

뿌리혹병 및 시들음병에 대한 저항성 양배추와 브로콜리 유전자원 탐색

Evaluation of Cabbage- and Broccoli-genetic Resources for Resistance to Clubroot and Fusarium Wilt

이지현¹ · 조은주¹ · 장경수¹ · 최용호¹ · 김진철² · 최경자^{1*}

¹한국화학연구원 바이오화학연구센터, ²전남대학교 응용생물공학부

Ji Hyun Lee¹, Eun Ju Jo¹, Kyoung Soo Jang¹, Yong Ho Choi¹, Jin-Cheol Kim² and Gyung Ja Choi^{1*}

***Corresponding author**

Tel : +82-42-860-7434
Fax: +82-42-861-4913
E-mail: kjchoi@kricr.re.kr

¹Research Center for Biobased Chemistry, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea

²Division of Applied Bioscience and Biotechnology, Institute of Environmentally-Friendly Agriculture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

Clubroot and Fusarium wilt of cole crops (*Brassica oleracea* L.) are destructive diseases which for many years has brought a decline in quality and large losses in yields all over the world. The breeding of resistant cultivars is an effective approach to reduce the use of chemical fungicides and minimize crop losses. This study was conducted to evaluate the resistance of 60 cabbage (*B. oleracea* var. *capitata*) and 6 broccoli (*B. oleracea* var. *italica*) lines provided by The RDA-Genebank Information Center to clubroot and Fusarium wilt. To investigate resistance to clubroot, seedlings of the genetic resources were inoculated with *Plasmodiophora brassicae* by drenching the roots with a mixed spore suspension (1 : 1) of two isolates. Of the tested genetic resources, four cabbage lines were moderately resistant and 'K166220' represented the highest resistance to *P. brassicae*. The others were susceptible to clubroot. On the other hand, to select resistant plants to Fusarium wilt, the genetic resources were inoculated with *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* by dipping the roots in spore suspension of the fungus. Among them, 17 cabbage and 5 broccoli lines were resistant, 16 cabbage lines were moderately resistant, and the others were susceptible to Fusarium wilt. Especially, three cabbage ('IT227115', 'K161791', 'K173350') and two broccoli ('IT227100', 'IT227099') lines were highly resistant to the fungus. We suggest that the resistant genetic resources can be used as a basic material for resistant *B. oleracea* breeding system against clubroot and Fusarium wilt.

Keywords : Breeding, Crucifer, Disease resistance, *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*, *Plasmodiophora brassicae*

Received October 21, 2014
Revised December 1, 2014
Accepted December 5, 2014

서 론

현대 식생활에서 중요한 작물인 Brassica 채소는 전 세계적으로

로 많은 양이 소비되고 있다(Cartea 등, 2008). 이들 중 *Brassica oleracea*는 양배추(*B. oleracea* L. var. *capitata*), 브로콜리(*B. oleracea* L. var. *italica*), 컬리플라워(*B. oleracea* L. var. *botrytis*) 등의 경제적으로 매우 중요한 여러 작물을 포함한다(Jo 등, 2012). 국내에서도 양배추는 건강에 대한 관심과 외식 수요 증가로 인하여 그 소비량이 많아지는 추세이다. 브로콜리 또한 웰빙의 붐을 타서 소비가 급격히 증가하여 중요한 채소가 되

Research in Plant Disease

©The Korean Society of Plant Pathology
pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

었다.

양배추에 발생하는 병해로 국내에서는 뿌리혹병(*clubroot*), 시들음병(*Fusarium wilt*) 및 검은썩음병(*black rot*) 등 14종이 보고되었다(KSPP, 2009). 이들 중 뿌리혹병과 시들음병은 양배추 뿐 아니라 다양한 배추과 작물에 전 세계적으로 발생하여 막대한 피해를 일으키고 있는 매우 중요한 병해이다.

토양전염성 활물 기생체인 *Plasmodiophora brassicae* Woron. 에 의해 발생하는 뿌리혹병은 Brassica 작물인 배추, 양배추, 꽃양배추, 브로콜리, 무 등에 발생한다(Kim 등, 2003; Yoon 등, 2010; Zhang 등, 2005). *P. brassicae* 병원균에 의해 감염된 식물은 잔뿌리가 없어지고 뿌리의 이상증식으로 주근에 흑이 생성되므로 양분과 수분의 공급이 억제되어 생육이 저해되고 시드는 증상을 반복하다가 결국 고사한다(Arie 등, 1998; Jo 등, 2012; Kim 등, 2003). 뿌리혹병의 방제 방법으로는 합성 살균제를 이용한 화학적 방제와 비기주 작물과의 윤작, pH 조절, 그리고 청결한 환경관리 등의 재배적 방법이 있다. 하지만 병원균이 토양 속에서 휴면포자로 오랜 기간 생존이 가능하고 배추과에 속하는 많은 식물에 병원성을 가지므로 이 병을 방제하기 어려운 실정이다(Dobson 등, 1983; Niwa 등, 2008; Voorrips, 1995). 따라서 농약을 사용하지 않고 친환경적으로 재배가 가능한 저항성 품종에 대한 요구가 증가하고 있다.

무를 제외한 배추과 작물의 시들음병은 *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*에 의해 발생하며, 병원균이 물관에서 증식하여 기능을 저해시키므로 잎이 황화되고 심하게 감염되면 시들고 물관이 변색되어 말라죽게 하는 병이다(Moon 등, 2001; Peterson과 Pound, 1960). 특히, 양배추의 연작지에서 큰 피해를 주고 있으며, 양배추의 품질과 생산량을 크게 떨어뜨리고 있다(Lv 등, 2013; Moon 등, 2001). 시들음병균은 토양에서 수년에서 수십 년까지 생존이 가능한 전형적인 토양전염성 병원균으로, 방제를 위한 적용 살균제가 없고 훈증제와 같은 무차별적 토양 살균제를 이용하여 방제하고 있으나, 훈증제인 메칠 브로마이드의 사용 금지 그리고 환경 오염 문제 등으로 인하여 방제에 어려움을 겪고 있다. 따라서 시들음병도 저항성 품종을 재배하는 것이 가장 효과적인 방제 방법이라 보고되고 있다(Arden, 1979; Farnham 등, 2001; Keinath 등, 1998).

