

Note

<https://doi.org/10.11626/KJEB.2023.41.4.455>

Korean J. Environ. Biol.

41(4) : 455-462 (2023)

ISSN 1226-9999 (print)

ISSN 2287-7851 (online)

동계 휴경기간 살선충제 처리에 따른 오이 시설재배지의 고구마뿌리혹선충 방제 효과

고형래*, 박세근, 네이트산 카르시, 박병용

국립농업과학원 작물보호과

Control efficacy of two nematicides against southern root-knot nematode in a cucumber greenhouse during the fallow period in winter

Hyoung-Rai Ko*, Sekeun Park, Natesan Karthi and Byeong-Yong Park

Crop Protection Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- This research can contribute to preventing crop damage from root-knot nematode by providing control technologies developed in consideration of crop type, soil temperature, and chemical pesticide characteristics.

*Corresponding author

Hyoung-Rai Ko
Tel. 063-238-3317
E-mail. reachsg@korea.kr

Received: 7 November 2023

Revised: 21 November 2023

Revision accepted: 27 November 2023

Abstract: Southern root-knot nematode (SRKN, *Meloidogyne incognita*) is known to be responsible for annual economic losses of 38.2 million USD in cucumber cultivation in Korea. Nematicides are frequently used to manage SRKN in plastic greenhouses. A field experiment was conducted to assess the effect of a soil fumigant (dimethyl disulfide, DMDS) and a non-fumigant (fluopyram, FL) against SRKN during the winter fallow season in a greenhouse from October to December. Nematicidal efficacy was assessed at 43 days after treatment, and the root gall index was measured 4 months after transplanting cucumber seedlings. DMDS effectively reduced second-stage SRKN juvenile density with 91% control efficacy, while FL showed no control efficacy against SRKN. Root gall index values were significantly different ($p=0.020$) in DMDS treatment and controls at 1.0 ± 0.00 and 4.3 ± 0.58 , respectively. This study showed that DMDS could be considered an effective nematicide for controlling SRKN in the fallow period in winter.

Keywords: control efficacy, cucumber, dimethyl-disulfide, fluopyram, southern root-knot nematode

1. 서 론

우리나라에서 오이는 중요한 채소작물 중 하나이며, 식품, 미용 소재 등 다양한 분야에서 널리 이용되고 있다. 국

내 오이 총 재배면적은 40,857 ha로 약 75% (30,708 ha)가 비닐하우스와 같은 시설에서 재배되고 있다(MAFRA 2022). 오이의 재배방식은 축성재배, 반축성재배, 터널조숙재배, 노지재배, 노지역제재배, 시설억제재배 등이 있으며,

이 중 축성재배, 반축성재배, 시설억제재배가 비닐하우스 등 시설에서 재배되는 작형으로 알려져 있다(RDA 2018). 시설재배 오이는 수년에서 수십 년간 연속하여 흰가루병(powdery mildew), 노균병(downy mildew), 총채벌레(thrips), 가루이(whitefly), 뿌리혹선충(root-knot nematode) 등 다양한 병해충에 의한 피해를 받고 있다(Park et al. 1996; Park et al. 1998; Kim et al. 2006; Jeong et al. 2018). 특히 뿌리혹선충은 오이의 뿌리에 기생하면서 거대세포를 만들어 양분과 수분을 수탈하고 품질 저하, 수량 감소 등 피해를 유발하는 병해충 중 하나로 알려져 있다(Greco and di Vito 2009).

오이에 피해를 주는 뿌리혹선충으로는 고구마뿌리혹선충(*Meloidogyne incognita*), 자바니카뿌리혹선충(*Meloidogyne javanica*), 에티오피카뿌리혹선충(가칭, *Meloidogyne ethiopica*), 엔테로로비뿌리혹선충(가칭, *Meloidogyne enterolobii*) 등이 알려져 있다(Dickerson et al. 2000; Kiewnick et al. 2008; Kim and Lee 2008; Wu et al. 2011; Aydinli et al. 2013). 국내 오이 시설재배지에서는 주로 고구마뿌리혹선충이 피해를 일으키고 있으며(Ko et al. 2017), 피해한계밀도는 토양 100 cm³당 4~13마리 이상으로 토양에 피해한계밀도 이상의 밀도로 감염되어 있으면 윤작, 살선충제 처리 등을 통한 방제 조치를 해야 피해를 줄일 수 있다(Dickerson et al. 2000). 국내 오이 재배지에서는 뿌리혹선충에 의해 연간 500억 원 이상의 경제적 피해가 발생하는 것으로 나타나 피해 최소화를 위한 방제전략 수립이 필요하다(Kim and Lee 2008).

