살포하였다. 무처리기는 살균수 30 ml만을 처리하였으며, 처리 후 5일째 유충의 치사유무를 조사하였다. 실험은 한 개의 상자를 1반복으로 하여 5반복으로 조사하였다.

시설하우스 실험

원예연구소 비닐하우스에서 2005년 4월 25일에 50일된 배추, 양배추 및 케일 묘종을 정식한 후 실험을 수행하였는데, 배추좀나방의 발생상황을 조사하면서 첫 발생된 지 일주일 후에 곤충병원성 선충 GSN1, GSNUS-14, GSNUH-1 계통을 처리하였다. 온실 내 각 시험구의 면적은 1.2×6.0 m (7.2 m²)였고, 40 cm 간격으로 14주씩 28주를 두 줄로 심었다. 선충 처리농도는 구당 3 l의 물에 720,000마리 (=10⁹마리/ha)와 240,000마리 (=3.3×10⁸마리/ha), 80,000마리 (=1.1×10⁸마리/ha)의 농도로 희석하여 20 l의 배부 식분무기(광성, 광성식)로 살포하였다. 선충 처리는 주로 오후 4시 이후에 살포하였고, 3일 간격으로 1회, 2회, 3회 살포하였다. 방제효과는 최종 선충 살포 후 7일째 배추좀나방의 유충 밀도를 조사하여 사전조사 밀도와 비교하여 생충률로 방제가를 구하였다. 시설 내에서 배추와 양배추 및 케일은 관행재배법으로 관리하였다. 실험은 한 개의 구를 1반복으로 하여 완전임의배치법 5반복으로 하였고, 해충의 밀도는 구당 10주를 임의로 선택하여 조사하였다.

통계분석

배추좀나방의 령기에 따른 곤충병원성 선충의 농도별 병원성은 배추좀나방의 령기별로 치사율을 구하여 Student-Newman-Keuls test로 처리평균간 유의성 차이를 검정하였으며, 반수치사농도(LC₅₀)는 probit 분석하였다(Cho, 1996). Pot 실험에서 곤충병원성 선충의 종류와 처리농도와 처리 횟수 및 엽채류 종류에 따른 유충 치사율은 요인분석과 Tukey's HSD test로 처리평균간 유의성 차이를 검정하였다(Cho, 1996). 시설 하우스에서 곤충병원성 선충의 계통, 처리농도, 처리횟수 및 엽채류 종류에 따른 배추좀나방에 대한 선충의 방제효과는 무처리구와 비교한 생충률{[무처리구 생충률(%)-처리구 생충률(%)] / [무처리구 생충률(%)]×100}로 전환하여 Tukey's HSD test로 처리 간 유의성 차이를 분석하였다(Cho, 1996). 모든 Student-Newman-Keuls test와 Tukey test의 유의성은 P=0.05에서 검정하였으며 결과는 평균±표준편차로 표기하였다.

결 과

실내실험

배추좀나방 유충에 대한 곤충병원성 선충의 병원성은 배추좀나방 유충의 령기가 어린것에 비하여 노숙한 것에서 높았으며 처리한 곤충병원성 선충의 종이나 계통에 따라 차이를 보였다(Table 1). 실험에 이용한 배추좀나방 유충에 대한 곤충병원성 선충 5계통의 병원성은 *Steinernema*속 계통의 선충들이 *Heterorhabditis*속 계통의 선충들보다 효과적이었는데 배추좀나방 유충에 대한 반수치사농도(LC₅₀)는 4령충에서는 GSN1 계통이 2.6마리로 가장 낮았으며, 3령충에 대해서는 GSNUH-1 계통이 가장 낮았다(Table 1).

Table 1. Lethal concentration against *Plutella xylostella* as determined by Petri dish bioassay for the infective juveniles of entomopathogenic nematodes, steinernematids and heterorhabditids

Stage	LC ₅₀ (95% fiducial limit)*				
	GSNUS-10**	GSNUS-14	GSN1	GSNUH-1	HbH
2nd instar	4.1(2.4-5.7)	4.2(2.6-5.7)	3.9(2.3-5.1)	3.8(2.0-5.4)	3.7(2.0-5.1)
3rd instar	4.0(2.4-5.1)	4.0(2.7-5.0)	3.6(1.9-4.5)	2.6(0.9-4.1)	3.5(1.8-4.5)
4th instar	3.6(1.9-5.2)	3.3(1.6-4.8)	2.6(1.0-4.1)	2.7(1.0-4.3)	2.6(0.9-4.1)

*LC₅₀ was expressed as number of infective juveniles per larva. **GSNUS-10; *Steinernema* sp. GSNUS-10, GSNUS-14; *Steinernema* sp. GSNUS-14, GSN1; *Steinernema carpocapsae* GSN1, GSNUH-1; *Heterorhabditis* sp. GSNUH-1, HbH; *Heterorhabditis bacteriophora* Hamyang. Mortality was checked everyday for 5 days after nematode inoculation.