뿌리혹병과 시들음병과 같은 토양 전염성 병원균의 방제를 위해 저항성 품종을 재배하는 것이 가장 효과적이라는 것은 분명하다. 하지만 뿌리혹병 저항성 양배추 품종은 일본에서 몇 개가 개발된 바 있지만 매우 드물며(Baggett와 Kean, 1985), 2개 이상의 유전자가 관여하는 양적 저항성으로 알려진 뿌리혹병 저항성 양배추의 저항성 유전자에 대한 정보 또한 아직 부족하여 저항성 품종의 개발은 계속 지연되고 있는 실정이다(Hirai, 2006). 따라서 강한 뿌리혹병 저항성을 나타내는 새로운 유전자원의 발굴이 필요하다.

Fusarium 시들음병에 대한 양배추 저항성은 단인자 우성 유전을 하는 A type과 다인자의 영향을 받는 B type 저항성이 알

려져 있다(Blank, 1937). B type 저항성은 25°C 이상에서는 저항성 발현이 되지 않는 저항성으로 실용성이 없어 A type 저항성 양배추 품종이 일반적으로 국내외에서 개발되어 사용되고 있으나(Walker, 1930; 1959; Ramirez-Villupadua 등, 1985), 미국에서 A type 저항성 품종을 침해하는 시들음병균이 나타났다(Bosland와 Williams, 1984; Ramirez-Villupadua 등, 1985). 따라서 새로운 저항성 유전자원을 탐색하는 것이 반드시 필요하다.

본 연구는 양배추와 브로콜리의 뿌리혹병과 시들음병 저항성 품종 육성을 위한 유전자원을 발굴하기 위하여 2012년과 2013년에 농촌진흥청 농업유전자원정보센터로부터 분양 받은 양배추 유전자원 60개와 브로콜리 유전자원 6개에 대한 저항성을 검정하였다.

재료 및 방법

식물체 재배. 뿌리혹병과 시들음병에 대한 저항성 유전자원을 탐색하고자 농촌진흥청 국립농업과학원 농업유전자원정보센터(RDA-Genebank Information Center)로부터 2012년에 브로콜리 유전자원 6개와 양배추 유전자원 8개를, 그리고 2013년에 양배추 유전자원 52개를 분양 받았다. 이들의 뿌리혹병에 대한 저항성을 검정하기 위하여, 5 × 8 육묘용 연결 포트(80 ml/pot, 범농사)에 원예용상토 5호(부농사)를 넣고 각 유전자원의 종자를 10포트씩 그리고 포트 당 2립씩 파종하고 온실(25 ± 5°C)에서 재배하였다. 종자가 발아한 후 생장이 고른 개체로 포트 당 1주씩 남기고 솟아 주었으며, 파종 후 14일 동안 재배한 유묘를 실험에 사용하였다. 모든 실험에는 양배추와 브로콜리 각각의 감수성 대조 품종으로 ‘오조라’(사카타코리아)와 ‘베리돔’(한국다끼이)을 그리고 양배추 저항성 대조 품종으로는 ‘Badger Shipper’와 ‘Jersey Queen’을 사용하여 함께 실험하였다(Jo 등, 2012).

시들음병에 대한 저항성 검정을 위해서는 원예용상토 5호(부농사)를 넣은 8 × 16 연결 포트(20 ml/pot, 범농사)에 종자를 포트 당 1립씩 파종하고 온실(25 ± 5°C)에서 14일간 재배한 유묘를 실험에 사용하였다. 유전자원 당 15포트를 파종하여 그 중 생장이 고른 10개체를 실험에 사용하였다. 시들음병 저항성 검정에는 저항성과 감수성 대조 품종으로 각각 ‘YR 호남’(아시아종묘)과 ‘레드마트’(아시아종묘) 양배추 품종을 실험에 사용하였다(Baik 등, 2011).

뿌리혹병 접종원 준비 및 접종. 강원도 강릉시 왕산면 대기리에 위치한 배추 포장에서 채집한 뿌리혹병 이병조직 1g을 취해 휴면포자를 수확한 후에 온실에서 재배한 본엽 2엽기 배추(‘노랑김장’, 몬산토코리아사)에 접종하고 20°C 항온항습실에서 1주일 동안 재배하였다. 이를 뿌리혹병이 발생한 적이 없는 한국화학연구원 포장에 정식하고 60일 동안 통상적인 방법으로 관리하면서 재배한 후에 뿌리(이병조직)를 수확하였다. 이

뿌리혹병균을 GN 균주(race 9)로 명명하였다(Jo 등, 2010). 그리고 강원도 평창군 안흥면 상안리의 배추 포장에서 채집한 뿌리혹병 이병조직 1 g에서 휴면포자를 수확하고 2엽기의 배추 유묘('노랑김장', 몬산토코리아사)에 접종하였다. 접종한 유묘는 20°C 향온항습실에서 1주일 동안 배양한 후에 큰 포트에 이식하고 온실(20 ± 5°C)에서 60일 동안 재배한 후에 배추 뿌리를 수확하였다. 그리고 이를 PC 균주(race 9)로 명명하였다(Jo 등, 2011). 수확한 두 균주의 이병조직은 -80°C deep freezer에 보관하면서 실험에 사용하였다.