뿌리혹선충은 일반적으로 화학 살선충제 처리(chemical nematicides), 비기주작물과 저항성 품종을 이용한 윤작(crop rotation), 살선충 효과가 있는 녹비작물 재배(nematicidal cover crop), 태양열 토양소독(sun-heat soil sterilization)을 이용하면 피해를 줄일 수 있다(Nyczepir and Thomas 2009). 국내에서도 오이 재배지 뿌리혹선충 방제를 위해 토양개량, 살선충제 처리, 담수, 유채 종실, 수단그라스, 곤충병원성세균, 키틴분해미생물 등 이용한 다양한 방제 기술이 연구되어 왔다(Park et al. 1995; Kim et al. 2010; Ha et al. 2014; Kim et al. 2014, 2015a). 여름철(6~8월)에 휴경하는 과채류 시설재배지에서는 담수, 태양열 토양소독, 녹비작물 재배, 살선충제 처리 등 다양한 방제 기술을 이용할 수 있다(Kim 2001). 반면, 겨울철(11~4월) 휴경하는 시설재배 작형의 경우 휴경기간 동안 저온으로 뿌

리혹선충 방제를 위해 처리할 수 있는 방제 방법이 살선충제 처리 등으로 제한적이다.

대부분의 뿌리혹선충 방제용 살선충제는 주로 정식 전에 처리하는데, 훈증성 약제 처리는 2~3주 이상의 시간이 필요하고 영농 준비 시기와 비슷해 처리 시기를 결정하기 어려운 문제가 있다. 처리 시기별 온도 조건도 살선충제의 선충 방제 효과에 영향을 줄 수 있다(Han et al. 2018). 따라서, 본 연구에서는 겨울철에 휴경하는 오이 시설재배지에서 수확 종료 직후 훈증성(dimethyl disulfide), 비훈증성(flupyram) 살선충제를 처리하여 영농 준비기 이전에 고구마뿌리혹선충의 방제 가능 여부를 확인하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험포장 구획 및 선충 초기밀도 조사

겨울철 휴경기간(2022년 11월~2023년 3월)을 활용하여 오이 시설재배지에서 문제되고 있는 뿌리혹선충의 약제 방제 효과를 평가하기 위해 고구마뿌리혹선충(*Meloidogyne incognita*)이 감염된 전북 장수군 소재 오이 시설하우스(432 m²) 2동을 시험포장으로 선정하였다. 2022년 10월 17일 면적이 21.6 m²인 처리구 9개를 구획하였고, 뿌리혹선충 2기 유충의 초기 감염밀도(initial population, Pi)를 조사하기 위해 처리구당 5개 지점에서 토양 시료를 채취하였다(Barker 1985). 채취한 토양을 골고루 섞고 계량컵을 이용하여 100 mL 부피의 토양 시료를 정량한 다음, 4L의 수돗물이 들어있는 5 L 부피의 플라스틱 통에 넣고 토양 현탁액을 조제하였다. 토양 현탁액을 20 mesh 체와 400 mesh 체에 차례로 거르고 400 mesh 체 위에 남은 물질을 Baermann's funnel 장치에 넣어 토양 내 선충을 분리하였다. 48시간 경과 후 장치 하단에 모인 물을 15 mL 원심분리 튜브에 담아 회수하였고, 실체현미경(MZ5; Leica, Wetzlar, Germany)을 이용하여 2기 유충 마릿수를 계수하였다.

2.2. 살선충제 처리 및 방제 효과 평가

동계기간 휴경기를 활용한 오이 시설재배지 뿌리혹선충 방제 효과 포장시험 과정은 Fig. 1과 같다. 시험약제로는 오이뿌리혹선충 방제 약제로 등록된 훈증성 약제 1종

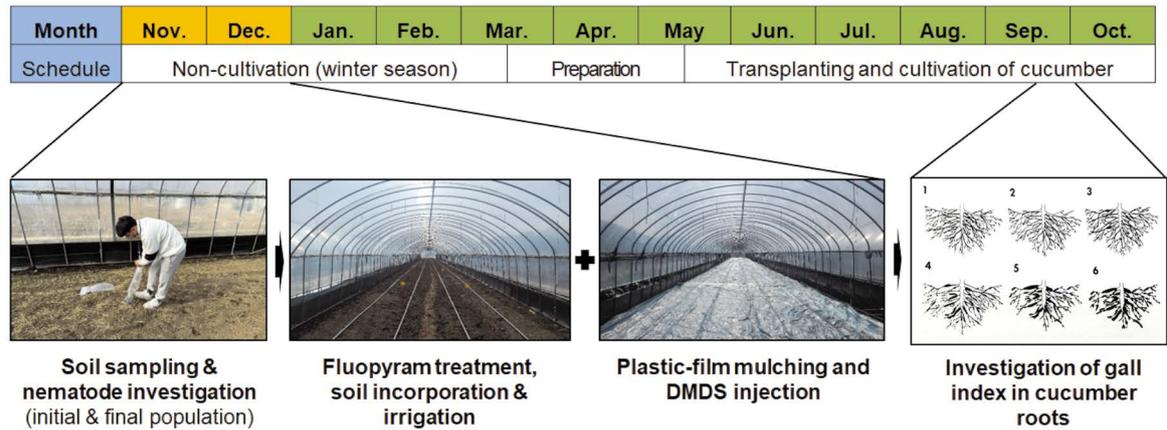


Fig. 1. A schematic diagram of a nematocidal experiment for controlling the southern root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, in cucumber fields. Root gall index values were assessed using Barker's evaluation manual (Barker *et al.* 1978).

