

중부지방 시설재배지의 뿌리혹선충 감염현황 및 종 동정

Incidence and Identification of Root-Knot Nematode in Plastic-House Fields of Central Area of Korea

고형래¹ · 김은화¹ · 김세종² · 이재국^{1*}

¹국립농업과학원 작물보호과, ²투엠바이오

***Corresponding author**

Tel: +82-63-238-3316

Fax: +82-63-238-3838

E-mail: jk2lee@korea.kr

Hyoung Rai Ko¹, Eun Hwa Kim¹, Se Jong Kim², and Jae Kook Lee^{1*}

¹Crop Protection Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

²mbio Co., Ltd, Suwon 16229, Korea

To investigate occurrence of root-knot nematode (RKN) in plastic house of central area of Korea, 132 soil samples were collected in cucumber, water melon, tomato, red pepper and strawberry fields from 2013 to 2015. Among 132 soil samples, 65 soil samples (49%) were infested with RKN and mean density of RKN was 178 second-stage juveniles per 100 cm³ soil (min. 1 ~ max. 3,947). The frequency of RKN by regional was the highest in Chuncheon with 80%, followed by Cheonan (68%), Nonsan (36%), Buyeo (33%) and Yesan (30%). The frequency of RKN by crops was the highest in tomato with 83%, followed by cucumber (61%), strawberry (41%), red pepper (30%), watermelon (26%). To identify the species of RKN, fifteen populations were selected for representative populations. As a phylogenetic analysis of 15 populations, southern root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*), peanut root-knot nematode (*M. arenaria*) and northern root-knot nematode (*M. hapla*) were identified with 47%, 20% and 33% ratio, respectively. In crops, *M. incognita*, *M. arenaria* and *M. hapla* were detected in tomato, *M. incognita* and *M. arenaria* were detected in cucumber and watermelon, and *M. hapla* was detected in strawberry and lettuce. Thus, there should be a continuous management to major species of each crops to prevent dispersal of RKN damages.

Keywords: Central area of Korea, Identification, Occurrence, Plastic-house, Root-knot nematode

Received August 14, 2017

Revised September 25, 2017

Accepted September 29, 2017

서 론

전국 시설재배 면적은 2014년 기준 93,511 ha이며, 수도권에 가까이 있는 중부지방(강원도, 경기도, 충청남도과 충청북도)은 전국 시설재배 면적의 1/2을 차지하고 있으며(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2015), 시설재배지에서는 배추와 상추 등 엽채류, 수박, 참외, 오이, 토마토, 딸기와 고추

등 과채류, 무 등 근채류, 배와 감귤 등의 과수와 같은 다양한 작물이 재배되고 있다. 그러나 국내 시설재배지에서는 동일한 작물을 수십 년간 연작하고 있어서 토양 속에 존재하는 뿌리혹선충(*Meloidogyne* spp.), 뿌리썩이선충(*Pratylenchus* spp.) 등의 식물기생선충에 의해 큰 피해를 받고 있다(Cho 등, 2000; Kim 등, 2013). 이 중에서도 뿌리혹선충은 우리나라를 포함하여 전 세계적으로 가장 문제되고 있는 선충이며, 매년 수백억원의 경제적 피해를 일으키는 선충이다(Kim, 2001).

뿌리혹선충(*Meloidogyne* spp.)은 살아있는 식물의 뿌리에 기생하면서 생존에 필요한 영양분을 얻는 절대기생체로써, 뿌

Research in Plant Disease

pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

www.online-rpd.org

© The Korean Society of Plant Pathology

© This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리에 혹(gall)을 형성하는 특징이 있다(Moens 등, 2009). 뿌리에 형성된 혹 안쪽에는 사과모양으로 생긴 흰색 암컷(apple-shaped female) 선충이 자리하고 있으며, 한 마리의 암컷이 수백 개의 알이 들어있는 1개의 난낭(egg mass)을 혹 표면에 형성한다(Dropkin, 1980). 또한, 기주 범위가 넓어 다양한 작물에 피해를 일으키고 있으며, 국내에 기록된 기주식물만 하여도 113종으로 알려져 있다(Choi, 2000).