뿌리혹병균 접종을 위해서는 보관 중인 GN과 PC 균주를 꺼내어 흐르는 수돗물에 수 차례 세척하여 이물질을 제거하고 각각의 균주를 동량씩 혼합하여 Waring blender에 넣고 멸균수를 첨가한 후에 마쇄하였다. 이를 2겹의 거즈로 걸러 식물조직을 제거한 포자현탁액을 광학현미경 하(300배)에서 hemocytometer를 이용하여 포자농도를 측정하였다. 2012년에 분양 받은 유전자원은 온실에서 재배한 유묘에 1.7×10^8 spores/ml 농도의 포자현탁액을 포트 당 5 ml씩 관주하여 접종하였다. 그리고 2013년에 분양 받은 유전자원들은 3.2×10^8 spores/ml 농도의 포자현탁액을 사용하여 동일한 방법으로 접종하였다.

시들음병 접종원 준비 및 접종. 강릉원주대학교로부터 분양받은 *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans* KR3 균주(race 1)를 potato dextrose agar(Becton, Dickinson and Co.) 배지에 접종하고 25°C에서 7일 동안 배양하였다(Baik 등, 2011). 그리고 형성된 균총으로부터 균사조각을 떼어 malt extract broth(Becton, Dickinson and Co.) 배지에 접종하고 25°C 암상태에서 7일 동안 150 rpm으로 진탕배양 하였다. 배양한 KR3 균주를 4겹 거즈로 걸러 균사를 제거하고 8,000 rpm에서 10분간 원심분리(4,300 g, 10분, 4°C, Beckman Coulter Inc.)를 하여 상등액을 제거하고 침전된 포자를 수확하였다. 수확한 포자는 멸균수로 희석하고 광학현미경 하에서 hemocytometer로 측정하고 물로 희석하여 접종원의 포자 농도를 1.0×10^7 spores/ml로 조정하였다. 온실에서 재배한 유묘의 뿌리를 수돗물로 세척하여 흙을 제거하고 준비된 포자현탁액에 30분 동안 침지하여 접종한 후에 5 × 8 육묘용 연결 포트(68 ml/pot, 범농사)에 원예용상토 5호(부농사)를 넣고 접종한 유묘를 이식하여 시들음병균을 접종하였다.

발병 및 병조사. 뿌리혹병균을 접종한 유묘는 20°C 향온항습실에서 하루에 14시간씩 광을 조사하면서 1주일 동안 배양한 후에 온실(20 ± 5°C)로 옮겨 재배하였다. 접종 6주일 후에 뿌리를 수확하여 뿌리혹의 발생 정도(disease severity)에 따라 발병도(disease index)를 조사하였다. 뿌리혹병의 병조사 기준은 0 = 뿌리혹병 발생이 없음, 1 = 측근에 작은 혹이 착생되어 서로 독립하여 존재, 2 = 측근에 비교적 큰 혹이 착생됨, 3 = 주근에 큰 혹이 착생되어 서로 접합됨, 4 = 주근에 매우 큰 혹이 착생됨

등의 5단계로 하였다(Kuginuki 등, 1999; Suwabe 등, 2003). 그리고 평균 발병도가 1.0 이하인 경우에는 저항성, 1.1–2.0은 중도저항성, 2.1 이상은 감수성으로 판정하였다.

시들음병균을 접종한 유묘는 25°C 습실상에서 24시간 동안 배양한 후에 25°C 향온항습실로 이동하여 하루에 12시간씩 광을 처리하며 재배하였다. 접종 3주일 후에 물관의 갈변 유무와 식물체의 생육 정도에 따른 발병도(disease index)를 조사하였다(Baik 등, 2011). 시들음병의 병조사 기준은 0 = 건전, 1 = 물관은 갈변되었으나 생육은 억제되지 않은 것, 2 = 물관이 갈변되고 생육이 약간 억제된 것, 3 = 물관이 갈변되고 생육이 억제되며 약간 황화된 것, 4 = 물관이 갈변되고 생육이 심하게 억제되며 황화된 것, 5 = 고사 등의 6단계로 하였다. 시들음병의 평균 발병도가 1.0 이하인 경우에는 저항성, 1.1–2.5는 중도저항성, 2.6 이상은 감수성으로 판정하였다. 모든 실험은 10반복으로 2회 실시하였다.

결과 및 고찰

뿌리혹병 저항성 유전자원 발굴. 2012년에 농업유전자원 정보센터로부터 분양 받은 브로콜리 유전자원 6개와 양배추 유전자원 8개의 뿌리혹병에 대한 저항성을 검정한 결과, 양배추 유전자원 'IT227118'와 'IT227113'는 중도저항성을 나타내었으며 나머지 유전자원들은 감수성이었다(Table 1). 그리고 2013년에 분양 받은 양배추 유전자원 52개에 대하여 뿌리혹병 저항성을 실험한 결과, 'IT223342'와 'K166220' 두 유전자원은 각각 2.0과 1.2의 발병도를 보여 중도저항성이었으며, 나머지 유전자원은 모두 감수성이었다(Table 2, Fig. 1). 따라서 2012와 2013년에 실험한 양배추와 브로콜리 유전자원 중 뿌리혹병에 대하여 저항성을 보이는 유전자원은 없었다.

