

뿌리혹선충 *Meloidogyne incognita*에 대한 저항성 고추를 선발하기 위한 효율적인 검정법 확립

황성민 · 장경수 · 최용호 · 최경자*

한국화학연구원 친환경신물질연구센터

Development of an Efficient Screening Method for Resistance of Chili Pepper Plants to *Meloidogyne incognita*

Sung Min Hwang, Kyoung Soo Jang, Yong Ho Choi, and Gyung Ja Choi*

Center for Eco-friendly New Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea

*Corresponding author: kjchoi@kriict.re.kr

Abstract

Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) are major plant pathogens that cause reductions in yield and quality of several solanaceous crops, including pepper (*Capsicum* spp.). These losses can be averted through planting of resistant cultivars. Plants are defined as resistant when they suppress nematode reproduction. In this study, the resistance degrees of 102 commercial cultivars of chili pepper (*Capsicum annuum*) to a root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, were evaluated by comparing the number of egg masses on their roots to those of ‘PR huimangchan’, a highly susceptible cultivar that exhibited the most egg masses of the chili pepper cultivars evaluated. Among these cultivars, forty-four (43.1%) showed resistance to *M. incognita* and eighteen (17.6%) were moderately resistant. The other cultivars (39.3%) were determined to be susceptible. For further study, six chili pepper cultivars (i.e., Gangryeokjosenggeon, Shinsegae, Muhanjilju, PR Bulrocho, PR Huimangchan, and Jjang) with different levels of resistance to the nematode were selected. Changes in resistance of the six cultivars under several conditions, such as inoculum concentration, plant growth stage, and cultivation period after transplanting were investigated. We found that an efficient screening method for resistance of chili pepper to *M. incognita* is to transplant the chili pepper seedlings 7 days before inoculation, to inoculate 28-day-old plants with *M. incognita* by loading 5,000 eggs per plant into the pot of soil, to cultivate the plants in a greenhouse ($25 \pm 5^\circ\text{C}$) for 45-60 days, to measure the number of egg masses on roots of the seedlings, and then to determine the resistance response of the plants by comparing the number of egg masses on the roots with a reference-susceptible cultivar ‘PR huimangchan’.

Additional key words: breeding, egg mass, reproduction, resistant cultivar, root-knot nematode

Korean J. Hortic. Sci. Technol. 34(2):282-293, 2016
<http://dx.doi.org/10.12972/kjhst.20160029>

pISSN : 1226-8763
eISSN : 2465-8588

Received: June 15, 2015

Revised: August 21, 2015

Accepted: March 23, 2016

Copyright©2016 Korean Society for Horticultural Science.

본 연구는 농림축산식품부 해양수산부 농촌진흥청 산림청 Golden Seed 프로젝트 채소종자사업단(과제 번호: 213002-04-4-SBZ10, 213002-04-4-SBc10)의 지원에 의해 이루어진 것임.

서 언

고추(*Capsicum* spp.)는 가지과(Solanaceae)에 속하는 식물로 남미가 원산지로서 우리나라에 도입된 후 최근 국내 연간 생산량이 약 30만 톤에 이르는 조미 채소 중에서도 가장 많이 재배되는 대표적인 고소득 작물이다(Yoon et al., 2004; Pae et al., 2005; Kim et al., 2008). 세계적으로 고추는 32종이 알려져 있는데, 이중 5종(*C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. baccatum*, *C. pubescens*)이 재배되고 있으며 식용으로 가장 널리 재배하고 있는 종은 *C. annuum*이다(Yoon et al., 2004). 조미 채소로서 고추의 수요는 계속 증가하고 있으며 생식뿐만 아니라 색소, 의약품 등의 원료로도 널리 이용되고 있다(Bosland, 1996). 고소득 작물로 인식되어 고추의 연작재배가 점차 확대되고 있는 추세로 이에 따른 토양 내 병원균의 밀도가 증가하여 고추 재배기간 동안에 다양한 병원균에 노출이 되어 많은 피해를 입고 있는 실정이다(Hwang, 2002). 고추에 발생하는 주요 병해로는 풋마름병(*Ralstonia solanacearum*) 등의 세균병이 7종, 흰가루병(*Laveillula taurica*), 탄저병(*Colletotrichum* spp.), 역병(*Phytophthora capsici*) 등의 균류병(유사균류병 포함)이 35종, *Cucumber mosaic virus* (CMV), *Pepper mottle virus* (PepMoV) 등의 바이러스병이 16종, 뿌리혹선충병(*Meloidogyne* spp.) 등의 선충병 3종이 보고 되었다(KSPP, 2009).

고추의 뿌리혹선충병은 *Meloidogyne incognita*, *M. arenaria*, *M. hapla*에 의해 발생하는 토양병해의 하나인데, 시설재배지의 규모가 대형화 되면서 동일한 장소에서 동일한 작물의 연작 년 수가 길어지고, 연중 재배로 인하여 시설재배지 토양 내 선충의 밀도가 증가 함에 따라 경제적 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 뿌리혹선충병 피해를 감소시키기 위한 방제 방법으로는 침수 및 태양열을 이용한 물리적 방제와 주기적인 토양 개량, 답전윤환, 비주기 작물과의 윤작, 유인식물 재배 등을 이용한 경종적 방제, 살선충제를 이용한 화학적 방제, 포식성 곰팡이를 이용한 생물학적 방제, 그리고 저항성 품종 재배 등이 알려져 있다(Heald and Robinson, 1987; Kim and Han, 1988; Park et al., 1995b; Chen et al., 1996; Han and Kim, 1997). 이러한 방제 방법들 중 물리적 방제는 작물, 토양 환경, 재배 조건에 따라 방제효과가 많이 달라지고 높은 비용과 많은 시간이 필요하며, 화학적 방제는 환경 독성이 크고 토양 내의 잔류 기간이 길어 토양 생태계의 불균형을 유발하여 점차 사용이 감소하고 있다. 환경과 인체에 미치는 악 영향을 고려하여 천적을 이용한 생물적 방제, 경종적 방제, 저항성 품종 재배 등의 친환경적인 방제 방법 사용이 증가하고 있다(Boina et al., 2008).

저항성 품종이나 저항성 대목을 이용한 접목 재배는 효과가 매우 높으며, 비용이 적게 들고, 장기적인 환경친화적인 방제 방법으로 인식 되고 있다(Rhoades, 1976). 작물에서의 식물기생성 뿌리혹선충 방제와 관련하여 토마토 및 고추 품종의 뿌리혹선충 저항성 스크리닝을 통한 저항성 작물을 이용한 친환경적 방제 방법에 대한 연구(Han and Kim, 1997; Kim, 2001; Oka et al., 2004; Choi et al., 2006; Kim et al., 2012; Gisbert et al., 2013; Hwang et al., 2014)가 지속적으로 이루어지고 있지만, 강한 저항성 계통을 가진 품종 및 계통은 많지 않은 것으로 보고되어 있다(Cho et al., 1986; Park et al., 1995a). 따라서 뿌리혹선충에 대한 새로운 저항성 육종 소재의 발굴과 저항성 품종 개발이 요구되고 있으며, 이를 위해서는 대량 검정에 적합한 효율적인 고추 뿌리혹선충병 저항성 검정 방법이 필요하다.