국내 농경지와 시설재배지에서 문제되고 있는 뿌리혹선충으로는 고구마뿌리혹선충(*Meloidogyne incognita*), 땅콩뿌리혹선충(*M. arenaria*)과 당근뿌리혹선충(*M. hapla*), 자바니카뿌리혹선충(*M. javanica*) 총 4종으로 알려져 있다(Choi, 2000). 이들의 종 동정에는 암컷의 perineal pattern, excretory pore의 위치 및 수컷의 두부 형태 등을 이용한 형태적 종 동정(Eisenback 등, 1981), 효소표현형을 이용한 생화학적 동정법 등이 이용되어 왔으나(Cho 등, 2000), 최근에는 PCR 증폭산물의 제한효소절편길 이다형성(PCR-RFLP), mitochondrial DNA와 ribosomal RNA 유전자 등의 염기서열 차이를 이용한 계통수(phylogenetic tree) 분석 등 분자생물학적 종 동정법이 많이 이용되고 있다(Han 등, 2004; Iwahori 등, 2000; Onkendi와 Moleleki, 2013; Powers와 Harris, 1993).

최근까지 천안과 논산 일부 지역을 제외하면 중부지방 대부분 시설재배지에서의 뿌리혹선충 발생 현황이 알려진 바 없다. 또한, 시설재배지에서 윤작 작물, 저항성품종 또는 선충 방제용 녹비작물을 이용하여 뿌리혹선충을 친환경적으로 방제하고자 할 때, 뿌리혹선충 종에 따라서 방제 효과가 상이하기 때문에 선충의 종 동정이 선행되어야 한다(Taylor와 Sasser, 1978). 이에 따라, 본 연구는 중부지방 5개 지역 시설재배지의 뿌리혹선충 감염 현황을 조사하고 작물별로 검출된 뿌리혹선충의 종을 동정함으로써, 뿌리혹선충의 친환경적 방제 기술 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

재료 및 방법

뿌리혹선충 감염토양 채취 및 선충 분리. 중부지방 5개 시군(춘천, 천안, 예산, 부여와 논산) 132개 시설재배지를 대상으로 2013년부터 2015년에 걸쳐 박과류(오이, 수박), 가지과(고추, 토마토), 장미과(딸기)의 과채류 작물에서 뿌리혹선충 발병 의심 포장의 토양 시료를 채취하였다. 토양시료는 직경 2 cm의 T자형 오거를 이용하여 330 m² (100평) 당 10개 지점에서 각각 채취하여 모두 혼합하였다. 채취한 토양은 10°C 저온냉장고에 보관하면서 2주 이내에 뿌리혹선충을 분리하는데 사용하였다.

토양으로부터 뿌리혹선충의 분리는 체법과 변형깔때기법

(Baermann funnel method)을 이용하였다(Barker 등, 1985). 채취한 토양시료를 골고루 잘 섞어 유기물과 굵은 자갈을 골라낸 다음, 토양 300 cm³를 정량하여 약 8 l의 물과 혼합하여 토양 현탁액을 만들었다. 토양 현탁액을 20 mesh와 400 mesh 체(sieve)에 순서대로 거른 다음 변형깔때기법으로 48시간 후에 선충을 분리하였다. 분리된 선충을 해부현미경(MZ12; Leica, Wetzlar, Germany) 50배율로 관찰하면서 뿌리혹선충 2기 유충의 밀도를 조사하였다.

뿌리혹선충 2기 유충으로부터 DNA 추출. Iwahori 등(2000)의 방법을 이용하여 뿌리혹선충 2기 유충의 genomic DNA를 추출하였다. 뿌리혹선충 2기 유충 한 마리를 slide glass 위에 올려놓고, 고온고압으로 멸균시킨 필터페이퍼 조각(약 2×2 mm²)으로 압력을 가하여 체벽을 파쇄시켰다. 체내에서 흘러나온 선충의 세포구성 성분을 필터페이퍼 조각에 묻히고, 필터페이퍼 조각을 DNA 추출액(3차 증류수 1 ml, 1 M Tris-HCl 10 μl, 10% Triton-X100 10 μl, 100 μg/ml Proteinase K 9 μl, 2 M KCl₂ 2 μl, 1 M MgCl₂ 2 μl) 10 μl가 들어있는 0.2 ml PCR tube에 넣었다. Lysis 반응을 위해 영하 20°C에서 3시간 동안 처리한 후 PCR 장치(PTC-200; MJ Research, Alameda, CA, USA)에 65°C 30분, 94°C 10분간 차례대로 반응시켜 genomic DNA를 추출하였다.