(Dimethyl-disulfide EC, DMDS; Gyeongnong, Daegu, Korea)과 비훈증성 약제 1종(Fluopyram GR, FL; Bayer Crop Science, Leverkusen, Germany)을 이용하였다. 2023년 10월 27일, 뿌리혹선충 초기밀도 조사 결과를 참고하여 3처리(약제 2종, 무처리), 처리별 3반복으로 총 9개의 처리구(21.6 m²/구)를 구획하였다. 훈증성 약제인 DMDS 처리는 작업자의 안전성을 고려하여 비닐하우스 1동 전체에 점적 관수 시설을 이용하여 처리한 다음 처리구별로 선충 방제효과를 평가하였다. 약제 처리를 위해 바닥에 분수 호스를 설치하고 투명비닐을 피복하였다. 작물보호제지침서에 명시된 DMDS 처리 기준(1,000 m²당 약량 40 L, 살포량 10,000 L)을 참고하여 시험포장 규모(432 m²)에 해당하는 약량 17.3 L를 점적용 물통(2 ton)에 넣고 총 살포량 4,320 L를 처리하였다. 약제 처리 후 30일이 경과한 2022년 11월 26일 바닥의 투명비닐을 제거하고 비닐하우스 측창을 개방하여 가스를 제거하였다. 비훈증성 약제인 FL은 소형 비료 살포기(Hand spreader; Gardena, Ulm, Germany)를 이용하여 처리하였다. 작물보호제지침서에 명시된 FL 처리 기준(1,000 m²당 10 kg)에 따라 처리구 면적(21.6 m²)에 해당하는 216 g을 처리하였다. 처리 후 약제가 녹아 토양 속으로 잘 스며들 수 있도록 반복 시험구에 농용수를 100 L씩 각각 관주하였다. 무처리구(control)의 반복 시험구에는 농용수 100 L씩 각각 관주하였다.

처리구별 선충 초기밀도가 상이하여 살선충제 처리에 따른 뿌리혹선충 방제 효과는 뿌리혹선충 증식지수(reproduction factor, RF, Pf/Pi)를 활용하여 평가하였다(Seinhorst 1966). 처리구별 뿌리혹선충 증식지수를 구하

기 위해 약제 처리 43일이 경과한 2022년 12월 9일 각 처리구별로 토양 내 뿌리혹선충 2기 유충의 최종밀도(final population, Pf)를 조사하였다. 최종밀도 조사를 위한 토양 시료 채취 및 선충 분리는 상기 기술된 초기 감염밀도 조사 방법과 동일한 방법으로 수행하였다. 처리구별 뿌리혹선충 증식지수를 토대로 살선충제의 약효(control efficacy)를 다음의 Eq. 1을 이용하여 평가하였다.

$$\text{약효(\%)} = \frac{(\text{무처리구 증식지수} - \text{처리구 증식지수})}{\text{무처리구 증식지수}} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

살선충제 처리에 따른 고구마뿌리혹선충 방제 효과 분석 및 오이 작물체의 피해 정도 분석을 위해 오이 뿌리에 형성된 뿌리혹지수(gall index)를 평가하였다. 시험 포장에 오이는 2023년 5월 5일 유묘를 정식하였고, 뿌리혹지수 평가는 오이를 정식한 지 4개월이 경과한 2023년 9월 8일에 수행하였다. 뿌리혹지수는 Barker *et al.* (1978)의 기준을 이용하여 혹 발생 정도에 따라 1~6 사이의 지수를 부여하여 평가했다. 농가의 오이 수확 때문에 처리별 모든 포기의 뿌리를 관찰하지는 못하고 DMDS 처리구와 무처리구의 오이 3포기씩만 뿌리를 캐내어 뿌리혹지수를 평가했다. 고구마뿌리혹선충 방제를 위한 약제 처리 기간 동안의 기온은 온도계(HoBo MX-1101-01; Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA)를 이용하여 측정하였다.

2.3. 통계분석

살선충제 처리에 따른 오이 시설재배지 뿌리혹선충 방제 효과평가를 위해 R 프로그램(<https://www.r-project>).