대다수 선행 연구에서 뿌리혹선충에 대한 저항성 유전자원 및 품종 선발을 위한 저항성 검정을 포장에서 수행하거나, 한 생육 시기의 고추 유묘에 뿌리혹선충을 한 농도로 접종하여 저항성 품종을 선발하였다(Han and Kim, 1997; Kim, 2001; Oka et al., 2004; Choi et al., 2006; Kim et al., 2012; Gisbert et al., 2013; Hwang et al., 2014). 하지만 뿌리혹선충병에 대해 저항성 정도가 서로 다른 고추 품종들을 선발하여 다양한 발병 조건에 따른 이들 품종의 저항성 변화를 조사하여 효율적인 고추 뿌리혹선충병 저항성 검정 방법을 확립한 보고는 없었다.

본 연구는 고추 품종의 뿌리혹선충 *M. incognita*에 대한 새로운 저항성 육종 소재 개발과 저항성 품종 육성을 위한 효율적인 저항성 검정 방법을 확립하기 위하여 실험하였다. 시판 고추(*C. annuum*) 품종 102개를 구입하여 *M. incognita* 뿌리혹선충에 대한 저항성 정도를 조사하였고, 이들로부터 저항성 정도가 다른 6개 고추 품종('강력조생건', '신세계', '무한질주', 'PR 불로초', 'PR 희망찬', '짱')을 선발하여 접종원 농도, 고추 생육 시기 및 이식 시기 등의 발병 조건에 따른 이들의 뿌리혹선충 *M. incognita*

에 대한 저항성 차이를 조사하였다.

재료 및 방법

식물체 준비 및 생육

시판 고추 품종들의 *M. incognita* 뿌리혹선충병에 대한 저항성을 조사하기 위하여 시중으로부터 고추 품종 102개를 구입하여 실험에 사용하였다(Table 1). 그리고 다양한 조건(접종원 농도, 고추 이식 시기 및 생육 시기)에 따른 뿌리혹선충에 대한 저항성 차이를 검정하기 위해서는 ‘무한질주’(신젠타종묘), ‘짱’(문산토코리아), ‘강력조생건’(농우바이오), ‘신세계’(사카타코리아), ‘PR 불로초’(코레곤), ‘PR 희망찬’(코레곤)의 6개 품종을 사용하여 실험하였다.

고추 종자를 5 × 8 육묘용 연결포트(70 mL/pot, 범농)에 원예용상토 5호(부농)를 채워 넣고 파종하여 온실(25 ± 5°C)에서 21일 동안 재배하였다. 이 고추 유묘를 원예용상토 5호(부농)와 멸균 모래가 혼합된 혼합토양(1:1, v/v)을 채워 넣은 플라스틱 포트(직경 9.0cm, 높이 8.0cm)에 이식하고 온실에서 7일 동안 재배하여 준비한 고추 유묘를 실험에 사용하였다.

고추 품종들의 생육 시기에 따른 뿌리혹선충병 저항성 차이 실험을 위해서는 고추를 앞에서와 동일한 방법으로 파종하고 온실에서 14, 21, 28, 35일 동안 재배한 유묘를 접종 실험에 사용하였다. 이때 모든 고추 유묘들은 접종 7일 전에 앞에서와 동일한 방법으로 이식하고 온실에서 재배하였다. 그리고 고추 품종들의 이식 시기에 따른 뿌리혹선충병 저항성 차이 실험을 위해서는 접종 9일전, 7일전, 3일전 그리고 접종 직전에 이식한 식물체를 사용하였으며, 모든 처리구의 고추 유묘는 파종 후 28일 동안 재배한 식물을 실험에 사용하였다.

Table 1. Level of resistance of 102 commercial chili pepper cultivars to *Meloidogyne incognita*.

| Pepper cultivar | No. of egg mass ^z | Relative egg masses (%) ^y | Resistance response ^x |
|---------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Anjeonbelteu | 0 | 0 | R |
| Bakjangdaeso | 0 | 0 | R |
| Berodda | 0 | 0 | R |
| Buchon | 30.8 ± 6.4 | 22 | MR |
| Bugang | 29.8 ± 5.2 | 22 | MR |
| Bulmat | 65.8 ± 14.9 | 48 | S |
| Bulsechul | 24.4 ± 10.1 | 18 | MR |
| Chamjoeun | 0 | 0 | R |
| Chammani | 0 | 0 | R |
| Cheonnyeonmannyeon | 0 | 0 | R |
| Chukje | 0 | 0 | R |
| Dabotap | 0 | 0 | R |
| Daechon | 54.8 ± 8.7 | 40 | S |
| Daejangbu | 0 | 0 | R |
| Dangchan | 0 | 0 | R |
| Dokbulwang | 117.8 ± 15.6 | 85 | S |
| Dokyachungchung | 64.6 ± 7.8 | 47 | S |
| Euddeum | 41.6 ± 3.7 | 30 | S |
| Gangeon | 52.6 ± 6.9 | 38 | S |
| Gangryeokjosenggeon | 0 | 0 | R |
| Gangryeoktaeyang | 0 | 0 | R |