중합효소연쇄반응과 유전자 클로닝. 중부지방에서 검출된 뿌리혹선충 가운데 5개 지역의 15개체군에서 뿌리혹선충 2기 유충을 각 5마리씩 대표 집단(n=5)으로 선발하여 분자생물학적 종 동정을 수행하였다(Table 1). 종 동정에는 국내 분포하고 있는 고구마뿌리혹선충(*Meloidogyne incognita*), 땅콩뿌리혹선충(*M. arenaria*), 자바니카뿌리혹선충(*M. javanica*)과 당근뿌리혹선충(*M. hapla*)의 종 동정에 주로 이용되는 mitochondrial cytochrome c oxidase subunit II (mtCOII)에서 16S ribosomal RNA (16S rRNA) 사이의 유전자 부위를 이용하였다(Kim 등, 2014).

뿌리혹선충 2기 유충 한 마리에서 추출된 genomic DNA를 주형으로 mtCOII에서 16S rRNA 부위 유전자의 PCR을 수행하였다. 뿌리혹선충의 mtCOII에서 16S rRNA 부위 유전자의 증폭을 위해 Powers와 Harris (1993)에 의해 개발된 Forward primer C2F3 (5'-TAAATCAATCTGTTAGTGAA-3')와 Reverse primer 1108 (5'-ATAAACCAGTATTTCAAAC-3')을 이용하여 PCR을 수행하였다. PCR 증폭은 PCR premix (Ready-2x-Go with Taqplus; Nanohelix™, Daejeon, Korea) 15 μl가 담긴 0.2 ml PCR tube에 template DNA 1 μl, 10 pmol forward primer 1 μl, 10 pmol reverse primer 1 μl, Triple distilled water 12 μl를 넣어 총 30 μl의 PCR

Table 1. The nematode samples used in this study

Nematode	Code	Location	Date	Crop
<i>Meloidogyne</i> sp.	RK1	Nonsan	13th May 2015	Watermelon
	RK2	Buyeo	13th May 2015	Watermelon
	RK3	Buyeo	9th Jul. 2015	Watermelon
	RK4	Cheonan	10th Jul. 2015	Cucumber
	RK5	Chuncheon	14th Jul. 2015	Tomato
	RK6	Chuncheon	14th Jul. 2015	Tomato
	RK7	Chuncheon	14th Jul. 2015	Tomato
	RK8	Cheonan	10th Jul. 2015	Cucumber
	RK9	Chuncheon	14th Jul. 2015	Tomato
	RK10	Cheonan	13th Aug. 2015	Cucumber
	RK11	Nonsan	7th May 2015	Strawberry
	RK12	Nonsan	13th May 2015	Lettuce
	RK13	Nonsan	13th Aug. 2015	Tomato
	RK14	Chuncheon	14th Jul. 2015	Tomato
	RK15	Yesan	2th Sep. 2015	Red pepper

반응액을 만들고 PCR 장치(PTC-200; MJ Research)에 넣어 94°C에서 3분간 denaturation, 52°C에서 2분간 annealing, 68°C에서 3분간 extension 과정을 총 35회 반복하여 수행하였다. PCR 증폭산물은 전기영동장치(Mupid eXu; Advance, Tokyo, Japan)의 1% agarose gel, 1×TAE buffer (0.045 M Trisborate, 0.001 M EDTA)에서 100 V, 25 mA로 30분간 전기영동한 후 UV 장치(MLB-21; Maestrogen, Hsinchu, Taiwan)에서 증폭 여부를 확인하였고, PCR 산물은 PCR Purification Kit (NucleoSpin Gel and PCR Clean-up Purification Kit; Macherey-Nagel)를 이용하여 정제하였다.

PCR 정제산물의 클로닝(cloning)은 T-Blunt PCR cloning kit (SolGent, Daejeon, Korea)를 이용하였다. PCR 증폭산물을 T-Blunt vector에 삽입하여 42°C 항온수조에서 competent *Escherichia coli* (DH5 α ; Enzymomics, Daejeon, Korea)에 Transformation하였다. 이를 ampicillin과 kanamycin 항생제가 첨가된 lysogeny agar (LA) 배지에 도말하여 37°C에서 15시간 배양 후, plasmid extraction kit (Macherey-Nagel)를 이용하여 배양된 *E. coli*로부터 plasmid를 추출하였다.