Table 1. Efficacy of two nematicides against southern root-knot nematode 43 days after treatment

Treatment	Nematode density		Reproduction factor (Pf/Pi)	Control efficacy (%)
	Initial population (Pi)	Final population (Pf) [‡]		
Control	488.3 ± 205.02 [†]	76.7 ± 55.75	0.15 ± 0.050 a [‡]	-
Dimethyl disulfide (EC)	125.0 ± 0.00	1.7 ± 2.89	0.01 ± 0.023 b	91
Fluopyram (GR)	310.0 ± 50.74	56.7 ± 22.55	0.19 ± 0.079 a	0

[†]The results are shown as the mean and standard deviation.

[‡]The final population was investigated 43 days after treatment.

[‡]R program was used for statistical analysis, and one-way ANOVA was performed at $p < 0.05$. Different letters indicate statistical differences at the 0.05 significance level by Duncan's test.

org)을 이용하여 처리별 2기 유충의 RF 값에 대한 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였다. 사후검정은 던컨 다중검정(Duncan's multiple range test)을 수행하였다. DMDS와 무처리 간의 뿌리혹지수 유의성 검정은 *t*-test를 수행하였으며, 데이터는 평균과 표준편차로 나타났다.

3. 결 과

3.1. 살선충제 종류별 고구마뿌리혹선충 2기 유충 방제 효과

오이 시설재배지에서 문제되고 있는 고구마뿌리혹선충의 방제를 위해 살선충제 처리 40일 경과 후 2기 유충의 살선충 효과는 Table 1과 같다. 시험 기간 동안 평균기온은 7.5°C, 최고기온 22.6°C, 최저기온 -5.4°C로 나타났다. 초기밀도(initial population, Pi)와 최종밀도(final population, Pf)를 이용하여 각 처리별 뿌리혹선충 증식지수(reproduction factor, Pf/Pi)를 계산한 결과, 무처리는 0.15 ± 0.050, DMDS 처리는 0.01 ± 0.023, FL 처리는 0.19 ± 0.079로 나타났다. 증식지수 평가 기준에 따르면 Pf/Pi가 1 이하인 경우에는 선충 밀도가 감소한 것으로 평가하는데(Seinhorst 1966), 모든 처리의 선충 밀도가 감소한 것으로 나타났다. 따라서 무처리와 비교하였을 때 각 처리의 선충 밀도감소 정도를 분석하였으며, DMDS 처리 시에는 무처리 대비 선충 밀도가 91% 더 많이 감소하였으며 통계적으로도 유의미한 차이를 보였다($p = 0.020$). 반면 FL 처리 시에는 무처리와 감소 폭이 비슷한 수준으로 나타나 FL 처리에 따른 뿌리혹선충 2기 유충 밀도감소 효과가 없었고 통계적으로도 유의미한 차이를 보이지 않았다.

Table 2. Comparison of root gall index values in cucumbers in dimethyl disulfide and control groups.

Treatment	Gall index on cucumber roots
	Mean ± Stdev
Dimethyl disulfide (EC)	1.0 ± 0.00
Control	4.3 ± 0.58*

*The *t*-test showed a statistically significant difference between the two groups ($p = 0.020$).

3.2. 뿌리혹지수 평가 결과

살선충제 처리에 따른 오이의 뿌리혹지수 평가를 위해 오이를 정식한 지 4개월 경과한 2023년 9월 8일 DMDS 처리구와 무처리구의 뿌리혹 발생 정도를 관찰하였다(Table 2, Fig. 1). 무처리구의 뿌리혹지수 평가 결과 3.3 ± 0.58로 나타났으며 뿌리에 크고 작은 혹이 많이 형성되어 있었다. 반면, DMDS 처리구의 뿌리에서는 혹이 관찰되지 않았으며 뿌리혹지수는 1.0 ± 0.00으로 나타나 무처리구와 비교 시 통계적으로 유의미한 차이를 보였다($p = 0.020$). 뿌리혹지수 평가 결과에 따라 DMDS 처리구의 뿌리 생육은 무처리보다 더 좋은 것으로 나타났다.