배추의 뿌리혹병 저항성은 단인자 우성 유전을 한다고 알려진 것과 달리(James와 Williams, 1980; Kuginuki 등, 1999; Yoshikawa, 1993), *B. oleracea*의 뿌리혹병 저항성의 경우에는 아직도 다양한 의견이 존재한다. 그 중 하나는 양배추 저항성이 열성 유전자에 의해 나타난다는 것이고(Crute 등, 1980; Hansen, 1989; Voorrips와 Visser, 1993), 또 하나는 다수의 우성 유전자가 저항성을 조절한다는 연구 결과도 있다(Laurence와 Thomas, 1993). 그리고 고전적인 유전 분석 및 분자마커 분석에서 뿌리혹병에 대한 몇몇의 *B. oleracea* 저항성은 단인자가 아닌 다인자 유전을 한다고 알려져 있다(Figdore 등, 1993; Grandclement와 Thomas, 1996; Landry 등, 1992; Moriguchi 등, 1999; Nomura 등, 2005; Rocherieux 등, 2004; Voorrips 등, 1997).

따라서 저항성 유전자의 복잡한 유전 형질과 저항성 유전자원의 부족으로 인하여 양배추의 뿌리혹병에 대한 저항성 품종 육종은 큰 어려움을 겪고 있으며 저항성 품종의 개발이 계속 지연되고 있다(Voorrips, 1995). 국내에서도 저항성 양배추 품종

Table 1. Resistance degree of six broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) and eight cabbage (*B. oleracea* var. *capitata*) lines to *Plasmodiophora brassicae* in 2012^a

Accession ID ^b	Scientific name	Disease index ^c	Response ^d
IT 238544	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	4.0 ± 0.0	S
IT 238543	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	3.8 ± 0.4	S
IT 238542	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	4.0 ± 0.0	S
IT 227101	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	3.7 ± 0.5	S
IT 227100	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	4.0 ± 0.0	S
IT 227099	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	4.0 ± 0.0	S
IT 227118	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.7 ± 0.7	MR
IT 227117	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT 227116	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.7 ± 0.5	S
IT 227115	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.6 ± 0.5	S
IT 227114	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.1 ± 0.7	S
IT 227113	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.7 ± 0.8	MR
IT 227112	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.4 ± 0.8	S
IT 227111	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.7 ± 0.5	S
Verydom	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	4.0 ± 0.0	S
Ohjora	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.9 ± 0.3	S
Jersey Queen	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.8 ± 0.8	R
Badger Shipper	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.2 ± 0.4	R

^aFourteen-day-old seedlings were inoculated with *P. brassicae* by drenching the roots with a mixed spore suspension (1 : 1) of two isolates (race 9) to give inoculum density of 8.5×10^8 spores/pot. The plants were incubated in a growth chamber at 20°C for 7 days with 14 h light a day and then transferred to a greenhouse (20 ± 5°C). Six weeks after inoculation, disease severity of the plants was investigated on a scale of 0–4.

^bThe broccoli and cabbage seeds were obtained from RDA-Genebank Information Center.

^cEach value represents the mean disease severity ± standard deviation of two runs with ten replicates each.

^dR, resistant, disease index (DI) ≤ 1.0; MR, moderately resistant, 1.0 < DI ≤ 2.0; S, susceptible, DI > 2.0.

의 육종에 관한 연구가 진행되고 있으나 저항성 품종이 시판되고 있지 않다.

본 연구에서도 뿌리혹병에 대하여 고도의 저항성을 보이는 양배추와 브로콜리 유전자원은 없었다. 하지만 중도저항성을 보인 4개 유전자원('IT227118', 'IT227113', 'IT223342', 'K166220')을 선발할 수 있었으며, 특히 'K166220'은 향후에 양배추 뿌리혹병 저항성 육종에서 이용될 수 있을 것으로 생각되었다.

시들음병 저항성 유전자원 발굴. 농업유전자원정보센터로부터 분양 받은 브로콜리와 양배추 유전자원의 시들음병균(race 1)에 대한 저항성을 검정한 결과, 2012년에 분양 받은 브로콜리 유전자원 중에서는 1개를 제외한 5개 유전자원('IT238544', 'IT238543', 'IT227101', 'IT227100', 'IT227099')이 저항성을 보였다. 그리고 이들 중 'IT227100'와 'IT227099'는 발병도 0.1의 아주 높은 저항성을 나타냈다(Table 3).

2012년에 분양 받은 양배추의 경우, 유전자원 8개 중에서 저항성 유전자원은 4개, 중도저항성은 3개였으며, 이들 중 유전자원 'IT227115'은 0.2의 발병도를 보여 시들음병에 대한 고도의 저항성 유전자원임을 알 수 있었다(Table 3). 그리고 2013년

에 분양 받은 양배추 유전자원 52개의 저항성 검정 결과, 저항성 유전자원은 13개, 중도저항성은 13개 그리고 나머지 26개 유전자원은 감수성으로 확인되었고, 이들 중 특히 'K161791'와 'K173350'은 각각 0.2와 0.4의 낮은 발병도를 나타내어 시들음병에 대한 고도의 저항성 유전자원임을 알 수 있었다(Table 4, Fig. 2).

*F. oxysporum*은 침입하는 기주에 따라 분화형(f. sp.)으로 나누고 기주의 품종에 대한 병원성으로 race를 구별하는데, *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans*는 양배추를 포함한 배추과 작물에 시들음병을 일으키는 병원균으로서 race 1–5가 있었다(Armstrong과 Armstrong, 1952; 1966; 1981; Ramirez-Villupadua 등, 1985). 이들 다섯 race 중에서 세 race는 *F. oxysporum*의 다른 f. sp., 즉, race 2는 f. sp. *raphani*, race 3은 f. sp. *matthioli* race 1, 그리고 race 4는 f. sp. *matthioli* race 2로 재 분류되었고, 두 race는 *F. oxysporum*의 동일 f. sp., 즉, race 1은 f. sp. *conglutinans* race 1, race 5은 f. sp. *conglutinans* race 2로 재 분류되었다(Brayford, 1992).