Pot에서 선충의 처리농도와 횡수에 따른 방제효과

Pot에서 곤충병원성 선충의 종류와 처리농도, 처리 횡수는 배추좀나방 유충에 대한 치사율에 영향을 미쳤다 (Table 2, 3). 실내실험과 동일하게 *Heterorhabditis*속 계통의 선충들에 비하여 *Steinernema*속 계통의 병원성이

높았는데 GSN1 계통과 GSNUS-14 계통의 병원성이 높게 나타났다($F=19.25$, $df=44, 180$, $P<0.001$)(Table 3). 그리고 처리농도에 따른 치사율은 배추좀나방에 대한 병원성이 상대적으로 낮은 GSNUH-1 계통을 제외하고는 2회와 3회 처리에서는 차이를 보이지 않았으나 1회 처리 시에는 선충의 처리농도가 높을수록 높아 9,000마리/30 ml의

Table 2. Analysis of variance for main effects and interaction of entomopathogenic nematode strain, concentration, and application time on mortality of diamondback moth in pot

Source of variance	df	Mean square	F value	Pr>F
Nematode strain (N)	4	966.2	63.9	0.0001
Application time (A)	2	1507.1	99.7	0.0001
Nematode concentration (C)	2	983.1	65.1	0.0001
N×A	8	118.2	7.8	0.0001
N×C	8	202.6	13.4	0.0001
A×C	4	156.4	10.4	0.0001
N×A×C	16	47.6	3.2	0.0001
Error	180	15.1	-	-
Corrected total	224	-	-	-

Table 3. Mortality of 2nd and 3rd instars of *Plutella xylostella* exposed to entomopathogenic nematodes, steinernematids and heterorhabditids on potted Chinese cabbage

Entomopathogenic nematodes	Larval mortality (%)±SD								
	One time application*			Two times application			Three times application		
	1,000 Ijs**	3,000 Ijs	9,000 Ijs	1,000 Ijs	3,000 Ijs	9,000 Ijs	1,000 Ijs	3,000 Ijs	9,000 Ijs
<i>Steinernema</i> sp. GSN1	94±5.5a***	96±5.5a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a
<i>Steinernema</i> sp. GSNUS-14	90±0.0ab	96±5.5a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a
<i>Steinernema</i> sp. GSNUS-10	90±7.1ab	92±4.5ab	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a	100±0.0a
<i>Heterorhabditis bacteriophora</i> Hamyang	80±7.0bc	90±7.1ab	96±5.5ab	96±5.5a	100±0.0a	100±0.0a	96±5.5a	100±0.0a	100±0.0a
<i>Heterorhabditis</i> sp. GSNUH-1	72±8.4c	82±8.4b	90±7.1b	76±5.5b	96±5.5a	100±0.0a	84±8.9b	100±0.0a	100±0.0a

*Entomopathogenic nematodes were sprayed one hour after placement on Chinese cabbage at the first application, on 3rd day at the second application, and 6th day at the third application, respectively. **Concentration (Ijs/30 ml/pot). ***Means within a column followed by different lowercase letters are significantly different by Tukey's HSD test ($P<0.05$).

Table 4. Analysis of variance for main effects and interaction of entomopathogenic nematode strain, concentration, and vegetable species on mortality of diamondback moth in pot

Source of variance	df	Mean square	F value	Pr>F
Nematode strains (N)	4	4991.9	113.7	0.0001
Vegetable species (VS)	5	2367.7	54.0	0.0001
Nematode concentrations (NC)	2	9381.6	213.8	0.0001
N×VS	20	84.0	1.9	0.0008
N×NC	8	127.4	2.9	0.0038
VS×NC	10	55.4	1.3	0.2500
N×VS×NC	40	41.9	1.0	0.5517
Error	360	43.9	-	-
Corrected total	449	-	-	-