4. 고 찰

살선충제를 이용한 뿌리혹선충의 방제 효과평가는 토양에 존재하는 2기 유충의 증식지수(Pf/Pi), 작물 뿌리에 형성된 혹지수(gall index) 또는 난낭수(egg mass) 등을 통해 평가할 수 있다(Barker *et al.* 1978; Taylor and Sasser 1978). 살선충제에 의한 뿌리혹선충 방제 효과는 상기 명

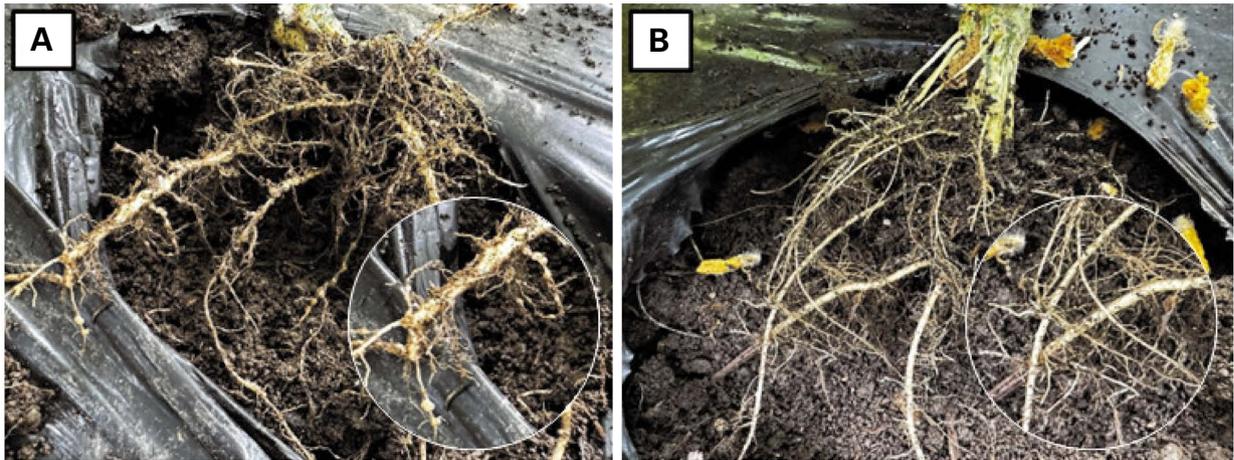


Fig. 2. Nematicidal effect of dimethyl disulfide (DMS) on southern root-knot nematode in cucumber roots. A: Control, B: DMS treatment.

시된 지표 중 1개의 지표만을 이용하여 평가하기도 하지만(Kim *et al.* 2002; Shin *et al.* 2021), 살선충제에 의한 선충의 직접적인 살선충 효과인 보정사충률(corrected % mortality)과 작물체에서의 반응인 뿌리혹지수 또는 난낭수 등 2개 평가 지표를 복합적으로 분석하여 약효를 평가하기도 한다(Gomez-Tenorio *et al.* 2018; Jang *et al.* 2015; Kim *et al.* 2015b; Oh *et al.* 2016). 본 연구에서는 살선충제 2종(DMS, FL)의 고구마뿌리혹선충에 대한 방제 효과평가를 2기 유충의 증식지수(Pf/Pi)와 오이의 뿌리혹지수를 이용하여 살선충제의 효과를 평가하였다. 그 결과, 약제를 처리하고 기주식물이 없는 상태로 43일을 경과한 다음 약효를 평가하였기 때문에 무처리를 포함한 모든 처리구의 고구마뿌리혹선충 2기 유충 밀도가 감소한 것으로 판단된다. 하지만 DMS 처리구의 밀도감소 폭은 무처리구, FL 처리구보다 더 큰 것으로 나타났다. DMS 처리구의 2기 유충의 증식지수에 대한 방제 효과는 무처리 대비 91%로 나타났으며, 오이 정식 4개월 후에도 뿌리에 혹이 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 DMS를 처리했을 때 고구마뿌리혹선충이 100% 방제되지 않는다고 판단되지만 육안으로 뿌리혹을 관찰하기 어려울 정도로 피해가 경미했을 것으로 판단된다.

DMS는 배추과에 속하는 식물이 함유하는 천연 물질로 진균, 선충 등 병해충 방제에 자주 이용되는 훈증성의 화학 약제로 잘 알려져 있다(Gilardi *et al.* 2017; Dewitte *et al.* 2019). Gomez-Tenorio *et al.* (2018)의 연구에서 뿌리혹선충이 감염된 온실에 DMS를 ha당 600 L 처리하고 PE