양배추 시들음병은 지난 50여년 동안 단인자 우성 유전자를 지닌 A type 저항성 품종을 이용하여 효과적으로 방제해 왔다(Ramirez-Villupadua 등, 1985; Walker, 1930; 1959). 그러나 외

Table 2. Resistance degree of 52 cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) lines to *Plasmiodiophora brassicae* in 2013^a

Accession ID ^b	Scientific name	Disease index ^c	Response ^d
IT100499	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.8 ± 1.3	S
IT136508	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.3 ± 1.1	S
IT136510	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.8 ± 0.9	S
IT180722	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT188172	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT188173	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT188175	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.8 ± 0.4	S
IT203326	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT203328	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT203329	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.8 ± 0.6	S
IT211568	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223333	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223334	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223335	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.6 ± 1.0	S
IT223336	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.7 ± 0.7	S
IT223337	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223338	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223339	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.7 ± 1.1	S
IT223340	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223341	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223342	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.0 ± 0.8	MR
IT223343	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT223344	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.9 ± 0.3	S
IT223345	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT234356	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
IT267602	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.8 ± 0.4	S
IT906781	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.5 ± 0.7	S
K004537	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.8 ± 1.4	S
K004549	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.8 ± 0.6	S
K138775	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K138934	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K139017	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K161791	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K166207	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.7 ± 0.5	S
K166208	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.6 ± 0.7	S
K166210	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.6 ± 0.7	S
K166211	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K166212	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.8 ± 1.5	S
K166213	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.8 ± 0.6	S
K166214	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.9 ± 0.3	S
K166215	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.9 ± 1.0	S
K166217	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K166218	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K166219	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K166220	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.2 ± 1.0	MR
K167872	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K167874	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.4 ± 0.8	S
K167875	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K173350	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K173351	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.4 ± 0.7	S
K204445	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
K204446	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
Ohjora	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 0.0	S
Jersey Queen	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.2 ± 0.4	MR
Badger Shipper	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.8 ± 1.4	R

^aFourteen-day-old seedlings were inoculated with *P. brassicae* by drenching the roots with a mixed spore suspension (1 : 1) of two isolates (race 9) to give inoculum density of 1.6×10^9 spores/pot. The plants were incubated in a growth chamber at 20°C for 7 days with 14 h light a day and then transferred to a greenhouse (20 ± 5°C). Six weeks after inoculation, disease severity of the plants was investigated on a scale of 0–4.

^bThe cabbage seeds were obtained from RDA-Genebank Information Center.

^cEach value represents the mean disease severity ± standard deviation of two runs with ten replicates each.

^dR, resistant, disease index (DI) ≤ 1.0; MR, moderately resistant, 1.0 < DI ≤ 2.0; S, susceptible, DI > 2.0.



Fig. 1. Resistance of two cabbage lines to clubroot. A: 'K166220' (moderately resistant), B: 'IT223341' (susceptible).

Table 3. Resistance degree of six broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) and eight cabbage (*B. oleracea* var. *capitata*) lines to *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* in 2012^a

Accession ID ^b	Scientific name	Disease index ^c	Response ^d
IT238544	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	1.0 ± 1.9	R
IT238543	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	0.8 ± 1.6	R
IT238542	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	2.7 ± 2.5	S
IT227101	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	0.3 ± 0.7	R
IT227100	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	0.1 ± 0.3	R
IT227099	<i>B. oleracea</i> var. <i>italica</i>	0.1 ± 0.3	R
IT227118	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.8 ± 0.9	S
IT227117	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.7 ± 1.6	MR
IT227116	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.4 ± 1.6	MR
IT227115	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.2 ± 0.6	R
IT227114	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.6 ± 0.8	R
IT227113	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.8 ± 1.8	R
IT227112	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.1 ± 1.0	MR
IT227111	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.5 ± 1.3	R
YR-Honam	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.0 ± 0.0	R
Redmart	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.7 ± 1.7	S

^aFourteen-day-old seedlings were inoculated with *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans* by dipping the roots in spore suspension of 1.0×10^7 conidia/ml for 30 min. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 25°C for 24 h and then transferred to a growth room at 25°C with 12 h light a day. After 3 weeks, disease severity of the plants was investigated on a scale of 0–5.

^bThe broccoli and cabbage seeds were obtained from RDA-Genebank Information Center.

^cEach value represents the mean disease severity ± standard deviation of two runs with ten replicates each.

^dR, resistant, disease index (DI) ≤ 1.0; MR, moderately resistant, 1.0 < DI ≤ 2.5; S, susceptible, DI > 2.5.

국의 경우 이 A type 저항성을 무너뜨리는 새로운 균주가 발생되어 이를 *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans* race 5로 명명하였다가 후에 race 2로 변경했다(Bosland와 Williams, 1984; Brayford, 1992; Ramirez-Villupadua 등, 1985). 따라서 현재 양배추에 시들음병을 일으키는 *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans*는 A type 양배추 품종에 비병원성을 나타내는 race 1과 병원성을 나타내는 race 2가 있다(Bosland와 Williams, 1984). 우리나라에서는

아직 race 2가 보고되지 않았지만, 이에 대한 새로운 저항성 유전자원의 탐색은 필요할 것이다.