Table 5. Analysis of variance for main effects and interaction of entomopathogenic nematodes, concentration, application time, and vegetable species on mortality of diamondback moth in greenhouse

Source of variance		df	Mean square	F Value	Pr>F
Nematode strains	(N)	2	3139.0	32.5	0.0001
Nematode concentrations	(NC)	2	3144.1	32.6	0.0001
Application time	(AT)	2	10133.4	105.0	0.0001
Vegetable species	(VS)	2	5136.4	53.2	0.0001
	N×NC	4	18.5	0.2	0.9425
	N×AT	4	32.5	0.3	0.8532
	N×VS	4	650.6	6.7	0.0001
	NC×AT	4	67.1	0.7	0.5954
	NC×VS	4	57.6	0.6	0.6650
	AT×VS	4	153.2	1.6	0.1773
	N×NC×AT	8	11.8	0.1	0.9983
	N×AT×VS	8	36.0	0.4	0.9345
	NC×AT×VS	8	47.3	0.5	0.8629
	N×NC×AT×VS	24	27.8	0.3	0.9997
	Error	324	96.5	-	-
	Corrected total	404	-	-	-

농도에서 가장 높게 나타났다. 선충의 처리횟수에 따른 치사율은 선충 1회 처리보다는 2-3회 처리 시 높았으며, 2회와 3회 처리간에는 차이가 없었다. 선충의 처리횟수에 따른 치사율은 GSNUH-1 계통을 1,000마리/30 ml의 농도로 1회와 2회 처리했을 때를 제외하고는 선충의 모든 계통, 처리농도 및 처리횟수에서 80% 이상으로 나타났다. 특히, GSN1 계통은 1,000마리/30 ml의 농도로 1회 처리한 것에서도 94%의 높은 치사율을 보였다.

Pot에서 엽채류 종류별에 따른 방제효과

곤충병원성 선충의 종류나 처리농도, 엽채류의 종류는 배추좀나방 치사율에 영향을 미쳤다(Fig. 1). 여섯 종류의 엽채류에서 배추좀나방에 대한 곤충병원성 선충들의 병원성은 선충 계통과 처리농도에 관계없이 배추에서 가장 높았고, 다음이 적겨자와 쌈추였으며, 양배추, 케일 및 잎브로콜리가 대체로 낮은 경향을 보였다(Fig. 1). 선충의 처리농도에 따른 엽채류 종류별 배추좀나방 유충 치사율은 처리농도가 높을수록 치사율도 높았다. 선충의 계통에 따른 엽채류 종류별 배추좀나방 유충 치사율에서는 처리농도에 관계없이 각 엽채류 종류에서 GSN1 계통이 가장 높은 병원성을 나타내었다(F=14.21, df=89, 360, P<0.0001). 병원성이 가장 높았던 GSN1 계통을 1,000마리/30 ml의 농도로 1회 처리한 결과, 유충 치사율은 적겨자에서 96%로 가장 높았고, 배추에서는 94%였으며, 잎브로

콜리에서 76%로 가장 낮았다. 또한 3,000마리/30 ml의 농도 이상으로 처리 시에는 양배추와 케일 및 잎브로콜리에서도 96% 이상의 높은 유충 치사율을 보였다.

시설 엽채류 재배지에서의 방제효과

시설재배를 하고 있는 배추, 양배추 및 케일 포장에서 GSN1, GSNUS-14, GSNUH-1 계통의 배추좀나방에 대한 방제효과는 선충 계통, 처리농도, 처리횟수 및 엽채류의 종류에 따라 다양하게 나타났다(Fig. 2). 실내나 pot 실험과 동일한 경향을 보였는데, 처리 선충들 중에서는 GSN1 계통의 방제효과가 가장 높았으며 처리농도가 높을수록 높은 방제효과를 보여 720,000마리(1×10^9 마리/ha) 처리농도에서 높았다. 처리횟수에서는 3회 처리가 1회와 2회 처리보다 높았으며, 엽채류 종류에 따라서는 양배추나 케일에서보다 배추에서 방제효과가 높았다(F=14.21, df=44, 180, P<0.0001). 배추에서의 배추좀나방에 대한 방제효과는 선충 계통, 처리농도 및 처리횟수에 따라 뚜렷한 차이를 보였는데, GSN1 계통을 720,000마리(1×10^9 마리/ha)의 농도로 3회 처리하였을 때 97.7%로 가장 높았고, GSNUH-1 계통을 80,000마리(1.1×10^8 마리/ha)의 농도로 1회 처리시 52.0%로 가장 낮은 방제효과를 보였다(F=4.05, df=26, 108, P<0.0001)(Fig. 2). 양배추에서 배추좀나방에 대한 방제효과에서도 선충 계통, 처리농도 및 처리횟수에 따라 뚜렷한 차이를 보였는데, GSN1 계통을