(polyethylene) 또는 VIF (virtually impermeable film) 비닐을 멀칭하였을 때 뿌리혹선충 2기 유충이 100% 방제되는 것으로 나타났다. 이탈리아 당근 재배지에서 고구마뿌리혹선충 방제를 위해 DMS 단독, Oxamyl과 미생물 제제를 복합으로 처리한 포장실험에서도 DMS는 무처리 대비 98.6%의 높은 방제효과를 보였다(Curto *et al.* 2014). 일반적으로 훈증성 살선충제의 방제 효과는 토양 온도와 직접적인 관련이 있으며, 약제가 주입되는 주변 토양 온도가 8~27°C의 적정 온도로 유지되어야 약제가 기화되어 선충에 방제 효과를 나타낼 수 있다(Nagamine 2010). 앞의 두 선충 연구에서는 약제 처리 시기가 토양 온도가 8°C 이상으로 유지되는 여름철이어서 100%, 98.6%의 높은 방제 효과를 나타낸 것으로 보인다. 본 연구에서는 DMS 처리 시기가 11월로 일평균 기온이 7.5°C로 낮았으나, 낮 기온은 10°C 이상으로 유지되었고 DMS 약제 처리 기간을 31일로 길게 설정하여 고구마뿌리혹선충 2기 유충 밀도를 90% 이상 감소시킬 수 있었을 것으로 판단된다. 한편, FL은 오이의 뿌리혹선충 방제용으로 등록된 약제로 작물보호제지침서에는 작물 정식 전이 사용 적기로 명시되어 있다(KCPA 2023). FL은 식물기생선충의 2기 유충에 급성 독성이 있는 약제이지만 동계기에는 약제의 확산이 저하되어 선충 방제 효과가 떨어지는 것으로 판단된다(Schleker *et al.* 2022). 동계 휴경기를 활용한 고구마뿌리혹선충 사전 관리에는 DMS 등 훈증성 약제가 효과적일 것으로 판단되므로, 겨울철 휴경기간부터 정식 4주 전까지는 DMS를 처리하고 정식 직전에는 FL을 처리하면 더 효

올직한 뿌리혹선충 방제가 가능할 것으로 생각된다.

훈증성 살선충제는 독성이 강해 토양 속에 있는 모든 생물에 해로운 영향을 미칠 수 있고 가격이 높기 때문에, 고구마뿌리혹선충 방제를 위해 매년 처리하는 것은 어려울 것으로 생각된다(Castellano-Hinojosa *et al.* 2022). 훈증성 살선충제의 적정 처리 주기를 설정하기 위해 동계 휴경기 간 처리한 DMDS의 방제 효과 지속성에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, DMDS 외에도 다조멧, 메탐소듐 등 토양 훈증성 약제도 동계 휴경기간 고구마뿌리혹선충의 방제가 가능한지 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

고구마뿌리혹선충(*Meloidogyne incognita*)은 국내 오이 재배지에서 문제되고 있는 식물기생선충으로 연간 500억 원의 경제적 피해를 일으키고 있다. 국내에서는 시설재배지 문제 고구마뿌리혹선충의 방제를 위해 화학적 살선충제를 주로 이용하고 있다. 본 연구는 겨울철 휴경기 화학적 살선충제를 이용하여 오이 시설재배지에 문제되고 있는 고구마뿌리혹선충의 사전 방제 효과를 확인하기 위해 수행하였다. 2022년 10월부터 12월, 전북 장수군 천천면 소재 오이 비닐하우스에서 훈증성 살선충제인 디메틸디설파이드(dimethyl disulfide, DMDS)와 비훈증성 살선충제인 플루오피람(fluopyram, FL)을 처리하여 고구마뿌리혹선충 방제 효과를 검정하였다. 살선충제의 방제 효과는 약제 처리 43일 경과 후 평가하였으며, 오이의 뿌리혹지수는 정식 4개월 후 평가하였다. 그 결과, DMDS는 고구마뿌리혹선충에 대한 91%의 방제 효과를 보였으나, 플루오피람은 방제 효과가 없었다. 뿌리혹지수는 무처리(4.3 ± 0.58) 대비 DMDS 처리구(1.0 ± 0.00)에서 현저히 낮았으며 통계적으로 유의미한 차이를 보였다($p=0.020$). 연구 결과에 따라 DMDS는 겨울철 휴경하는 오이 시설재배 작형의 고구마뿌리혹선충 방제에 효과적인 살선충제로 판단된다.

CRedit authorship contribution statement

HR Ko: Data curation, Visualization, Writing - Original draft preparation. **S Park:** Data curation, **N Karthi:** Data

curation. **BY Park:** Data curation, Writing - Review & editing

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflicts of interest.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by a grant (Project No. RS-2022-RD010213) from Rural Development Administration, Republic of Korea.