| Pepper cultivar | No. of egg mass ^z | Relative egg masses (%) ^y | Resistance response ^x |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Geumbit | 0 | 0 | R |
| Geumhyang | 0 | 0 | R |
| Geummedal | 55.2 ± 14.7 | 40 | S |
| Giribaksu | 41.6 ± 8.9 | 30 | S |
| Gukbo | 0 | 0 | R |
| Gungyeilhak | 53.4 ± 4.9 | 39 | S |
| Haengun | 0 | 0 | R |
| Hanbando | 0 | 0 | R |
| Hangaram | 51.0 ± 4.4 | 37 | S |
| Hanpanseung | 0 | 0 | R |
| Hanson | 0 | 0 | R |
| Hat | 25.0 ± 2.7 | 18 | MR |
| Heemangbong | 65.4 ± 3.0 | 47 | S |
| Hongboseok | 74.4 ± 10.5 | 54 | S |
| Hongiljeom | 85.4 ± 2.2 | 62 | S |
| Hongjanggunbigarim | 0 | 0 | R |
| Hongjinju | 0 | 0 | R |
| Hongmiin | 37.8 ± 6.6 | 27 | S |
| Hongsimi | 57.8 ± 2.7 | 42 | S |
| Ildeunggongsin | 0 | 0 | R |
| Ilinja | 0 | 0 | R |
| Ilsonjung | 0 | 0 | R |
| Imgeumnim | 14.8 ± 4.2 | 11 | MR |
| Jinmi | 0 | 0 | R |
| Jjang | 117.8 ± 8.1 | 85 | S |
| Johyang | 16.0 ± 2.1 | 12 | MR |
| Josaengsintap | 134.8 ± 6.5 | 98 | S |
| Katagurumai | 0 | 0 | R |
| Maekomdalkom | 0 | 0 | R |
| Manidda | 29.2 ± 3.0 | 21 | MR |
| Mansahyeongtong | 0 | 0 | R |
| Manseokgun | 0 | 0 | R |
| Matggalchan | 0 | 0 | R |
| Miting | 38.0 ± 3.6 | 28 | S |
| Momingput | 0 | 0 | R |
| Muhanjilju | 34.5 ± 9.3 | 25 | MR |
| Newwavepiman | 116.8 ± 5.1 | 85 | S |
| Obok | 17.0 ± 2.1 | 12 | MR |
| Onggolchan | 50.0 ± 13.9 | 36 | S |
| Papipedpiman | 68.4 ± 7.0 | 50 | S |
| Papiyellow | 31.4 ± 11.5 | 23 | MR |
| PR Bulmyul | 40.6 ± 7.2 | 29 | S |
| PR Bulrocho | 20.6 ± 3.9 | 15 | MR |
| PR Bultina | 80.0 ± 14.2 | 58 | S |
| PR Daechon | 72.6 ± 12.7 | 53 | S |

| Pepper cultivar | No. of egg mass ^z | Relative egg masses (%) ^y | Resistance response ^x |
|---------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| PR Daedeulbo | 0 | 0 | R |
| PR Eokmangum | 71.0 ± 1.4 | 51 | S |
| PR Eoulim | 0 | 0 | R |
| PR Galmuri | 55.6 ± 6.7 | 40 | S |
| PR Geosang | 36.2 ± 5.0 | 26 | S |
| PR Geummaek | 116.8 ± 16.6 | 85 | S |
| PR Gukgadaepyo | 120.4 ± 7.5 | 87 | S |
| PR Hongduke | 102.5 ± 10.1 | 74 | S |
| PR Huimangchan | 138.0 ± 4.5 | 100 | S |
| PR Hwanhoseong | 69.0 ± 8.2 | 50 | S |
| PR Jangwongeubje | 45.6 ± 22.4 | 33 | S |
| PR Jjon | 119.4 ± 9.8 | 87 | S |
| PR Maekom | 28.5 ± 7.0 | 21 | MR |
| PR Manitta | 0 | 0 | R |
| PR Manjangilchi | 123.4 ± 11.5 | 89 | S |
| PR Manse | 21.2 ± 3.0 | 15 | MR |
| PR Power | 0 | 0 | R |
| PR Sadaechunwang | 34.0 ± 3.2 | 25 | MR |
| PR Sanghanga | 51.5 ± 11.7 | 37 | S |
| PR Sangseang | 35.8 ± 9.4 | 26 | S |
| PR Shinnara | 0 | 0 | R |
| PM Singang | 0 | 0 | R |
| PR Ssun | 0 | 0 | R |
| PR Yeojeong | 0 | 0 | R |
| PR Yeokbalsan | 118.0 ± 8.1 | 86 | S |
| Shinjogwang | 25.2 ± 5.3 | 18 | MR |
| Shinsegae | 0 | 0 | R |
| Shintolil | 0 | 0 | R |
| Subiyeok | 31.8 ± 4.2 | 23 | MR |
| Sunguja | 16.4 ± 3.8 | 12 | MR |
| Supermanidda | 0 | 0 | R |
| Taesan | 106.0 ± 12.8 | 77 | S |
| Tantandaemok | 38.2 ± 13.6 | 28 | S |
| Wanggeon | 0 | 0 | R |
| Yeokganghongjanggun | 39.0 ± 5.3 | 28 | S |
| Yeongyangmat | 0 | 0 | R |

^zNumber of egg masses per plant. Each value represents the mean ± standard error of two runs with three replicates each.

^yRelative egg masses (%) of each cultivar compared with 'PR Huimangchan'.

^xResistance of pepper cultivars was determined based on the number of egg masses per plant compared with the number of egg masses formed on roots of 'PR Huimangchan'. R, resistant, less than 10%; MR, moderately resistant, 11 to 25%; S, susceptible, more than 26%.

토마토 뿌리혹선충의 채집, 분리 및 동정

부여 토마토 재배 포장에서 뿌리혹이 발생한 '유니콘' 토마토 품종(뿌리혹선충 저항성 유전자 *Mi*가 도입된 품종)의 뿌리로 부터 뿌리혹선충을 수집하였다. 혹이 형성된 뿌리를 흐르는 물로 잘 씻어서 뿌리 내의 뿌리혹선충의 알과 유충을 개량된 sodium hypochloride 방법을 사용하여 분리하였다. 분리 방법은 깨끗이 씻은 뿌리를 1cm 간격으로 잘게 잘라서 200mL의 1% NaOCl 용액이 들어있는 믹서기에 넣고 고속으로 1분간 회전시켰다(Kim and Lee, 2008). 그리고 믹서기 내의 뿌리 찌꺼기, 알, 유충은 75 μ m와 28 μ m 체를 통과시키고 28 μ m 체에 걸린 알을 수확하여 이들이 부화하도록 25 $^{\circ}$ C 상온에서 배양하였다. 분리한 유충 으로부터 추출한 DNA와 *M. incognita* 특이적인 프라이머 세트인 Sec 1-F(5'-GGGCAAGTAAGGATGCTCTG-3')와 Sec 1-R(5'-GCACCTCTTTCATAGCCACG-3')(Tesarova et al., 2003) 프라이머와 Mi-F(5'-GTGAGGATTCAGCTCCCCAG-3')와 Mi-R(5'-ACGAGGAACATACTTCTCCGTCC-3')(Meng et al., 2004)를 각각 혼합하여 PCR 증폭하였고 산물의 크기를 1% agarose gel에서 확인하였다(Hwang et al., 2013).