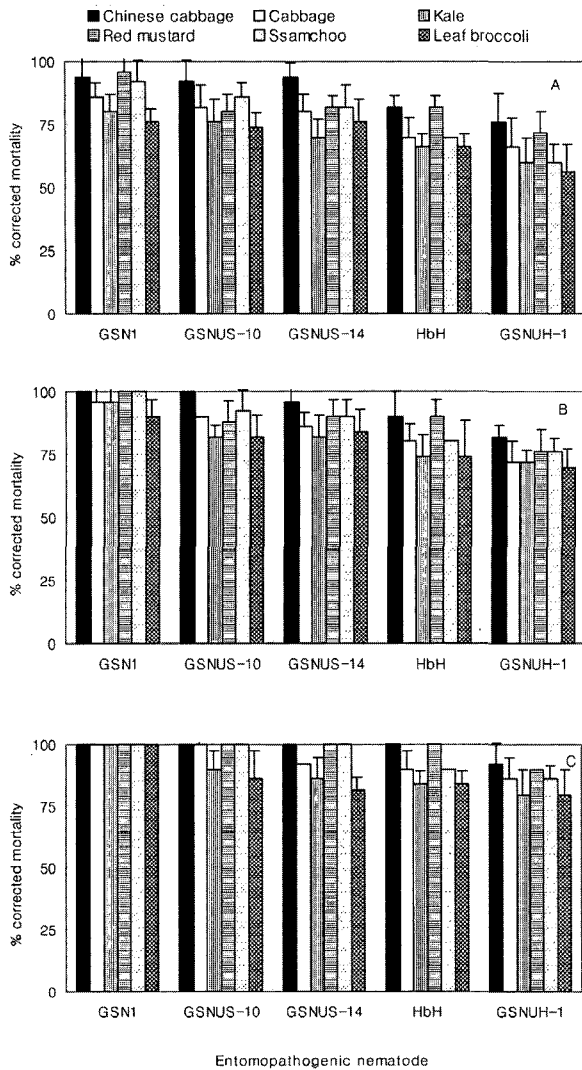


Fig. 1. Corrected mortality (mean %±SD) of 2nd and 3rd instars of *Plutella xylostella* by entomopathogenic nematodes, steinernematids and heterorhabditids depending on vegetables at the rate of 1,000 (A), 2,000 (B) and 3,000 (C) infective juveniles in pot. GSNUS-10; *Steinernema* sp. GSNUS-10, GSNUS-14; *Steinernema* sp. GSNUS-14, GSN1; *Steinernema carpocapsae* GSN1, HbH; *Heterorhabditis bacteriophora* Hamyang, GSNUH-1; *Heterorhabditis* sp. GSNUH-1. Vegetables used in pot experiment were 50~55-day old seedlings. Bars indicate standard deviation of the mean.

720,000마리(1×10^9 마리/ha)의 농도로 3회 처리하였을 때 89.8%로서 가장 높았고, GSNUH-1 계통을 80,000마리(1.1×10^8 마리/ha)의 농도로 1회 처리 시 59.3%로 가장 낮은 방제효과를 보였다($F=10.01$, $df=26, 108$, $P<0.0001$) (Fig. 2). 그러나 케일에서의 배추좀나방에 대한 방제효과는 처리농도에 따라 차이를 보였지만, 선충 계통과 처리횟수에 따라서는 차이를 보이지 않았다($F=5.26$, $df=26, 108$,