뿌리혹선충의 mtCOII 염기서열 분석 및 계통수 작성. 플라즈미드에 삽입된 뿌리혹선충 PCR 정제산물의 DNA 염기서열은 (주)제노텍 유전체분석센터(Daejeon, Korea)에 의뢰하여 분석하였다. DNA 염기서열 분석 결과로부터 Chromas Lite (ver. 2.0), EditSeq 5.05 (DNAstar, Madison, Wisconsin, USA)와 SeqMan 5.05 (DNAstar, Madison, Wisconsin, USA) 프로그램을 이용하

여 뿌리혹선충의 mtCOII 유전자 영역의 염기서열을 분석하였다. 분석된 염기서열 데이터는 미국국립생물정보센터(National Center for Biotechnology Information, NCBI)에 등록되어 있는 뿌리혹선충 mtCOII 유전자 염기서열 데이터들과 함께 Clustal X (ver. 1.83) 프로그램의 기본값으로 정렬하였다. 유전자 염기서열을 기반의 분자생물학적 계통수 작성은 베이지안(bayesian) 트리 분석 프로그램인 Mrbayes (ver. 3.2.6)를 이용하였으며, Dendroscope (ver. 3.5.7)를 이용하여 편집하였다. 뿌리혹선충의 외집단 분류군(outgroup)은 Humphreys-Pereira 등(2014)의 연구 결과를 참고하였다.

결과 및 고찰

중부지방 시설재배지 지역별 뿌리혹선충 감염 현황. 중부지방 5개 시군(춘천, 천안, 예산, 부여와 논산) 132개의 시설재배지를 대상으로 2013년부터 2015년까지 총 3년에 걸쳐 조사한 뿌리혹선충의 감염현황은 Table 2와 같다. 중부지방 시설재배지 132개 중에서 약 65개 포장(49%)이 뿌리혹선충에 감염되어 있었으며, 평균밀도는 토양 100 cm³ 당 뿌리혹선충 2기 유충 178마리로 나타났다(최저 1-최고 3,947마리). 시군별로는 춘천과 천안이 각각 80%와 68%의 높은 뿌리혹선충 감염률을 보였으며, 논산, 부여와 예산은 각각 36%, 33%와 30%로 비슷한 감염률을 나타냈다. Park 등(2005)에 의하면 안동, 칠곡, 거창, 고령과 남원의 호남과 영남지방 딸기 시설재배지에서도 모두 뿌리혹선충이 검출되어 문제 선충으로 나타난 바 있다. 또한, Kim

Table 2. Incidence of root-knot nematodes in plastic-house fields in central area of Korea

Location	No. of fields sampled* (A)	Incidence of RKN**		Mean density of RKN*** (min.-max.)
		No. of fields detected (B)	Frequency (B/A×100, %)	
Chuncheon	20	16	80	251 (8-3,947)
Cheonan	31	21	68	161 (2-1,750)
Yesan	10	3	30	47 (9-234)
Buyeo	29	10	33	141 (2-2,187)
Nonsan	42	15	36	181 (1-1,194)
Total	132	65	49	178 (1-3,947)

*Soil samples were collected in the fields.

**RKN represents root-knot nematode.

***Density of nematodes in 100 cm³ soil.

Table 3. Incidence of root-knot nematodes in plastic-house fields of five crops

Crop	No. of fields sampled* (A)	Incidence of RKN**		Mean density of RKN*** (min.-max.)
		No. of fields RKN detected (B)	Frequency (B/A×100, %)	
Cucumber	36	22	61	161 (2-3,947)
Watermelon	34	9	26	151 (2-514)
Tomato	23	19	83	180 (8-2,763)
Red pepper	10	3	30	155 (9-234)
Strawberry	29	12	41	157 (1-303)
Total	132	65	49	177 (1-3,947)

*Soil samples were collected in the fields.

**RKN represents root-knot nematode.

***Density of nematodes in 100 cm³ soil.

등(2013)의 연구결과에서 충청 지역(공주, 논산과 부여), 전남 지역(곡성)과 경남 지역(진주)의 시설재배지에 뿌리혹선충이 87% 감염되어 있는 것으로 보고되었다. 뿐만 아니라, 2015년도에도 경남 밀양의 고추재배지에 뿌리혹선충이 56% 감염되어 있어 문제되고 있는 것으로 나타났다(Kang 등, 2015). 본 연구 결과에서도 춘천, 천안, 예산, 부여와 논산 5개 모든 지역에 뿌리혹선충이 감염되어 있는 것으로 나타났으며, 호남과 영남지방 뿐만 아니라 중부지방의 시설재배지에서도 뿌리혹선충이 문제될 수 있을 것으로 생각된다.

중부지방 시설재배지 주요 작물별 뿌리혹선충 감염 현황.