본 연구에서 *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans* KR3(race 1)에 의한 시들음병에 고도의 저항성을 보인 양배추 유전자원 3종('IT227115', 'K161791', 'K173350')과 브로콜리 2종('IT227100', 'IT227099')은 앞으로 race 2에도 저항성을 나타내는지를 확인할 필요가 있으며, race 2에도 저항성을 나타낸다면 시들음병

Table 4. Resistance degree of 52 cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) lines to *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* in 2013^a

Accession ID ^b	Scientific name	Disease index ^c	Response ^d
IT100499	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.7 ± 0.9	R
IT136508	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.2 ± 1.9	S
IT136510	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.2 ± 1.3	S
IT180722	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.6 ± 1.6	S
IT188172	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.8 ± 1.5	R
IT188173	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.3 ± 2.6	S
IT188175	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.7 ± 1.1	R
IT203326	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.4 ± 0.8	MR
IT203328	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.9 ± 1.4	S
IT203329	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.1 ± 1.6	MR
IT211568	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.5 ± 2.3	MR
IT223333	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.3 ± 1.6	MR
IT223334	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.6 ± 1.1	MR
IT223335	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.8 ± 1.0	R
IT223336	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.9 ± 1.0	R
IT223337	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.4 ± 0.7	MR
IT223338	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.6 ± 0.5	R
IT223339	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.6 ± 1.3	MR
IT223340	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.2 ± 1.7	S
IT223341	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.9 ± 0.3	S
IT223342	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.2 ± 1.1	S
IT223343	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.0 ± 1.2	R
IT223344	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.8 ± 1.1	MR
IT223345	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.0 ± 0.7	R
IT234356	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.6 ± 1.6	S
IT267602	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.9 ± 1.9	S
IT906781	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.8 ± 1.8	R
K004537	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.8 ± 1.9	S
K004549	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.8 ± 0.5	S
K138775	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.3 ± 2.1	S
K138934	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.4 ± 1.4	MR
K139017	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.2 ± 1.5	S
K161791	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.2 ± 0.4	R
K166207	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.9 ± 1.2	S
K166208	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.3 ± 1.2	MR
K166210	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.2 ± 1.0	S
K166211	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	5.0 ± 0.0	S
K166212	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.6 ± 1.9	S
K166213	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.0 ± 1.6	R
K166214	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.1 ± 0.7	MR
K166215	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	1.1 ± 0.9	MR
K166217	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.7 ± 0.7	S
K166218	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.4 ± 1.4	S
K166219	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.5 ± 0.5	S
K166220	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.6 ± 0.8	R
K167872	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.6 ± 1.8	S
K167874	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.5 ± 0.8	S
K167875	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.7 ± 0.7	S
K173350	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.4 ± 1.1	R
K173351	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	2.3 ± 2.2	MR
K204445	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.3 ± 1.6	S
K204446	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	4.0 ± 1.6	S
YR-honam	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	0.2 ± 0.4	R
Redmat	<i>B. oleracea</i> var. <i>capitata</i>	3.7 ± 1.8	S

^aFourteen-day-old seedlings were inoculated with *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans* by dipping the roots in spore suspension of 1.0×10^7 conidia/ml for 30 min. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 25°C for 24 h and then transferred to a growth room at 25°C with 12 h light a day. After 3 weeks, disease severity of the plants was investigated on a scale of 0–4.

^bThe cabbage seeds were obtained from RDA-Genebank Information Center.

^cEach value represents the mean disease severity ± standard deviation of two runs with ten replicates each.

^dR, resistant, disease index (DI) ≤ 1.0; MR, moderately resistant, 1.0 < DI ≤ 2.5; S, susceptible, DI > 2.5.

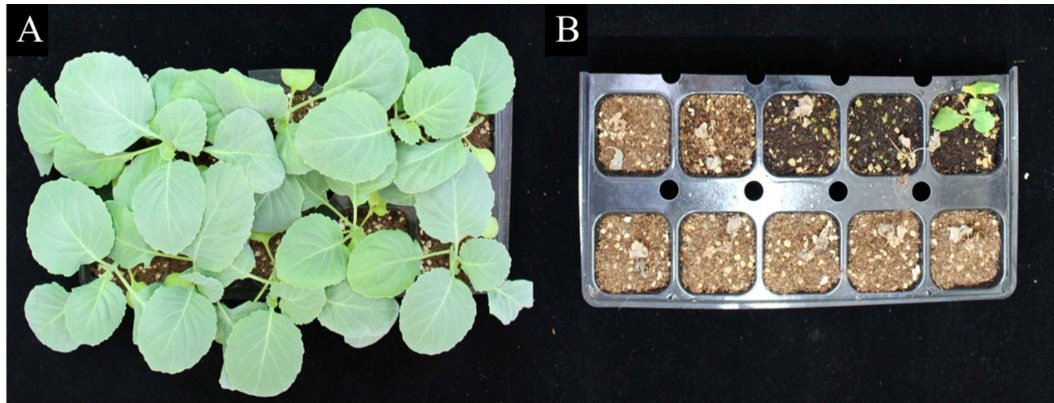


Fig. 2. Resistance of two cabbage lines to *Fusarium* wilt. A: 'K161791' (resistant), B: 'IT223341' (susceptible).

저항성 육종에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

요 약

*Brassica oleracea*의 주요 병해인 뿌리혹병과 시들음병에 대한 저항성 유전자원을 발굴하기 위하여, 농업유전자원정보센터로부터 제공받은 양배추(*B. oleracea* var *capitata*) 유전자원 60개와 브로콜리(*B. oleracea* var *italica*) 유전자원 6개의 뿌리혹병과 시들음병에 대한 저항성을 검정하였다. 유전자원의 뿌리혹병에 대한 저항성 검정을 위해서, 분양 받은 유전자원들의 유묘에 뿌리혹균 *Plasmodiophora brassicae*의 포자현탁액을 접종하였다. 실험한 유전자원 중 양배추 유전자원 4개는 중도저항성을 보였으며, 이들 중 양배추 유전자원 'K166220'는 가장 높은 저항성을 나타냈다. 나머지 유전자원들은 감수성을 보였다. 한편, 유전자원의 시들음병에 대한 저항성을 검정하기 위하여 분양 받은 유전자원 유묘의 뿌리를 *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* 포자 현탁액에 침지하여 접종하였다. 실험한 유전자원 중 양배추 유전자원 17개와 브로콜리 유전자원 5개는 저항성, 양배추 유전자원 16개는 중도저항성 그리고 나머지 유전자원은 감수성이었다. 특히 양배추 유전자원 3종('IT227115', 'K161791', 'K173350')과 브로콜리 유전자원 2종('IT227100', 'IT227099')은 시들음병에 대하여 높은 저항성을 보였다. 본 연구에서 확인된 뿌리혹병과 시들음병 저항성 유전자원들은 뿌리혹병과 시들음병 저항성 육종에 이용될 수 있을 것이다.