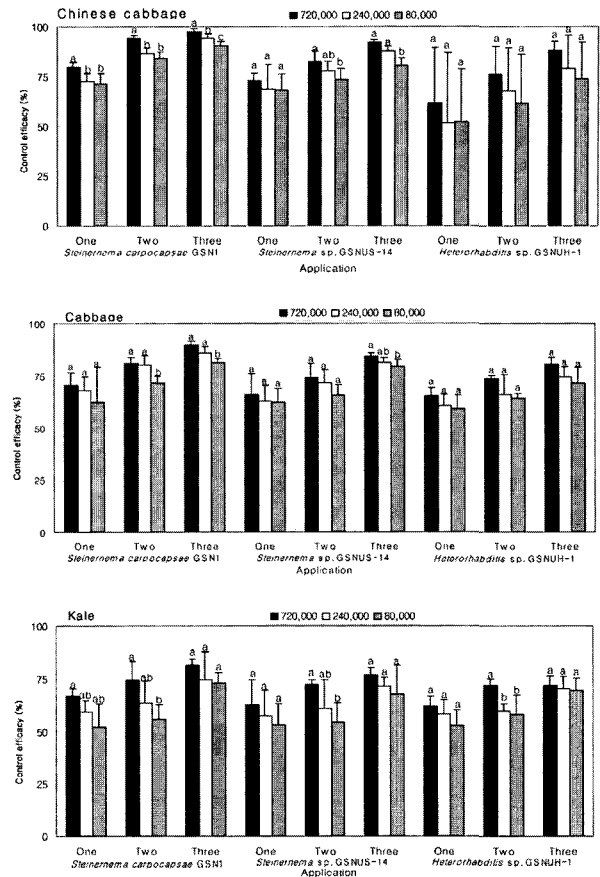


Fig. 2. Control efficacy of entomopathogenic nematodes, *Steinernema carpocapsae* GSN1, *Steinernema* sp. GSNU-14, and *Heterorhabditis* sp. GSNUH-1 against *Plutella xylostella* on Chinese cabbage, cabbage, and kale in greenhouse. Control efficacy=[(% living larvae of treatment-% living larvae of control)/% living larvae of control]×100. The same lowercase letters above bars for a application are not significantly different (Tukey's HSD test $P<0.05$). One, two and three was application times.

$P<0.0001$)(Fig. 2). 케일에서 배추좀나방에 대한 방제효과는 GSN1 계통을 720,000마리의 농도로 3회 처리했을 때 81.5%로 가장 높았고, GSN1 계통을 80,000(1.1×10^8 마리/ha)마리의 농도로 1회 처리했을 때 52.1%로 가장 낮았다.

고 찰

쌈채류에 발생하는 배추좀나방에 대한 곤충병원성 선충의 효과는 다양하게 나타났다. 대상해충의 종류나 선충의 계통 및 해충의 령기 등에 따라 선충은 병원성에서 차이를 보였으나 대체로 70% 이상의 방제기를 보였다. 본 연구에 이용한 한국산 곤충병원성 선충들은 엽채류

에서 배추좀나방에 대한 방제효과가 매우 높았는데, 실내 실험에서 배추좀나방에 대한 반수치사농도(LC₅₀)는 3령충에서 2.6~4.0마리였다. 이는 Baur *et al.* (1998)이 *S. carpocapsae*를 이용하여 배추좀나방 3령충을 대상으로 유사한 실험을 하였을 때 LC₅₀이 29.1~39.4마리였던 것에 비하여 10배가량 낮은 수치로 우리나라산 선충들의 병원성이 대단히 높은 편이었다. 곤충병원성 선충의 해충에 대한 병원성은 선충의 종이나 계통에 따라 차이를 나타내는데, Mason과 Wright (1997)는 말레이시아산 곤충병원성 선충들을 이용한 배추좀나방에 대한 병원성 조사에서 일부 선충 계통들은 배추좀나방을 100% 치사시킨 반면, 일부 계통들은 3.3%와 6.7%의 매우 낮은 치사율을 보인다고 하였다.