중부지방 시설재배지 주요 작물인 오이, 수박, 토마토, 고추와 딸기의 재배 토양 내 뿌리혹선충의 감염현황은 Table 3과 같다. 작물별 뿌리혹선충 감염 현황은 토마토의 뿌리혹선충 감염률이 83%로 가장 높았으며, 오이(61%), 딸기(41%), 고추(30%), 수박(26%) 순으로 나타났다. 작물별 재배토양 내 뿌리혹선충 2기 유충의 평균 감염밀도는 토양 100 cm³ 당 오이 161마리, 수박

151마리, 토마토 180마리, 고추 155마리, 딸기 157마리로 나타났다. 수박이 가장 낮았고 토마토가 가장 높았다. 이는 작물별 뿌리혹선충 감염률 정도와 동일한 경향을 보였다.

뿌리혹선충 감염율은 수박, 오이, 딸기와 고추 재배지를 대상으로 Cho 등(2000), Kim 등(2013)과 Kang 등(2015)에 의해 조사된 바 있다. 그러나, 전국적인 조사가 아닌 일부 지역의 조사 결과이고, 조사 지점, 작물의 연작연수와 후작물 재배 여부 등이 조사 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에 (Cho 등, 2000), 조사 시점보다 2015년에 뿌리혹선충이 증감되었는지 여부를 비교하는 것은 의미가 적다.

한편, Barker 등(1985)의 연구 결과에 따르면 땅콩뿌리혹선충에 대한 수박과 토마토의 경제적 피해한계 밀도는 토양 100 cm³ 당 2기 유충 2-50마리이며, 오이의 고구마뿌리혹선충 경제적 피해한계 밀도는 토양 100 cm³ 당 2기 유충 13마리, 고추의 고구마뿌리혹선충과 땅콩뿌리혹선충 경제적 피해한계 밀도는 토양 100 cm³ 당 2기 유충 20마리인 것으로 알려져 있다 (Dickerson 등, 2000). 이와 비교하였을 때, 중부지방의 각 작물

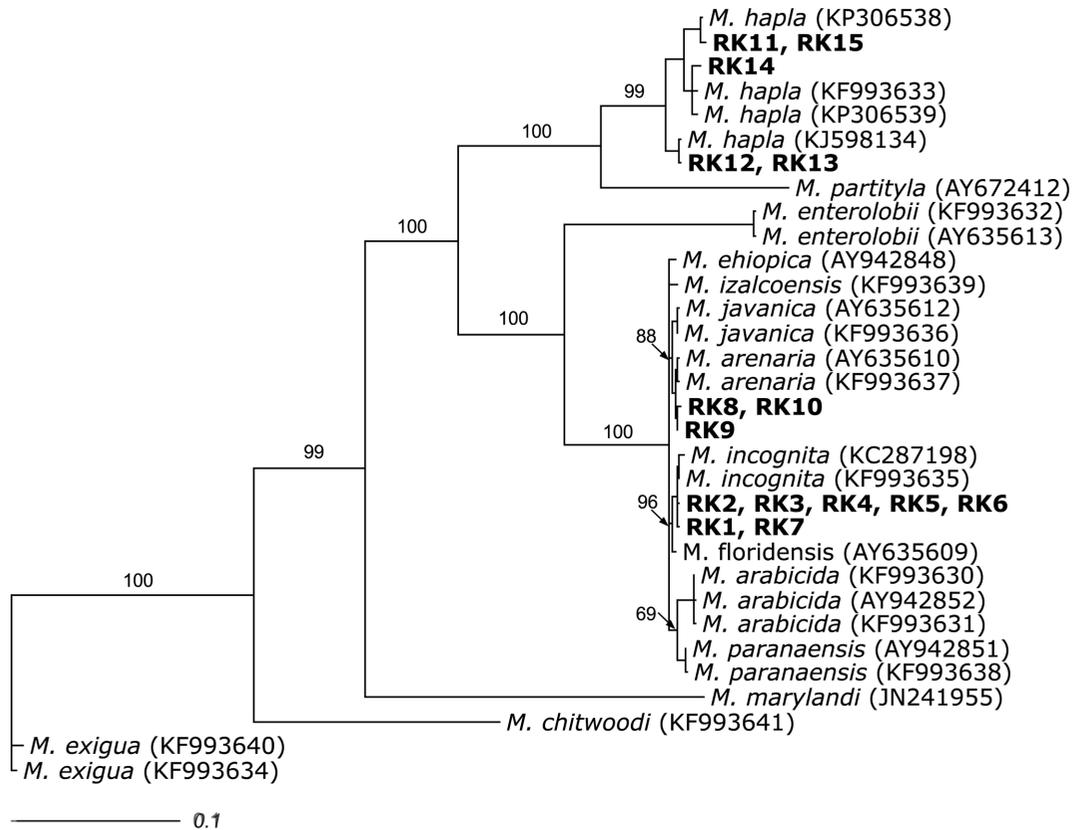


Fig. 1. The bayesian tree inferred from mitochondrial DNA between cytochrome c oxidase subunit II (mtCOII) and 16S ribosomal RNA sequences of root-knot nematodes, which detected from plastic-house fields of central area of Korea. Newly obtained sequence of RKNs indicated in bold. The number on node represents Posterior probability.