뿌리혹선충 증식

분리한 뿌리혹선충(*M. incognita*)은 고추보다 토마토에서 뿌리혹선충의 증식이 용이하므로 토마토를 사용하여 증식하였다. 뿌리혹선충에 감수성인 '서광'(문산토코리아) 품종의 토마토 종자를 원예용상토 5호(부농사)에 파종하고 온실(25 \pm 5 $^{\circ}$ C)에서 3주 동안 재배한 토마토 유묘를 원예용상토 5호(부농사)와 멸균된 모래의 비율이 1:1(v/v)인 혼합토를 넣은 플라스틱 포트(직경 10.0cm, 높이 9.0cm)로 이식하고 7일 동안 재배한 후에 뿌리혹선충을 접종하였다. 뿌리혹선충은 포기당 10,000개를 접종하였으며, 온실에서 통상적인 토마토 재배 방법에 따라 45-60일 동안 재배하여 *M. incognita*를 증식하였다.

접종원 준비

혹이 많이 형성된 기주식물의 뿌리를 수거하여 개량된 sodium hypochlorite 방법으로 뿌리혹선충 알을 분리하였다(Barker et al., 1985). 깨끗이 씻은 뿌리를 1cm 이하 간격으로 잘라서 250mL의 0.5% sodium hypochlorite 용액이 들어있는 분쇄기에 넣고 90초간 고속 회전시켰다. 그리고 혼합 용액을 65 μ m 체에 걸러 뿌리 찌꺼기와 같은 잔여물을 걸러내고 그것을 통과한 알들은 25 μ m 체에 수집하여 잔존하는 sodium hypochlorite 성분이 없어지게 수돗물로 충분히 씻어 주었다. 이렇게 수집된 뿌리혹선충 알의 농도는 해부현미경을 통해 측정하였고 접종원 농도에 따른 조건 실험을 제외한 모든 실험에서는 뿌리혹선충의 알이 mL 당 5,000개가 되도록 멸균수로 희석하여 접종원을 준비하였다. 그리고 접종원 농도에 따른 고추 품종들의 저항성 차이 실험을 위해서는 뿌리혹선충 알 농도를 mL 당 500개, 1,000개, 5,000개, 10,000개, 30,000개로 조정하여 실험에 사용하였다.

접종 및 저항성 검정

이식하여 재배한 고추 유묘에 준비한 뿌리혹선충 알현탁액을 피펫으로 포기 당 1mL씩 3cm 깊이에 접종하였으며, 접종한 유묘는 온실(25 \pm 5 $^{\circ}$ C)에서 관행으로 수분 관리를 하면서 재배하였다. 그리고 고추를 재배하는 동안 1주일 간격으로 에버그린(N-P-K, 8-4-6; 서울바이오사) 비료를 800배로 희석하여 살포하였다.

선충에서의 저항성은 뿌리혹 형성을 저해하는 것이 아니라 후세대 생산을 억제하는 것으로 정의하고 있다(Trudgill, 1991). 따라서 접종 45일 후에 고추 유묘의 뿌리를 수거해 흙을 제거하고 물로 씻은 후에 뿌리에 형성된 난낭(egg mass)의 수를 조사하였다. 뿌리혹선충병이 발생한 고추 뿌리를 erioglucine disodium 용액(15mg \cdot L $^{-1}$)에 30분간 침지하여 염색한 후 뿌리에 형성된 난낭의 수를 조사하였다(Umesh et al., 1994).

저항성 판정은 감수성 대조구인 'PR 희망찬'에 형성된 난낭수와 비교하여 난낭수가 10% 이하이면 저항성(R), 10%초과부터 25%까지는 중도저항성(MR), 25% 초과는 감수성(S)으로 판정하였다(Bridge and Page, 1980; Fassuliotis, 1985).

모든 실험은 10반복으로 2회 수행하였고, SAS(SAS Institute, Inc., 1989, Cary, NC) 프로그램을 이용하여 ANOVA 분석을 하였으며 처리 평균간 비교를 위하여 Duncan's multiple range test($p = 0.05$)를 실시하였다.

결과 및 고찰

휴뿌리혹선충의 동정

부여 토마토 재배 포장에서 채집하여 분리한 뿌리혹선충은 *M. incognita*에 특이적인 프라이머인 Sec 1-F/R과 Mi-F/R을 이용하여 증폭한 결과, 기 보고된 바와 같이 각각 500bp와 1,000bp의 *M. incognita*에 특이적인 증폭 산물을 보여 본 연구에서 용한 뿌리혹선충은 *M. incognita*로 동정되었다(Tesarova et al., 2003; Meng et al., 2004; Hwang et al., 2014).

뿌리혹선충(*M. incognita*)에 대한 102개 고추 품종의 저항성

시판 중인 고추 품종 102개를 구입하여 *M. incognita* 뿌리혹선충에 대한 이들 품종간의 저항성 정도를 뿌리에 형성된 난낭수를 통해 확인하였다(Trudgill, 1991). 파종하고 28일 동안 재배한 고추 유묘에 *M. incognita* 알을 주당 5,000개씩 접종하고 온실에서 재배하여 고추 품종들에 형성된 난낭수를 조사하고 가장 난낭수가 많이 형성된 'PR 희망찬'을 대조구로 하여 0-13.8개는 저항성(R), 13.9-34.5개는 중도저항성(MR), 34.6-138개는 감수성(S)으로 판정하였다(Table 1). 고추 시판 품종 102개 중 종자회사에서 뿌리혹선충병 저항성 품종으로 판매하고 있는 고추 품종은 없었으나, 저항성을 보이는 품종은 'PR 신나라', '일등공신', '강력조생건', '신세계' 등 44개(43.1%)이었고, 중도저항성을 보이는 품종은 '부강', 'PR 만세', '오복', '선구자' 등 18개(17.6%)였다. 그리고 나머지 40개(39.3%) 품종들은 감수성을 나타냈다(Table 1).

저항성 품종의 육성을 위한 뿌리혹선충(*M. arenaria*와 *M. incognita*)에 대한 저항성 고추 유전자원을 뿌리혹선충 이병토에 고추를 재배하여 저항성 반응을 나타내는 'Red Chile', 'Santanka', 'Nemaheart' 등의 품종을 보고하였다(Hare, 1956, 1957; Di Vito and Saccardo, 1979). 그리고 2013년 Gisbert et al.은 뿌리혹선충(*M. incognita*)이 발생한 포장에 고추 유전자원 *C. annuum* (29개), *C. chinense* (9개), *C. frutescens* (4개), *C. pubescens* (1개)의 유묘를 정식하여 저항성을 검정한 결과, 고도 저항성을 나타내는 *C. frutescens* 3종과 *C. annuum* 7종을 보고하였다.