배추좀나방에 대한 곤충병원성 선충의 처리횟수와 농도는 치사율에 영향을 미쳤다. 농도의 증가에 따른 치사율이 처리횟수에 따른 치사율보다 대체로 높았다. 즉 1회 방제와 2회 방제 간에는 차이를 보이지 않았고, 3회 방제 시에는 차이를 보였다. 그러나 100,000마리/m² 처리에 비하여 배양 처리 시 선충의 병원성이 증가하였다. 시설 포장에서 곤충병원성 선충의 배추좀나방에 대한 방제효과는 엽채류의 종류에 따라 차이를 보였다. 즉, 배추에서는 1회 처리하였을 때 75% 이상의 방제가를 보인 반면, 양배추와 케일에서는 75% 이하의 방제가를 보였다. 이는 엽채류의 종류에 따른 잎에서 선충의 지속성 차이 때문으로 생각된다. 배추 잎에서는 부착되어 생존하는 선충의 수가 양배추나 케일에 비하여 30일묘에서는 30배 이상 높았다(Kim *et al.*, 2006). 한편 실내나 pot 실험에서 3회 처리 시 배추좀나방에 대한 방제가가 100%였던 것과는 달리 시설 포장 실험에서는 90% 내외의 방제가를 나타내었다. 이는 비록 온실조건에서 선충을 처리하였지만 야외선과 건조에 의한 영향으로 생각된다. 엽면 살포된 선충의 잎에서 지속성은 6시간 후에 현저히 떨어진다(Kim *et al.*, 2006). Mason과 Wright (1997)는 말레이시아산 곤충병원성 선충의 경우 slide grass에서 상대습도 40%일 때 선충의 반수 생존시간은 20분이하이고, 80% 상대습도에서는 40분이하라고 하였다. Baur *et al.* (1997)은 꿀벌부채명나방 유충에서 증식된 *S. carpocapsae*는 배추좀나방에 대하여 상대습도 100%와 75%일 때 병원성에서 차이가 없었지만 *in vitro*에서 증식시켜 수화제형으로 제형화한 *S. carpocapsae*의 경우 75% 상대습도에서는 병원성이 2배 가량 낮게 나타난다고 하였다. 그리고 Schroer와 Ehlers (2005)도 *S. carpocapsae*의 배추 잎에서 생존시간은 상대습도 80%에 비하여 60%에서 7배 이상 낮다고 하였다.

선충의 처리 농도나 처리횟수에 따른 병원성의 차이는 배추좀나방에 대해 병원성이 높은 계통에서는 차이를 보이지 않았고, 병원성이 낮은 계통의 경우에 농도가 높거나 처리횟수를 늘릴 경우 병원성이 높게 나타났다. 이러한 결과는 Mason과 Wright (1997)의 연구에서도 동일한 경향을 보였다. 즉 배추좀나방에 대한 병원성이 높은 *Heterorhabditis n. sp.*(8) 계통의 경우 농도에 따른 병원성 차이를 보이지 않았지만 병원성이 낮은 *Steinernema* 계통 선충들은 접종농도가 높아짐에 따라 병원성이 높게 나타났다. 한편, 곤충병원성 선충의 배추좀나방에 대한 침입 경과 시간은 본 연구에서는 조사를 하지 않았지만 Schroer와 Ehlers (2005)는 1시간 노출과 4시간 노출, 20시간 노출 간에 병원성에서 차이가 없다고 하였고, Mason과 Wright (1997)는 6시간 노출에 비하여 12시간 노출 시 배추좀나방의 치사율이 증가한다고 하여 상이한 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 곤충병원성 선충의 종에 따른 차이나 실험 조건의 차이에 의한 것으로 생각된다. 야외에서 배추좀나방에 대한 선충의 방제효과를 높이기 위해서는 엽면에 선충의 생존수를 늘리고, 생존 시간을 늘려야 하기 때문에 상대습도가 높고, 자외선량이 적은 조건에서 선충을 처리하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 아울러 본 실험의 결과에 의하면 야외에서 배추좀나방의 방제를 위해서는 3.3×10⁸마리/ha 농도로 3일 간격으로 2회 살포하면 90%이상의 방제효과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다.

엽채류에는 나비·나방류에 의한 피해가 일반적으로 심각한 편이다. 그리고 이들의 생물적 방제인자는 다양하다. 그러나 많은 생물적 방제인자들은 기후특이성, 환경에 대한 영향, 대량생산의 제약 등의 문제점을 가지고 있다. 물론 곤충병원성 선충의 경우도 자외선과 건조에 약한 단점을 가지고 있지만, 본 연구의 결과에서 제시된 것처럼 다양한 엽채류에서 배추좀나방에 높은 방제효과를 보였다. 특히 해충발생의 양상이 단일 해충이 특정시기에 발생하는 것이 아니라 여러 해충이 다양한 령기로 혼재되어 발생하는 점을 고려하면 곤충병원성 선충의 적용이 매우 효율적일 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원과 농촌진흥청 원예연구소의 박사후 연수 과정에 의해 수행한 결과입니다.