별 뿌리혹선충의 평균 감염 밀도는 경제적 피해한계 밀도보다 매우 높은 것으로 판단된다.

중부지방 시설재배지 뿌리혹선충의 분자생물학적 종 동정. 중부지방 5개 지역에서 검출된 뿌리혹선충 15개체군의 분자생물학적 종 동정 결과는 Fig. 1과 같다. 중부지방에서 검출된 뿌리혹선충 가운데 춘천, 천안, 부여와 논산 4개 지역의 7개체군(Code: RK1, RK2, RK3, RK4, RK5, RK6과 RK7)은 고구마뿌리혹선충(*M. incognita*) 분류군(clade), 춘천과 천안 2개 지역의 3개체군(Code: RK8, RK9와 RK10)은 땅콩뿌리혹선충(*M. arenaria*) 분류군, 춘천, 예산과 논산 3개 지역의 5개체군(Code: RK11, RK12, RK13, RK14와 RK15)은 당근뿌리혹선충(*M. hapla*) 분류군으로 나타났다. 뿌리혹선충 종별 우점정도는 고구마뿌리혹선충 47%, 땅콩뿌리혹선충 20%, 당근뿌리혹선충 33%로 나타났다.

정확한 종 동정을 위해 Mega (ver. 6.0) 프로그램을 이용하여 종내 변이율과 종간 변이율을 분석하였다. 고구마뿌리혹선충 분류군으로 나타난 RK1, RK2, RK3, RK4, RK5, RK6과 RK7

총 7개체군과 고구마뿌리혹선충(KC287198와 KF993635) 간의 종내 변이율은 0.3%로 나타났으며, 근연종인 *M. floridensis* (AY635609), *M. arenaria* (AY635610, KF993637)와의 종간 변이율은 각각 0.6%와 0.5%로 나타났다. 분석 결과에 따라 RK1, RK2, RK3, RK4, RK5, RK6과 RK7 총 7개체군은 고구마뿌리혹선충으로 동정되었다.

땅콩뿌리혹선충 분류군으로 나타난 RK8, RK9와 RK10 총 3개체군과 땅콩뿌리혹선충(AY635610과 KF993637) 간의 종내 변이율은 0.1%로 나타났으며, 근연종인 *M. izalcoensis* (KF993639), *M. ethiopia* (AY942848)와의 종간 변이율은 각각 0.9%, 0.7%로 나타났다. 분석 결과에 따라 RK8, RK9와 RK10 총 3개체군은 땅콩뿌리혹선충으로 동정되었다.

당근뿌리혹선충 분류군으로 나타난 RK11, RK12, RK13, RK14와 RK15 개체군과 당근뿌리혹선충(KF993633, KP306538, KP306539와 KJ598134) 간의 종내 변이율은 2.1%로 나타났으며, 근연종인 *M. partityla* (AYA672412)와의 종간 변이율은 12.2%로 나타났다. 분석 결과에 따라 RK11, RK12, RK13, RK14와 RK15 개체군은 당근뿌리혹선충으로 동정되었다.

종 동정 결과, 중부지방의 5개 지역에는 뿌리혹선충 주요 3종인 고구마뿌리혹선충, 땅콩뿌리혹선충과 당근뿌리혹선충이 모두 감염되어 있는 것으로 나타났다. 하지만, 작물의 종류에 따라 검출된 뿌리혹선충 종(species)이 다르게 나타났다. 오이와 수박에서는 고구마뿌리혹선충과 땅콩뿌리혹선충이 검출되었고, 토마토에서는 고구마뿌리혹선충, 땅콩뿌리혹선충과 당근뿌리혹선충 3종이 모두 검출되었다. 딸기와 상추에서는 당근뿌리혹선충 1종만이 검출되었다.