REFERENCES

- Aydinli G, S Mennan, Z Devran, S Sirca and G Urek. 2013. First report of the root-knot nematode *Meloidogyne ethiopica* on tomato and cucumber in Turkey. Plant Dis. 97:1262. <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-13-0019-PDN>
- Barker KR, JL Townshend, RE Michell, DC Norton, JL Ruehle, GW Bird, RA Chapman, RA Dunn, M Oostenbrink, WM Powell, IJ Thomason, KD Fisher, CJ Southards, WF Mai, GC Smart, RA Rohde, DW Dickson, RB Malek, GD Griffin, PL Taylor, WH Thames and JL Murad. 1978. Determining nematode population responses to control agents. pp.114-125. In: Methods for Evaluating Plant Fungicides, Nematicides, and Bactericides (Zehr EI, GW Bird, KD Fisher, KD Hickey, FH Lewis, RF Line and SF Rickard, eds.). American Phytopathological Society. St. Paul, Minnesota.
- Barker KR. 1985. Nematode extraction and bioassays. pp. 19-35. In: An Advanced Treatise on *Meloidogyne*. Volume II: Methodology (Barker KR, CC Carter and JN Sasser, eds.). North Carolina State University Graphics. Raleigh, North Carolina.
- Castellano-Hinojosa A, NS Boyd and SL Strauss. 2022. Impact of fumigants on non-target soil microorganisms: a review. J. Hazard. Mater. 427:128-149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128149>
- Curto G, N Sasanelli, A Myrta, C Dongiovanni and A Santori. 2014. Efficacy of dimethyl disulfide (DMDS) in the control of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* and the cyst nematode *Heterodera carotae* on carrot in field condition in Italy. Acta Hort. 1044:405-410. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1044.55>
- Dewitte K, S Landschoot, J Carrette, K Audenaert, V Derycke, J Latre, P Vermeir and G Haesaert. 2019. The potential of Bras-

- sicaceae biofumigant crops to manage *Pleiochaeta setosa* in sustainable lupin cultivation. *Biol. Control* 132:161–168. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.02.020>
- Dickerson OJ, JH Blake and SA Lewis. 2000. Nematode Guidelines for South Carolina. Clemson University Cooperative Extension Publication No. EC703. Clemson University, Clemson, South Carolina.
- Gilardi G, ML Gullino and A Garibaldi. 2017. Soil disinfection with dimethyl disulfide for management of *Fusarium wilt* on lettuce in Italy. *J. Plant Dis. Prot.* 124:361–370. <https://doi.org/10.1007/s41348-017-0071-2>
- Gomez-Tenorio MA, JC Tello, MJ Zanon and M Cara. 2018. Soil disinfection with dimethyl disulfide (DMDS) to control *Meloidogyne* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* in a tomato greenhouse. *Crop Prot.* 112:133–140. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.05.023>
- Greco N and M di Vito. 2009. Population dynamics and damage levels. pp. 246–274. In: *Root-knot Nematodes* (Perry RN, M Moens and JL Starr, eds.). Center for Agriculture and Bioscience International. Wallingford, United Kingdom.
- Ha WJ, YC Kim, H Jung and SK Park. 2014. Control of the root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) on cucumber by a liquid bio-formulation containing chitinolytic bacteria, chitin and their products. *Res. Plant Dis.* 20:112–118. <https://doi.org/10.5423/RPD.2014.20.2.112>
- Han D, D Yan, Q Wang, W Fang, X Wang, J Li, D Wang, Y Li, C Ouyang and A Cao. 2018. Effects of soil type, temperature, moisture, application dose, fertilizer, and organic amendments on chemical properties and biodegradation of dimethyl disulfide in soil. *Land Degrad. Dev.* 29:4282–4290. <https://doi.org/10.1002/ldr.3177>
- Jang JY, YH Choi, YJ Joo, H Kim, GJ Choi, KS Jang, CJ Kim, B Cha, HW Park and JC Kim. 2015. Characterization of *Streptomyces netropsis* showing a nematicidal activity against *Meloidogyne incognita*. *Res. Plant Dis.* 21:50–57. <https://doi.org/10.5423/RPD.2015.21.2.050>
- Jeong IH, B Park, SK Park, SB Lee and SW Jeon. 2018. Occurrence of thrips in greenhouse cucumber and insecticidal activity of five local western flower thrips populations. *Korean J. Environ. Biol.* 36:517–524. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2018.36.4.517>
- KCPA. 2023. Pesticide Manual. Korea Crop Protection Association. <https://www.koreacpa.org/wp-content/themes/koreacpa/books/s/s%20988.pdf>. Accessed November 5, 2023.
- Kiewnic S, G Karssen, JA Brito, M Oggenfuss and JE Frey. 2008. First report of root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii* on tomato and cucumber in Switzerland. *Plant Dis.* 92:1370. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-9-1370A>
- Kim DG. 2001. Occurrence of root-knot nematodes on fruit vegetables under greenhouse condition in Korea. *Res. Plant Dis.* 7:69–79.
- Kim DG and JH Lee. 2008. Economic threshold of *Meloidogyne incognita* for greenhouse grown cucumber in Korea. *Res. Plant Dis.* 14:117–121. <https://doi.org/10.5423/RPD.2008.14.2.117>
- Kim DG, JB Kim, JK Lee, SK Choi and JT Yoon. 2002. Effects of treatment time of cadusafos and fosthiazate for the control of *Meloidogyne arenaria* on oriental melon. *Korean J. Appl. Entomol.* 41:293–298.
- Kim HH, DH Kim, CY Yang, TJ Kang, KS Han, HW Park, YH Jung, SW Jeon, JS Song and HY Choo. 2014. Control effect of sudan grass on root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, in cucumber and lettuce greenhouse. *Res. Plant Dis.* 20:264–269. <https://doi.org/10.5423/RPD.2014.20.4.264>
- Kim HH, JB Yoon, HW Park, DH Kim, CY Yang and YH Han. 2015a. Entomopathogenic bacteria material against *Meloidogyne incognita* in summer cucumber cultivation. *Korean J. Soil Zool.* 19:28–34.
- Kim HH, YH Jung, DH Kim, TK Ha, JB Yoon, CG Park and HY Choo. 2015b. Control effects of imicyafos GR against two species of the root-knot nematodes (*Meloidogyne incognita* and *Meloidogyne hapla*). *Korean J. Pestic. Sci.* 19:101–105. <https://doi.org/10.7585/kjps.2015.19.2.101>
- Kim HK, KC Ma, MS Kim, GP Bang, JK Kim and MS Park. 2010. Environmentally-friendly control of soil nematode by crashed-rape (*Brassica napus*) seed. *Korean J. Environ. Agric.* 29:282–286. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2010.29.3.282>
- Kim JY, SS Hong, JG Lee, KY Park, HG Kim and JW Kim. 2006. Determinants of economic threshold for powdery mildew on cucumber. *Res. Plant Dis.* 12:231–234. <https://doi.org/10.5423/RPD.2006.12.3.231>
- Ko HR, EH Kim, SJ Kim and JK Lee. 2017. Incidence and identification of root-knot nematode in plastic-house fields of central area of Korea. *Res. Plant Dis.* 23:348–354. <https://doi.org/10.5423/RPD.2017.23.4.348>
- MAFRA. 2022. Agriculture, Food and Rural Affairs Statistics Yearbook. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Sejong, Korea.
- Nagamine C. 2010. Soil Fumigation. University of Hawaii. Manoa, Hawaii.
- Nyczeper AP and SH Thomas. 2009. Current and future management strategies in intensive crop production systems. pp. 412–443. In: *Root-knot Nematodes* (Perry RN, M Moens and JL Starr, eds.). Center for Agriculture and Bioscience International. Wallingford, United Kingdom.
- Oh M, JW Han, JS Choi, YH Choi, KS Jang, GJ Choi and H Kim. 2016. Nematicidal activity of *Streptomyces flavogriseus* KRA15-528 to *Meloidogyne incognita*. *Res. Plant Dis.*