국내에서는 뿌리혹선충(*M. hapla*)이 100g 당 400마리가 함유된 사질양토에 종자를 10립씩 파종하여 접종하고 그리고 종자 발아 3주 후에 다시 한 번 2령 유충을 관수하여 접종하고 gall index로 발병 정도를 조사하여 실험한 46개 고추 품종 중 중간 저항성 품종으로 '임실', '밀양극조생' 및 'Riogrande'를 보고하였다(Cho et al., 1986). 그리고 Han and Kim(1997)은 고추 종자를 발아시키고 이식하여 5-7일 재배한 고추묘에 뿌리혹선충(*M. incognita*)의 2령 유충을 포트 당 100마리씩을 접종하여 유전자원 및 재배 품종의 *M. hapla*에 대한 저항성을 조사한 결과, 국내 유전자원 15개와 국외 도입종 2개는 저항성이었으며, 재배 품종으로는 '부강' 등 4개 품종이 중도저항성을 보였다고 하였다. 한편 Kim et al.(2012)은 국내 시판 중인 92개 고추 품종들의 *M. arenaria*와 *M. incognita*에 대한 저항성 검정을 포장에 존재하는 뿌리혹선충 유충을 채집하여 토양 100 mL 당 300마리씩 접종하여 이병토를 만들고 이를 직경 10cm 포트에 넣고 8주 동안 재배한 고추 유묘를 이식하여 실험한 결과, 실험한 모든 품종은 *M. arenaria*에 대해 저항성을 나타내었으며 *M. incognita*에는 감수성이었다고 보고하였다.

하지만 본 연구에서는 실험한 102개 품종 중 43%에 해당하는 44개 품종이 저항성을 보였으며, 이들 중 '배로파'와 '일송정'은 Kim et al.(2012)에 의해 감수성으로 보고된 품종이었다. 이것은 우리나라에 존재하는 *M. incognita* 선충 간에 저항성에 대한 차이가 있는 즉 선충의 race 분화로 인한 결과일 수도 있으나 이는 추후에 확인이 필요하다. 한편, 44개 저항성 품종 중 뿌리에 난낭이 전혀 형성되지 않은 'PR 열정', '왕건', '안전벨트' 및 '강력태양' 등은 *M. incognita* 뿌리혹선충병에 대해 고도의 저항성을 나타내는 우수한 품종임을 알 수 있었다(Table 1).

고추에서 뿌리혹선충 저항성과 관련된 여러 우성 유전자들이 알려졌으며 그러한 저항성 유전자들은 유전자 상호작용의

속성 속에 독립적인 유전자로 기능 할 것으로 생각 되었다(Hare 1956; Djian-Caporalino et al., 1999, 2001). 뿌리혹선충 저항성과 관련되는 6개(*Me1*, *Me3*, *Me4*, *Me7*, *Mech1* 및 *Mech2*)의 유전자가 발견되었고 서로 다른 고추 품종에서 *Me* 유전자로 명명되었다. 그 중 *Me1*, *Me3* 및 *Me7* 유전자는 여러 선충들에서 다양한 저항성 반응을 나타냄(Djian-Caporalino et al., 1999)에 따라 선충 종의 넓은 범위에 대해 효과적인 저항성 반응을 보이는 것으로 밝혀졌다(Pegard et al., 2005). AFLP(Amplified Fragment Length Polymorphism) 기법을 통해서 6개의 저항성 유전자들은 고추 게놈 염색체 P9의 28cM 구간 내에 군집되는 것으로 밝혀졌다(Lefebvre et al., 2002; Djian-Caporalino et al., 2007). 또한, Hare(1957)에 의해 *Me* 저항성 유전자와는 다른 저항성 *N* 유전자가 보고 되었고, 대립형질 실험을 통해 *N*과 *Me3* 유전자는 서로 구별할 수 있는 뿌리혹선충 저항성 유전자임을 알 수 있었다(Thies and Ariss, 2009). 한편, 고추 유전체 내의 뿌리혹선충 저항성 유전자 군집에 대한 여러 연구가 이루어지고 있지만, 아직 정확한 저항성 유전자의 분석과 역할에 대해서는 보고 되어 있지 않다.

한편 발병 조건에 따른 고추 품종들의 뿌리혹선충병 저항성 차이 실험을 위하여 Table 1의 결과에 따라 저항성 2개 품종(‘강력조생건’, ‘신세계’), 중도저항성 2개 품종(‘무한질주’, ‘PR 불로초’), 감수성 2개 품종(‘PR 희망찬’, ‘짱’)을 선발하였다.

접종원 농도에 따른 뿌리혹선충병 저항성 차이

선발한 6개 고추 품종의 뿌리혹선충 접종원(알) 농도에 따른 저항성 차이를 조사하기 위하여 온실에서 28일 동안 재배한 고추 유묘에 *M. incognita*의 알을 주 당 500개, 1,000개, 5,000개, 10,000개 및 30,000개씩 접종하고 각 고추 유묘에 형성된 난낭(egg mass)의 수를 조사한 결과, 실험한 6개 고추 품종들에 형성된 난낭수는 접종원의 농도가 증가함에 따라 증가하였다(Table 2). 하지만 증가 정도는 품종에 따라 차이가 있었는데 감수성 품종인 ‘PR 희망찬’과 ‘짱’에서는 각각 181개와 248개가 증가하였으나, 저항성 품종인 ‘강력조생건’과 ‘신세계’에서는 각각 14개와 12개가 증가하였으며, 중도저항성 품종인 ‘무한질주’와 ‘PR 불로초’에서는 중간 정도인 43개가 증가하였다.

이를 각 접종원 농도별로 감수성 대조품종인 ‘PR 희망찬’과 비교하여 각 품종들의 저항성 반응을 조사해 본 결과, 주 당 500개와 1,000개의 알을 접종한 경우를 제외하면 실험한 모든 접종 농도(5,000, 10,000, 30,000개/주)에서 저항성 품종들과 중도저항성 품종들은 각각 저항성과 중도저항성 반응을 보였고, ‘PR 희망찬’ 및 ‘짱’ 품종은 감수성 반응을 나타냈다(Table 2). 하지만 주 당 500개 접종하였을 때에는 저항성과 중도저항성 품종들간에 저항성 차이가 없이 모두 저항성 이었으며, 주 당 1,000개를 접종하였을 때에는 저항성 품종은 저항성이었으나 중도저항성 품종들은 감수성 반응을 보였다.

따라서 뿌리혹선충 접종원 준비를 고려할 때 효율적인 고추의 뿌리혹선충병 저항성 검정에 적합한 접종원의 농도는 주 당 5,000개의 *M. incognita* 알을 접종하는 것이라고 생각되었다(Table 2).