Literated Cited

- Baur, M.E., H.K. Kaya, B.E. Tabashnik and C.F. Chilcutt. 1998. Suppression of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) with an entomopathogenic nematode (Rhabditida: Steinernematidae) and *Bacillus thuringiensis* Berliner. *J. Econ. Entomol.* 91: 1089-1095.
- Blackshaw, R.P. 1988. A survey of insect parasitic nematodes in Northern Ireland. *Ann. Appl. Biol.* 113: 561-565.
- Cho, I.H. 1996. Practice and application of SAS. Sungandang Pub. Co. 665pp.
- Cho, J.M., K.J. Kim, J.H. Hur, and D.S. Han. 2001. Diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) resistance to organophosphorus and carbamate insecticides in Kangwon alpine vegetable croplands. *Korean J. Pesti. Sci.* 5: 30-35.
- Chung, B.K. 1992. Study on the control of diamondback moth. 1992. *Ann. Res. Rpt. Kyongnam Provincial R.D.A.* pp. 322-324.
- Dutky, S.R., J.V. Thompson and G.E. Cantwell. 1964. A technique for the mass propagation of the DD-136 nematode. *J. Insect Pathol.* 6: 417-422.
- Gaugler, R. and G.M. Boush. 1978. Effects of ultraviolet radiation and sunlight on the entomogenous nematode, *Neoaplectana carpocapsae*. *J. Inverte. Pathol.* 32: 291-296.
- Hara, A.H., R. Gaugler, H.K. Kaya and L.M. Lebeck. 1991. Natural populations of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Heterorhabditidae, Steinernematidae) from the Hawaiian islands. *Environ. Entomol.* 20: 211-216
- Kaya, H.K. 1990. Soil ecology. pp. 93-115 *In* R. Gaugler and H. K. Kaya, eds. *Entomopathogenic nematode in biological control*. Boca Raton, FL. CRC Press.
- Kaya, H.K. and R. Gaugler. 1993. Entomopathogenic nematodes. *Annu. Rev. Entomol.* 38: 181-206.
- Kennedy, R., and R. Collier. 2000. Pests and diseases of field vegetables. pp. 185-257. *In* *Pest and disease management handbook*, Alford, D.V. (ed.). 615pp. Blackwell Science, Oxford.
- Kim, G.H., Y.S. Seo, J.H. Lee and K.Y. Cho. 1990. Development of fenvalerate resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linne (Lepidoptera: Yponomeutidae) and its cross resistance. *Korean J. Appl. Entomol.* 29: 194-200.
- Kim, H.H., H.Y. Jeon, S.R. Cho, D.W. Lee and H.Y. Choo. 2006. Persistence of entomopathogenic nematode, *Steinernema carpocapsae* GSN1 strain on vegetable leaf in greenhouses. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 24: 198-204.
- Kim, M.H. and S.C. Lee. 1991. Bionomics of diamond-back moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Korean J. Appl. Entomol.* 30: 169-173.
- Mason, J.M. and D.J. Wright. 1997. Potential for the control of *Plutella xylostella* larvae with entomopathogenic nematodes. *J. Invertebr. Pathol.* 70: 234-242.
- Ministry of Agriculture and Forestry. 2004. Actual output of vegetable. 159pp.
- Schroer, S. and R.-U. Ehlers. 2005. Foliar application of the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* for biological control of diamondback moth larvae (*Plutella xylostella*). *Biol. Control.* 33: 81-86.
- Song, S.S. 1991. Resistance of diamondback moth (*Plutella xylostella* L.: Yponomeutidae: Lepidoptera) against *Bacillus thuringiensis* Berliner. *Korean J. Appl. Entomol.* 31: 338-344.
- Song, S.S. 1992. Resistance of diamondback moth (*Plutella xylostella* L.) against the pyrethroids. *Korean J. Appl. Entomol.* 31: 338-344.
- Tabashnik, B.E. 1994. Evolution of resistance to *Bacillus thuringiensis*. *Ann. Rev. Entomol.* 39: 47-79.
- Talekar, N.S. and A.M. Shelton. 1993. Biology, ecology, and management of the diamondback moth. *Ann. Rev. Entomol.* 38: 275-301.
- Thomson, W.T. 1992. A worldwide guide to beneficial animals used for pest control purposes. Thomson publications. Fresno, USA. 92pp.
- Woodring, J.L. and H.K. Kaya. 1988. Steinernematidae and heterorhabditidae nematodes: a handbook of techniques. Southern Coop. Ser. Bull. 331, Arkansas Agri. Exp. Stn. Fayetteville, AR. 29pp.

(Received for publication 13 June 2006;
accepted 12 July 2006)