Acknowledgement

This research was supported by Golden Seed Project Vegetable Seed Center and Golden Seed Project Horticultural Seed Center, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Rural Development Administration (RDA) and Korea Forest Service (KFS).

References

- Arden, S. 1979. *Fusarium* yellows of cabbage and related crops. Vegetable Crops 730 pp.
- Arie, T., Kobayashi, Y., Okada, G., Kono, Y. and Yamaguchi, I. 1998. Control of soil borne clubroot disease of cruciferous plants by epoxydon from *Phoma glomerata*. *Plant Pathol.* 47: 743–748.
- Armstrong, G. M. and Armstrong, J. K. 1952. Physiological races of the fusaria causing wilts of the Cruciferae. *Phytopathology* 42: 255–257.
- Armstrong, G. M. and Armstrong, J. K. 1966. Races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*; race 4, new race; and a new host for race 1, *Lychnis chalconica*. *Phytopathology* 56: 525–530.
- Armstrong, G. M. and Armstrong, J. K. 1981. Formae speciales and races of *Fusarium oxysporum* causing wilt diseases. In: *Fusarium Diseases, Biology and Taxonomy*. eds. by P. E. Nelson, T. A. Toussoun and R. J. Cook. pp. 391–399. The Pennsylvania State University Press, University Park, USA.
- Baggett, J. R. and Kean, D. 1985. Clubroot-resistant broccoli breeding lines OSU CR-2 to OSU CR-8. *Hort. Science* 20: 784–785.
- Baik, S. Y., Kim, J.-C., Jang, K. S., Choi, Y. H. and Choi, G. J. 2011. Development of efficient screening method for resistance of cabbage to *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*. *Res. Plant Dis.* 17: 13–18. (In Korean)
- Blank, L. M. 1937. *Fusarium* resistance in Wisconsin all seasons cabbage. *J. Agric. Res.* 55: 497–510.
- Bosland, P.W. and Williams, P.H. 1984. A new pathotype of the crucifer yellows organism capable of causing disease in cool soils. *Cruciferae Newsletter* 9: 95.
- Brayford, D. 1992. *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*. *IMI Descr. Fungi Bact.* 1114: 1–2.
- Cartea, M. E., Velasco, P., Obregon, S., Padilla, G. and Haro, A. D. 2008. Seasonal variation in glucosinolate content in *Brassica oleracea* crops grown in Northwestern Spain. *Phytochemistry* 69: 403–410.
- Crute, I. R., Gray, A. R., Crisp, P. and Buczacki, S. T. 1980. Variation in