Table 2. Root-knot nematode severity of six chili pepper cultivars according to inoculum concentration of *Meloidogyne incognita*.

| Pepper cultivar | Inoculum concentration (the number of eggs) | | | | |
|--------------------|--|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | 500 | 1,000 | 5,000 | 10,000 | 30,000 |
| Gangryeokjosengeon | 0.7 ± 1.2 ^a b ^C ^w | 1.5 ± 1.7 bC | 8.7 ± 9.9 ab B | 10.8 ± 15.3 ab B | 15.2 ± 17.5 aC |
| Shinsegae | 3.3 ± 3.9 bC | 1.3 ± 1.6 bC | 7.3 ± 9.1 ab B | 12.8 ± 14.2 aB | 12.3 ± 13.9 aC |
| Muhanjilju | 0 bC | 16.7 ± 5.7 bBC | 35.0 ± 7.0 aB | 40.3 ± 1.5 aB | 43.0 ± 6.3 aC |
| PR Bulrocho | 0 cC | 15.7 ± 5.7 cBC | 36.3 ± 13.3 bB | 43.0 ± 7.5 bB | 40.3 ± 12.6 aC |
| PR Huimangchan | 23.3 ± 5.3 cB | 43.0 ± 24.21bAB | 187 ± 44.0 aA | 171.7 ± 33.5 aA | 204.3 ± 54.3 aB |
| Jjang | 47.3 ± 4.5 bA | 64.7 ± 4.9 abA | 173.7 ± 25.8 aA | 195.3 ± 25.7 aA | 295.0 ± 6.3 aA |

^aNumber of egg masses/plant. Each value represents the mean ± standard deviation of two runs with three replicates each.

^bValues labeled with the same letter in each line are not significantly different in Duncan’s multiple range test at $p = 0.05$.

^wValues labeled with the same letter in each column are not significantly different in Duncan’s multiple range test at $p = 0.05$.

고추의 생육 시기 및 이식 시기에 따른 뿌리혹선충병 저항성 차이

저항성 정도가 다른 6개 고추 품종을 14, 21, 28 및 35일 동안 재배한 고추 유묘에 *M. incognita* 알을 주당 5,000개씩 접종하고 고추 품종들의 생육시기에 따른 뿌리혹선충병 저항성 차이를 조사한 결과, 감수성 품종('PR 희망찬', '짱')에 형성된 난낭수는 실험한 고추의 생육 시기와 관계없이 119–132개의 난낭이 형성되었고, 저항성 품종('강력조생진', '신세계')과 중도저항성 품종('무한질주', 'PR 불로초')도 고추 유묘의 생육 시기와 관계없이 각각 6–9개와 23–32개의 난낭이 형성되었다(Table 3).

고추의 생육 시기별로 감수성 대조품종인 'PR 희망찬'과 비교하여 나머지 5개 품종의 저항성 반응을 조사한 결과, 실험한 6개 고추 품종들은 고추 유묘의 생육 시기에 관계없이 저항성 품종은 저항성을, 중도저항성 품종은 중도저항성을 그리고 감수성 품종은 감수성을 잘 나타내었다(Table 3). 따라서 고추의 생육 시기에 따른 *M. incognita*의 뿌리혹선충병에 대한 저항성은 파종 후 2, 3, 4, 5주 등 실험한 고추 유묘의 생육 시기에 의해서 거의 영향을 받지 않는다고 생각되었다.

한편, 고추 유묘의 이식 후 접종 전까지 재배하는 시간 즉 이식 후 뿌리의 발근 정도에 따른 고추 품종들의 *M. incognita* 뿌리혹선충병에 대한 저항성 차이를 조사하기 위하여 *M. incognita*를 접종하기 0, 3, 7 및 9일 전에 고추 유묘를 이식하여 실험한 결과, 각 이식 시기에서 감수성 대조 품종인 'PR 희망찬'의 난낭수와 비교하여 나머지 5개 품종의 저항성 반응을 결정하면 이식 시기에 따라 상이한 반응을 나타냈다(Table 4). 이식 7일 및 9일 후에 접종하였을 때에는 저항성('강력조생진', '신세계'), 중도저항성('무한질주', 'PR 불로초') 및 감수성 품종('PR 희망찬', '짱')들은 감수성 대조구인 'PR 희망찬'에 형성된 난낭 수와 비교하였을 때 각각 저항성, 중도저항성 및 감수성 반응을 보였다. 하지만 접종하기 직전에 이식한 경우에는 저항성 품종들은 저항성 반응을 보였으나, 중도저항성 품종들이 모두 감수성 반응을 나타냈다. 그리고 이식 3일 후에 접종하였을 경우에는 저항성과 중도저항성 품종들이 모두 중도저항성을 보였다. 이는 이식과정에서 생긴 뿌리 상처가 저항성에 영향을 미친 결과로 생각되었다. 따라서 이식에 의한 상처는 치유되고 뿌리혹선충이 침입하기 용이한 세균이 충분히 발달한 시기인 이식 후 7–9일 재배한 고추 유묘에 뿌리혹선충을 접종하는 것이 가장 효과적인 방법으로 생각되었다.

이상의 결과들로부터 효율적인 고추의 뿌리혹선충병 저항성 검정을 위해서는 온실(25 ± 5°C)에서 원예용 상토에 파종하고 약 21일 동안 재배한 고추 유묘를 모래와 원예용 상토를 동량(v/v)으로 혼합한 토양에 이식하고 온실에서 7일 동안 재배한 후에 주 당 5,000개의 *M. incognita* 알을 접종하고 45–60일 후에 고추 뿌리에 형성된 난낭의 수를 조사하는 방법을 제안하고자 한다.

Table 3. Root-knot nematode severity of six chili pepper cultivars according to inoculation timing at different growth stages of the plant.

| Pepper cultivar | Inoculation timing at different growth stages of the plant (days after sowing) | | | |
|--------------------|--|----------------|----------------|----------------|
| | 14 ^z | 21 | 28 | 35 |
| Gangryeokjosengeon | 8.8 ± 10.4 ^y a ^x CD ^w | 8.3 ± 9.4 aC | 8.7 ± 10.4 aC | 9.0 ± 11.3 aB |
| Shinsegae | 5.5 ± 6.6 aD | 9.8 ± 12.0 aC | 8.5 ± 10.1 aC | 6.7 ± 7.9 aB |
| Muhanjilju | 25.3 ± 4.5 aBC | 25.0 ± 5.6 aB | 27.0 ± 7.0 aB | 26.3 ± 11.5 aB |
| PR Bulrocho | 27.7 ± 4.9 aB | 23.0 ± 3.6 aB | 32.3 ± 8.7 aB | 26.3 ± 6.7 aB |
| PR Huimangchan | 127.7 ± 8.3 aA | 130.3 ± 4.2 aA | 132.2 ± 7.1 aA | 127.0 ± 9.8 aA |
| Jjang | 129.3 ± 9.9 aA | 119.3 ± 5.9 aA | 130.7 ± 8.1 aA | 124.3 ± 8.6 aA |

^z14 days (2 expanded leaf stage), 21 days (4 expanded leaf stage), 28 days (6 expanded leaf stage), 35 days (8 expanded leaf stage).