대다수의 오이 품종은 당근뿌리혹선충에는 저항성이라는 연구 보고가 있다(Winstead와 Sasser, 1956). 또한, 수박은 고구마뿌리혹선충, 땅콩뿌리혹선충과 자바니카뿌리혹선충이 경제적으로 중요한 선충으로 다루어지고 있으며, 당근뿌리혹선충은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다(Netscher와 Sikora, 1990; Lopez-Gomez 등, 2016). 이에 따라, 오이와 수박에서 문제시되고 있는 고구마뿌리혹선충과 땅콩뿌리혹선충 2종이 검출된 것으로 생각된다. 토마토는 뿌리혹선충 주요 3종인 당근뿌리혹선충, 고구마뿌리혹선충과 땅콩뿌리혹선충 모두 피해를 일으키는 것으로도 알려져 있고(Ogallal와 McClure, 1995), 본 연구에서도 동일하게 뿌리혹선충 3종이 모두 검출되었다. 반면, 딸기와 상추는 주로 저온기에 재배되므로 15°C에서 21°C의 비교적 저온을 선호하는 당근뿌리혹선충만 검출된 것으로 생각된다(Wong과 Mai, 1973). 한편, 딸기 시설재배지의 경우 5월부터 8월 사이 수박, 멜론 등과 같은 박과 작물이 후작물로 재배되고 있으므로 조사점수에 따라 다른 종의 뿌리혹선충이 검출될 가능성도 있을 것으로 생각된다.

본 연구 결과에 따라, 중부지방 시설재배지에서는 각 작물별로 검출된 뿌리혹선충 주요 종을 대상으로 살선충제 개발, 비기주작물 또는 저항성품종 선발과 선충 방제용 녹비작물 선발 등의 방제 연구를 수행해야 할 것으로 생각된다. 또한, 농업 현장에서는 중부지방의 시설재배 주요 작물별로 검출된 뿌리혹선충 종에 방제 효과가 있는 비기주작물, 저항성품종 또는 녹비작물 등을 선택하여 이용하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

요 약

2013년부터 2015년까지 국내 중부지방 시설재배지를 대상으로 지역별, 주요 작물별 뿌리혹선충의 감염 현황을 조사하였다. 총 132개 시설재배지 중에서 65개 포장(49%)에 뿌리혹선충이 감염되어 있었으며, 평균밀도는 토양 100 cm³ 당 뿌리혹선충 2기 유충 178마리나 나타났다(최저 1-최고 3,947마리). 시군별 감염률은 춘천이 80%로 가장 높았으며, 천안, 논산, 부여와 예산은 각각 68%, 36%, 33%와 30% 순으로 나타났다. 주요 작물

별 뿌리혹선충 감염률은 토마토가 83%로 가장 높았으며, 오이(61%), 딸기(41%), 고추(30%), 수박(26%) 순으로 나타났다. 중부지방 시설재배지에서 검출된 뿌리혹선충 대표집단 15개체군의 분자생물학적 종 동정 결과, 고구마뿌리혹선충, 땅콩뿌리혹선충과 당근뿌리혹선충 3종이 각각 47%, 20%와 33%의 비율로 나타났다. 작물별로는 토마토에서 고구마뿌리혹선충, 땅콩뿌리혹선충과 당근뿌리혹선충 총 3종, 오이와 수박은 고구마뿌리혹선충과 땅콩뿌리혹선충 총 2종, 딸기와 상추에서는 당근뿌리혹선충 총 1종이 각각 검출되었다. 따라서, 뿌리혹선충 피해 확산 방지를 위해서는 작물별로 검출된 종을 고려한 방제대책 수립이 필요하다.

Conflicts of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (Project No. 010929) from Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Barker, K. R., Carter, C. C. and Sasser, J. N. 1985. An Advanced Treatise on *Meloidogyne* Volume II: Methodology. North Carolina State University Graphics. 223 pp.
- Cho, M. R., Lee, B. C., Kim, D. S., Jeon, H. Y., Yiem, M. S. and Lee, J. O. 2000. Distribution of plant-parasitic nematodes in fruit vegetable production areas in Korea and identification of root-knot nematodes by enzyme phenotypes. *Korean J. Appl. Entomol.* 39: 123-129. (In Korean)
- Choi, Y. E. 2000. Economic Insects of Korea 20. Nematoda (Tylenchida, Aphelenchida). *Insecta Koreana Suppl.* 27. National Institute of Agricultural Science & Technology. 391 pp. (In Korean)
- Dickerson, O. J., Blake, J. H. and Lewis, S. A. 2000. Nematode Guidelines for South Carolina. Clemson Extension, Clemson, SC, USA. 36 pp.
- Dropkin, V. H. 1980. Introduction to Plant Nematology. A Wiley-Science, Canada. 293 pp.
- Eisenback, J. D., Hirschmann, H., Sasser, J. N. and Triantaphyllou, A. C. 1981. A Guide to the Four Most Common Species of Root-Knot Nematodes (*Meloidogyne* spp.), with a Pictorial Key. North Carolina State University and U.S. Agency for International Development, Raleigh, NC, USA. 111 pp.
- Han, H. R., Cho, M. R., Jeon, H. Y., Lim, C. K. and Jang, H. I. 2004. PCR-RFLP identification of three major *Meloidogyne* species in Korea.