- Plasmodiophora brassicae* and resistance to clubroot disease in Brassicas and allied crops - a critical review. *Plant Breed. Abs.* 50: 91–104.
- Dobson, R. L., Gabrielson, R. L., Baker A. S. and Bennett, L. 1983. Effects of lime particle-size and distribution and fertilizer formulation on clubroot disease caused by *Plasmodiophora brassicae*. *Plant Dis.* 67: 50–52.
- Farnham, M. W., Keinath, A. P. and Smith, J. P. 2001. Characterization of Fusarium yellows resistance in collard. *Plant Dis.* 85: 890–894.
- Figdore, S. S., Ferreira, M. E., Slocum, M. K. and Williams, P. H. 1993. Association of RFLP markers with trait loci affecting clubroot resistance and morphological characters in *Brassica oleracea* L. *Euphytica* 69: 33–44.
- Grandclement, C. and Thomas, G. 1996. Detection and analysis of QTLs based on RADP markers for polygenic resistance to *Plasmodiophora brassicae* Woron. in *Brassica oleracea* L. *Theor. Appl. Genet.* 93: 86–90.
- Hansen, M. 1989. Genetic variation and inheritance of tolerance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Wor.) and other quantitative characters in cabbage (*Brassica oleracea* L.). *Hereditas* 110: 13–22.
- Hirai, M. 2006. Genetic analysis of clubroot resistance in Brassica crops. *Breeding Sci.* 56: 223–229.
- James, R. V. and Williams, P. H. 1980. Clubroot resistance and linkage in *Brassica campestris*. *Phytopathology* 70: 776–779.
- Jo, S.-J., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, J.-C. and Choi, G. J. 2010. Convenient screening method of Chinese cabbage for resistance to *Plasmodiophora brassicae* using soil-drenching inoculation. *Res. Plant Dis.* 16: 279–284. (In Korean)
- Jo, S.-J., Shim, S.-A., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, J.-C. and Choi, G. J. 2011. Resistance of cultivars of Chinese cabbage to *Plasmodiophora brassicae* isolates of several races collected in Korea. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 29: 610–616. (In Korean)
- Jo, S.-J., Shim, S.-A., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, J.-C. and Choi, G. J. 2012. Development of efficient screening method for resistant cabbage and broccoli to *Plasmodiophora brassicae*. *Res. Plant Dis.* 18: 86–92. (In Korean)
- Keinath, A. P., Farnham, M. W. and Smith, P. 1998. Reactions of 26 cultivars of *Brassica oleracea* to yellows in naturally infested soil. *Biol. Cult. Tests* 13: 155.
- Kim, C. H., Cho, W. D. and Lee, S. B. 2003. Review of researches on clubroot disease of Chinese cabbage in Korea and future tasks for its management. *Res. Plant Dis.* 9: 57–63. (In Korean)
- Korean Society of Plant Pathology (KSPP). 2009. Cabbage. In: List of Plant Disease in Korea. eds. by W.-G. Kim and H. M. Koo pp. 130–132. 5th ed. KSPP, Suwon, Korea.
- Kuginuki, Y., Yoshikawa, H. and Hirai, M. 1999. Variation in virulence of *Plasmodiophora brassicae* in Japan tested with clubroot resistance cultivars of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*). *Eur. J. Plant Pathol.* 105: 327–332.
- Landry, B. S., Hubert, N., Crete, R., Chiang, M. S., Lincoln, S. E. and Etoh, T. 1992. A genetic map for *Brassica oleracea* based on RFLP markers detected with expressed DNA sequences and mapping of resistance gene to race 2 of *Plasmodiophora brassicae* (Woronin). *Genome* 35: 409–420.
- Laurence, F. and Thomas, G. 1993. Inheritance of resistance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Wor.) in kale (*Brassica oleracea* ssp. *acephala*). *Hereditas* 119: 253–262.
- Lv, H., Yang, L., Kang, J., Wang, Q., Wang, X., Fang, Z., Liu, Y., Zhuang, M., Zhang, Y., Lin, Y., Yang, Y., Xie, B., Liu, B. and Liu, J.-S. 2013. Development of InDel markers linked to Fusarium wilt resistance in cabbage. *Mol. Breeding* 32: 961–967.
- Moon, Y. G., Kim, W. G., Cho, W. D. and Sung, J. M. 2001. Occurrence of Fusarium wilt on cruciferous vegetable crops and pathogenic differentiation of the causal fungus. *Res. Plant Dis.* 7: 93–101. (In Korean)
- Moriguchi, K., Kimizuka-Takagi, C., Ishii, K. and Nomura, K. 1999. A genetic map based on RAPD, RFLP, isozyme, morphological markers and QTL analysis for clubroot resistance in *Brassica oleracea*. *Breeding Sci.* 49: 257–265.
- Niwa, R., Nomura, Y., Osaki, M. and Ezawa, T. 2008. Suppression of clubroot disease under neutral pH caused by inhibition of spore germination of *Plasmodiophora brassicae* in the rhizosphere. *Plant Pathol.* 57: 445–452.
- Nomura, K., Minegishi, Y., Kimizuka-Takagi, C., Fujioka, T., Moriguchi, K., Shishido, R. and Ikehashi, H. 2005. Evaluation of F2 and F3 plants introgressed with QTLs for clubroot resistance in cabbage developed by using SCAR markers. *Plant Breeding* 124: 371–375.
- Peterson, J. L. and Pound, C. S. 1960. Studies on resistance in radish to *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* race 2. *Phytopathology* 50: 807–816.
- Ramirez-Villupadua, J., Endo, R. M., Bosland, P. and Williams, P. H. 1985. A new race of *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* that attacks cabbage type A resistance. *Plant Dis.* 69: 612–613.
- Rocherieux, J., Glory, P., Giboulot, A., Boury, S., Barbeyron, G., Thomas, G. and Manzanares-Dauleux, M. J. 2004. Isolate-specific and broad-spectrum QTLs are involved in the control of clubroot in *Brassica oleracea*. *Theor. Appl. Genet.* 108: 1555–1563.
- Suwabe, K., Tsukada, H., Iketani, H., Hatakeyama, K., Fujimura, M., Nunome, T., Fukuoka, H., Matsumoto, S. and Hirai, M. 2003. Identification of two loci for resistance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Woronin) in *Brassica rapa* L. *Theor. Appl. Genet.* 107: 997–1002.
- Voorrips, R. E. 1995. *Plasmodiophora brassicae*: aspects of pathogenesis and resistance in *Brassica oleracea*. *Euphytica* 83: 139–146.
- Voorrips, R. E. and Visser, D. L. 1993. Examination of resistance to clubroot in accessions of *Brassica oleracea* L. using a glasshouse seedling test. *Neth. J. Plant Pathol.* 99: 269–276.
- Voorrips, R. E., Jongerius, M. C. and Kanne, H. J. 1997. Mapping of two genes for resistance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) in a population of doubled haploid lines of *Brassica oleracea* by means of RFLP and AFLP markers. *Theor. Appl. Genet.* 94: 75–82.

- Walker, J. C. 1930. Inheritance of Fusarium resistance to cabbage yellows. *J. Agric. Res.* 40: 721–745.
- Walker, J. C. 1959. Progress and problems in controlling plant disease by host resistance. In: *Plant Pathology Problems and Progress 1908–1958*. eds. by C. S. Holton, G. W. Fischer, R. W. Fulton, H. Hart and S. E. A. McCallan. pp. 32–41. Univ. Wisconsin Press, Madison.
- Yoon, C. S., Jung, E. K., Lee, S. J., Zhang, Y., Lee, J. E. and Kim, B. S. 2010. Screening of resistant Chinese cabbage cultivar against clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) for cultivation in highland. *Res. Plant Dis.* 16: 9–65. (In Korean)
- Yoshikawa, H. 1993. Studies on breeding of clubroot resistance in cole (Cruciferae) crop. *Bull. Natl. Res. Inst. Veg. Ornam. Plants Tea Jpn. Ser. A.* 7: 1–165.
- Zhang, X. Z., Lee, S. U., Kim, J. S., Yoon, Y. S., Choi, G. S., Kim, H. K. and Kim, B. S. 2005. Control efficacy of flusulfamide GR on Chinese cabbage clubroot caused by *Plasmodiophora brassicae*. *Res. Plant Dis.* 11: 43–47. (In Korean)