^yNumber of egg masses/plant. Each value represents the mean ± standard deviation of two runs with three replicates each.

^xValues labeled with the same letter in each line are not significantly different in Duncan's multiple range test at *p* = 0.05.

^wValues labeled with the same letter in each column are not significantly different in Duncan's multiple range test at *p* = 0.05.

Table 4. Root-knot nematode severity on seedlings of six chili pepper cultivars according to cultivation period between transplant of seedlings and inoculation of *Meloidogyne incognita*.

| Pepper cultivar | Inoculation days after transplanting | | | |
|--------------------|---------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | 0 | 3 | 7 | 9 |
| Gangryeokjosengeon | 8.3 ± 9.2 ^a C ^x | 16.3 ± 18.3 aB | 8.7 ± 10.2 aB | 9.2 ± 10.8 aB |
| Shinsegae | 9.0 ± 11.4 aC | 14.8 ± 17.2 aB | 7.9 ± 9.6 aB | 12.8 ± 15.0 aB |
| Muhanjilju | 31.0 ± 9.8 aB | 29.3 ± 9.1 aB | 31 ± 7.0 aB | 27.3 ± 3.5 aB |
| PR Bulrocho | 32.0 ± 8.7 abB | 33.3 ± 7.1 abB | 34.3 ± 11.0 bB | 28.0 ± 12.1 bB |
| PR Huimangchan | 115.3 ± 6.8 aA | 137.3 ± 3.21aA | 156.5 ± 27.2 aA | 128.6 ± 14.4 aA |
| Jjang | 123.7 ± 5.5 aA | 136.7 ± 9.6 aA | 152.2 ± 17.0 aA | 139.3 ± 15.0 aA |

^xNumber of egg masses/plant. Each value represents the mean ± standard deviation of two runs with three replicates each.

^yValues labeled with the same letter in each line are not significantly different in Duncan's multiple range test at $p = 0.05$.

^wValues labeled with the same letter in each column are not significantly different in Duncan's multiple range test at $p = 0.05$.

초 록

뿌리혹선충(*Meloidogyne* spp.)은 고추(*Capsicum* spp.)를 포함한 여러 가지과 작물에서 경제적인 손실을 일으키는 주요 식물 병원균 중 하나이다. 이러한 뿌리혹선충에 의한 작물의 피해는 친환경적인 방제법인 저항성 품종의 재배로 줄일 수 있다. 선충병에서는 식물에서 선충의 후대생산이 억제되었을 때 그 식물을 저항성으로 간주한다. 시판 중인 고추(*Capsicum annuum*) 품종 102개의 뿌리혹선충(*Meloidogyne incognita*)에 대한 저항성 정도를 감수성 대조 품종인 'PR 희망찬'에 형성된 난낭의 수와 비교하여 평가하였다. 실험한 고추 품종 중 44개 품종(43.1%)은 저항성을 그리고 18개 품종(17.6%)은 중도저항성을 보였다. 그리고 나머지 40개 품종(39.3%)은 감수성을 나타냈다. 그리고 뿌리혹선충(*M. incognita*)에 의해 발생하는 고추 뿌리혹선충병에 대한 효율적인 저항성 검정법을 확립하기 위하여 실험한 품종 중 저항성 정도가 다른 6개 품종을 선발하였다. 그리고 이들 6개 고추 품종의 접종원 농도, 고추 생육 시기 및 이식 후 배양 기간 등의 발병 조건에 따른 뿌리혹선충에 대한 저항성 차이를 조사하였다. 발병 조건에 따른 품종들의 저항성 차이 결과들을 바탕으로 *M. incognita*에 대한 고추의 저항성 정도를 검정하기 위한 효율적인 방법으로 온실(25 ± 5°C)에서 21일 동안 재배한 고추 유묘를 원예용 상토와 모래의 혼합토(1:1, v/v)에 이식하고 7일 동안 재배한 고추 유묘에 뿌리혹선충 *M. incognita* 알 5,000개를 접종하고 온실에서 45-60일 동안 재배하고, 뿌리에 형성된 난낭의 수를 조사하여 감수성 대조 품종인 'PR 희망찬'에 형성된 난낭 수와 비교하여 저항성을 판정하는 방법을 제안한다.

추가주요어: 난낭, 뿌리혹선충, 육종, 저항성품종, 후대생산

Literature Cited

- Barker KR, Schmitt DP, Imbriani JL (1985) Nematode population dynamics with emphasis on determining damage potential to crops. In KR Barker, CC Carter, JN Sasser, eds, An Advanced Treatise on Meloidogyne, Vol. II. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA, pp 135-148
- Boina, ANE, Lewis EE, Bloomquist JR (2008) Nematicidal activity of anion transport blockers against *Meloidogyne incognita*, *Caenorhabditis elegans* and *Heterorhabditis bacteriophora*. Pest Manag Sci 64:646-653. doi:10.1002/ps.1591
- Bosland, PW (1996) Capsicums: Innovative uses of an ancient crop. In J Janick, ed, Progress in New Crops. ASHS Press, Arlington, VA, USA, pp 479-487
- Bridge J, Page SLJ (1980) Estimation of root-knot nematode infestation levels on roots using a rating chart. Trop Pest Manag 26:296-298. doi:10.1080/09670878009414416
- Chen ZX, Dickson DW, McSorley R, Mitchell DJ, Hewlett TE (1996) Suppression of *Meloidogyne arenaria* race 1 by soil application of