- J. Asia Pac. Entomol.* 7: 171-175.
- Humphreys-Pereira, D. A., Flores-Chaves, L., Gomez, M., Salazar, L., Gomez-Alpizar, L. and Elling, A. A. 2014. *Meloidogyne lopezi* n. sp. (Nematoda: Meloidogynidae), a new root-knot nematode associated with coffee (*Coffea arabica* L.) in Costa Rica, its diagnosis and phylogenetic relationship with other coffee-parasitising *Meloidogyne* species. *Nematology* 16: 643-661.
- Iwahori, H., Kanzaki, N. and Futai, K. 2000. A simple, polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism-aided diagnosis method for pine wilt disease. *Forest Pathol.* 30: 157-164.
- Kang, H. I., Ko, Y. J., Park, N. S., Kim, Y. C., Kim, S. T., Kwon, S. W., Jun, T. H., Kim, D. G., Park, Y. H. and Choi, I. S. 2015. Occurrence and variation of soil nematodes at continuous plastic film house cultivation in hot pepper. *J. Agric. Life Sci.* 49: 1-6.
- Kim, D. G. 2001. Occurrence of root-knot nematodes on fruit vegetables under greenhouse conditions in Korea. *Res. Plant Dis.* 7: 69-79. (In Korean)
- Kim, S. H., Park, S. E., Ko, N. Y., Ryu, T. H., Shin, H. S., Kwon, H. R., Seo, M. J., Yu, Y. M. and Youn, Y. N. 2013. The major plant-parasitic nematodes in plastic vinyl house field. *Korean J. Agric. Sci.* 40: 101-106. (In Korean)
- Kim, S. J., Yu, Y. M. and Whang, K. S. 2014. Molecular identification of *Meloidogyne* spp. in soils from fruit and vegetable greenhouses in Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 53: 85-91. (In Korean)
- Lopez-Gomez, M., Talavera, M. and Verdejo-Lucas, S. 2016. Differential reproduction of *Meloidogyne incognita* and *M. javanica* in watermelon cultivars and cucurbit rootstocks. *Plant Pathol.* 65: 145-153.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2015. Agriculture, Food and Rural Affairs Statistics Yearbook. MAFRA, Sejong, Korea. 387 pp. (In Korean)
- Moens, M., Perry, R. N. and Starr, J. L. 2009. *Meloidogyne* species – a diverse group of novel and important plant parasites. In: Root-Knot Nematodes, eds. by N. Perry, M. Moens and J. L. Starr, pp.1-17. CAB International, Wallingford, UK.
- Netscher, C. and Sikora, R. A. 1990. Nematode parasites of vegetables. In: Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture, eds. by M. Luc, R. A. Sikora and J. Bridge, pp.237-283. CAB International, Wallingford, UK.
- Ogallo, J. L. and McClure, M. A. 1995. Induced resistance to *Meloidogyne hapla* by other *Meloidogyne* species on tomato and pyrethrum plants. *J. Nematol.* 27: 441-447.
- Onkendi, E. M. and Moleleki, L. N. 2013. Distribution and genetic diversity of root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) in potatoes from South Africa. *Plant Pathol.* 62: 1184-1192.
- Park, S. D., Khan, Z., Yeon, I. K. and Kim, Y. H. 2005. A survey for plant-parasitic nematodes associated with strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) crop in Korea. *Plant Pathol. J.* 21: 387-390.
- Powers, T. O. and Harris, T. S. 1993. A polymerase chain reaction method for identification of five major *Meloidogyne* species. *J. Nematol.* 25: 1-6.
- Taylor, A. L. and Sasser, J. N. 1978. Biology, Identification and Control of Root Knot Nematodes (*Meloidogyne* species). A cooperative publication of North Carolina State University, Dept. of Plant Pathology, and USAID, Raleigh, NC, USA. 111 pp.
- Winstead, N. N. and Sasser, J. N. 1956. Reaction of cucumber varieties to five root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.). *Plant Dis. Rep.* 40: 272-275.
- Wong, T. K. and Mai, W. F. 1973. Effect of temperature on growth, development and reproduction of *Meloidogyne hapla* in lettuce. *J. Nematol.* 5: 139-142.