- 22:227–235. <https://doi.org/10.5423/RPD.2016.22.4.227>
- Park JD, DI Kim and U Park. 1998. Occurrence and within-plant distribution of *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) and *Encarsia formosa* (Gahan) in greenhouse. Korean J. Appl. Entomol. 37:117–121.
- Park SD, SD Park, TY Kwon, BS Choi, WS Lee and YE Choi. 1995. Study on integrated control against root-knot nematode of fruit vegetables (oriental melon and cucumber) in vinyl house. Korean J. Appl. Entomol. 34:75–81.
- Park SD, TY Kwon, YS Lim, KC Jung and BS Choi. 1996. Disease survey in melon, watermelon, and cucumber with different successive cropping periods under vinylhouse conditions. Korean J. Plant Pathol. 12:428–431.
- RDA. 2018. Cucumber. Rural Development Administration. Jeonju, Korea.
- Schleker ASS, M Rist, C Matera, A Damijonaitis, U Collienne, K Matsuoka, SS Habash, K Twelker, O Gutbrod, C Saalwachter, M Windau, S Matthiesen, T Stefanovska, M Scharwey, MT Marx, S Geibel and FMW Grundler. 2022. Mode of action of fluopyram in plant-parasitic nematodes. Sci. Rep. 12:11954. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40484-z>
- Seinhorst JW. 1966. The relationships between population increase and population density in plant parasitic nematodes I. Introduction and migrator nematodes. Nematologica 12:157–169.
- Shin SY, SH Lee, HR Ko, DH Lee, HS Cho, HJ Jun, YK Kang and Y Choi. 2021. Efficacy of soil disinfection machine for fumigants to *Cylindrocarpon* and root rot disease on ginseng at Hongcheon area. J. Agri. Life Sci. 55:129–135. <https://doi.org/10.5423/RPD.2020.26.2.72>
- Taylor AL and JN Sasser JN. 1978. Biology, Identification and Control of Root-Knot Nematodes (*Meloidogyne* species). North Carolina State University Graphics. Raleigh, North Carolina.
- Wu H, CJ Wang, XW Bian, SY Zeng, KC Lin, B Wu, GA Zang and X Zhang. 2011. Nematicidal efficacy of isothiocyanates against root-knot nematode *Meloidogyne javanica* in cucumber. Crop Prot. 30:33–37. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.09.004>