- endospores of *Pasteuria penetrans*. J Nematol 28:159-168
- Cho HJ, Han SC, Choi DR (1986) Screening peanut, pepper, cucumber, and tomato varieties for resistance to root-knot nematode, *Meloidogyne hapla*. Res Rept RDA (P M&U) 28:94-97
- Choi DR, Lee JK, Park BY, Chung MN (2006) Occurrence of root-knot nematodes in sweet potato fields and resistance screening of sweet potato cultivars. Korean J Appl Entomol 45:211-216 (In Korean)
- Di Vito M, Saccardo F (1979) Resistance of Capsicum species to *Meloidogyne incognita*. In F Lamberti, CE Taylor, eds, Root-knot Nematodes (*Meloidogyne* spp.). Systemics, Biology and Control. Academic Press, London, pp 455-456
- Djian-Caporalino C, Pijarowski L, Januel A, Lefebvre V, Daubeze A, Palloix A, Dalmaso A, Abad P (1999) Spectrum of resistance to root-knot nematodes and inheritance of heat-stable resistance in pepper (*Capsicum annuum* L.). Theor Appl Genet 99:496-502. doi:10.1007/s001220051262
- Djian-Caporalino C, Pijarowski L, Fazari A, Samson M., Gaveau L, O'Byrne C, Lefebvre V, Caranta C, Palloix A, Abad P (2001) High-resolution genetic mapping of the pepper (*Capsicum annuum* L.) resistance loci *Me3* and *Me4* conferring heat-stable resistance to root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) Theor Appl Genet 103:592-600. doi:10.1007/PL00002914
- Djian-Caporalino C, Fazari A, Arguel MJ, Vernie T, VandeC-astelee C, Faure I, Brunoud G, Pijarowski L, Palloix A, Lefebvre V, Abad P (2007) Root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) *Me* resistance genes in pepper (*Capsicum annuum* L.) are clustered on the P9 chromosome. Theor Appl Genet 114:473-486. doi:10.1007/s00122-006-0447-3
- Fassuliotis G (1985) The role of nematologist in the development of resistance cultivars. In JN Sasser, CC Cater, eds, An Advanced Treatise on *Meloidogyne*. Vol. I: Biology and Control. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA, pp 233-240
- Gisbert C, Trujillo-Moya C, Sanchez-Torres P, Sifres A, Sanchez-Castro E, Nuez F (2013) Resistance of pepper germplasm to *Meloidogyne incognita*. Ann Appl Biol 162:110-118. doi:10.1111/aab.12006
- Han SC, Kim YG (1997) Screening resistant red pepper varieties to *Meloidogyne hapla* and their resistance mechanisms. Korean J Appl Entomol 36:185-191 (In Korean)
- Hare WW (1956) Resistance to root-knot nematodes in pepper. Phytopathology 46:98-104
- Hare WW (1957) Inheritance of resistance to root-knot nematodes in pepper. Phytopathology 47:455-459
- Heald CM, Robinson AF (1987) Effects of soil solarization of *Rotylenchus reniformis* in the lower Rio Grande Valley of Texas. J Nematol 19:93-103
- Hwang BK (2002) Studies of resistance of pepper to Phytophthora blight and its control. Res Plant Dis 8:131-145 (In Korean). doi:10.5423/RPD.2002.8.3.131
- Hwang SM, Park MS, Kim J-C, Jang KS, Choi YH, Choi GJ (2014) Occurrence of *Meloidogyne incognita* infecting tomato *Mi* cultivars and development of an efficient screening method for resistant tomato to the *Mi*-virulent nematode. Korean J Hort Sci Technol 32:217-226 (In Korean)
- Kim DG (2001) Occurrence of root-knot nematodes on fruit vegetables under greenhouse conditions in Korea. Res Plant Dis 7:69-79 (In Korean)
- Kim DG, Lee JH (2008) Economic threshold of *Meloidogyne incognita* for greenhouse grown cucumber in Korea. Res Plant Dis 14:117-121 (In Korean). doi:10.5423/RPD.2008.14.2.117
- Kim DG, Kwon TY, Ryu YH, Yeon IK, Huh CS (2012) Resistance of commercial pepper cultivars to root-knot nematodes. Res Plant Dis 18:370-375 (In Korean). doi:10.5423/RPD.2012.18.1.029
- Kim JI, Han SC (1988) Effect of solarization for control of root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) in vinyl house. Korean J Appl Entomol 27:1-5 (In Korean)
- Kim S, Kim KT, Chae Y, Jamal A, Oh DG (2008) A survey of genes differently expressed in response to *Colletotrichum* infection on chili pepper fruit. Korean J Hort Sci Technol 26:1-8 (In Korean)
- Lefebvre V, Pflieger S, Thabuis A, Caranta C, Blattes A, Chauvet JC, Daubeze AM, Palloix A (2002) Towards the saturation of the pepper linkage map by alignment of three intraspecific maps including known-function genes. Genome 45:839-854. doi:10.1139/g02-053
- Meng QP, Long H, Xu JH (2004) PCR assays for rapid and sensitive identification of three major root-knot nematodes, *Meloidogyne incognita*, *Meloidogyne javanica* and *Meloidogyne arenaria*. Acta Phytopathol Sinica 34:204-210
- Oka Y, Offenbach R, Pivonia, S (2004) Pepper rootstock graft compatibility and response to *Meloidogyne javanica* and *M. incognita*. J Nematol 36:137-141
- Pae DH, Chae Y, Wang TC, Engle LM, Shanmugasundaram S (2005) Selection of new breeding materials with resistance to anthracnose in *Capsicum annuum*. J Kor Soc Hort Sci 46:10-12 (In Korean)
- Park SD, Kwon TY, Choi BS, Lee WS, Choi YE (1995a) Studies on integrated control against root-knot nematode of fruit vegetable (oriental melon and cucumber) in vinyl house. Korean J Appl Entomol 34:75-81 (In Korean)
- Park SD, Kwon TY, Jun HS, Choi BS (1995b) The occurrence and severity of damage by root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in controlled fruit vegetable field. RDA J Agric Sci 37:318-323 (In Korean)
- Pegard A, Brizzard G, Fazari A, Soucaze O, Abad P, Djian-Caporalino C (2005) Histological characterization of resistance to different root-knot nematode species related to phenolics accumulation in *Capsicum annuum* L. Phytopathology 95:158-165. doi:10.1094/PHYTO-95-0158
- Rhoades HL (1976) Effects of *Indigofera hirsuta* on *Belonolaimus longicaudatus*, *Meloidogyne incognita*, and *M. javanica* and subsequent crop yield. Plant Dis Rep 60:384-386
- Tesarova B, Zouhar M, Rysanek P (2003) Development of PCR for specific determination of root-knot nematode *Meloidogyne*

incognita. Plant Prot Sci 39:23-28

- The Korean Society of Plant Pathology (KSPP)** (2009) Chili pepper. In W-G Kim, HM Koo, eds, List of Plant Disease in Korea. Ed 5, KSPP, Suwon, Korea, pp 73-80
- Thies JA, Ariss J** (2009) Comparison between the *N* and *Me3* genes conferring resistance to the root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in genetically different pepper lines (*Capsicum annum*). Eur J Plant Pathol 125:545-550. doi:10.1007/s10658-009-9502-7
- Trudgill DL** (1991) Resistance to and tolerance of plant parasitic nematodes in plants. Annu Rev Phytopathol 29:167-193. doi:10.1146/annurev.py.29.090191.001123
- Umesh KC, Ferris H, Bayer DE** (1994) Competition between the plant-parasitic nematodes *Pratylenchus neglectus* and *Meloidogyne chitwoodi*. J Nematol 26:286-295
- Yoon JB, Do JW, Yang DC, Park HG** (2004) Interspecific cross compatibility among five domesticated species of *Capsicum* genus. J Kor Soc Hort Sci 45:324-329 (In Korean)