

양배추 및 브로콜리 뿌리혹병에 대한 효율적인 저항성 검정 방법 확립

조수정 · 심선아 · 장경수 · 최용호 · 김진철 · 최경자*

한국화학연구원 바이오화학연구센터

Development of Efficient Screening Method for Resistant Cabbage and Broccoli to *Plasmodiophora brassicae*

Su-Jung Jo, Sun-Ah Shim, Kyoung Soo Jang, Yong Ho Choi, Jin-Cheol Kim and Gyung Ja Choi*

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

(Received on March 2, 2012; Revised on May 21, 2012; Accepted on June 8, 2012)

Clubroot caused by *Plasmodiophora brassicae* Woron. is one of the most important diseases in *Brassica* crops worldwide. To establish more simple and reliable screening method for resistant cabbage and broccoli to *P. brassicae*, the development of clubroot on the plants according to inoculum concentration and incubation period after inoculating with the pathogen was investigated using *P. brassicae* GN1 isolate (race 9). To facilitate and acquire precise result of resistance screening of cabbage and broccoli to clubroot, 14-day-old seedlings were inoculated by drenching roots with the spore suspension of *P. brassicae* to give inoculum density of 2.5×10^9 spores/pot. To develop the disease, the inoculated seedlings were incubated in a growth chamber at 20°C for 3 days, and then cultivated in a greenhouse (20±5°C) for five weeks. Under the optimum conditions, 16 cabbage and 17 broccoli cultivars were tested for resistance to four field isolates (GN1, GN2, GS and YC) of *P. brassicae* collected from four regions in Korea. Among them, some cabbage and broccoli cultivars showed different resistance response to three isolates (GN1, GN2 and GS) determined as race 9 by using the differential varieties of Williams. On the other hand, all the tested cultivars were highly susceptible to YC isolate (race 2). The results suggest that this method is efficient screening method of cabbage and broccoli for resistance to *P. brassicae*.

Keywords : Breeding, Clubroot, Crucifer crops, Race, Resistance

서 론

배추과 작물에 속하는 *Brassica oleracea*는 Capitata 그룹인 양배추, Italica 그룹인 브로콜리 그리고 Botrytis 그룹인 컬리플라워 등의 많은 경제적인 작물을 포함하고 있다. 특히 양배추와 브로콜리는 현대 식생활에 빠져서는 안 되는 매우 중요한 작물이다. 브로콜리는 19세기 후반까지는 대중화 되지 않았으나, 1930년대부터 영양학적 가치가 알려지면서 중요한 채소가 되었다(Na, 2008). *B. oleracea* 뿐만 아니라 *B. rapa*, *B. napus* 등 대부분의 배추과 작물은 *Plasmodiophora brassicae* Woron.에 의해 발

생하는 뿌리혹병으로 인해 큰 피해를 입고 있다. 토양전염성 기생체인 *P. brassicae*에 감염된 식물은 잔뿌리가 없어지고 주근에 흑이 생성되어 양분과 수분의 흡수가 억제되어 생육이 저해되며 시드는 증상이 반복되다가 고사한다. *P. brassicae*는 1878년 러시아에서 Woronin에 의해 처음 기록되었으며 이후 세계 각국에서 뿌리혹병의 기록이 발견되었고(Karling, 1968), 한국에는 1920년대에 처음 기록되었다(Ikegami 등, 1981). 현재는 세계적으로 배추과 작물에 발생하는 가장 심각한 병 중 하나이다.

뿌리혹균은 거의 모든 배추과 작물에 발생하여 기주가 다양할 뿐만 아니라, 병든 조직에 무수히 많은 휴면포자를 형성하고, 이들 포자들은 토양에서 최대 15년 동안 생존할 수 있어 방제하기에 매우 어려운 토양병이다(Mattush, 1977). 뿌리혹병 방제법으로는 토양의 pH를 조절하거나

*Corresponding author

Phone) +82-42-860-7434, Fax) +82-42-861-4913

Email) kjchoi@kriict.re.kr

배추과 작물이 아닌 작물과 윤작을 하는 등의 경종적 방제법이 알려져 있으나 현실적으로는 경제성 때문에 적용하기 어렵고, 길항미생물 등을 이용한 생물적 방제 방법 등이 있으나 아직 그 효과가 낮아 사용하기에 어려운 실정이다. 그리고 합성 살균제를 이용한 뿌리혹병 방제 방법은 비용이 비싸고 방제효과의 기간이 짧을 뿐만 아니라 환경 독성 등의 우려로 사용에 한계가 있다(Cheah 등, 2000; Yoshikawa, 1983). 그러므로 오늘날에는 친환경 농업에서도 사용이 가능한 저항성 품종이 뿌리혹병 방제를 위해 요구되고 있다.

European fodder turnip(*B. rapa*)인 ‘Siloga’, ‘Gelja R’, ‘Milan White’ 및 ‘Debra’에는 최소한 8개의 뿌리혹병 저항성 유전자가 있다고 알려져 있다(Hirai, 2006; Piao 등, 2009). 그리고 *B. rapa*에 속하는 배추(*B. rapa* subsp. *pekinensis*)의 뿌리혹병 저항성 품종은 European fodder turnip의 저항성 유전자를 도입하여 개발되었다(Yoshikawa, 1993; Hirai, 2006). 그리고 배추 저항성 유전자는 단인자 우성 유전을 한다고 알려져 있다(James와 Williams, 1980; Kuginuki 등, 1999; Yoshikawa, 1993). 이와 달리 *B. oleracea*의 뿌리혹병 저항성 품종은 매우 드물어 단지 몇 품종만이 일본에서 개발되어 사용되고 있다(Baggett와 Kean, 1985). 몇 개의 *B. oleracea* 저항성 유전자원이 보고된 바 있으나, 이들 저항성은 고전적인 유전 분석 및 분자마커 분석에서 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). 하지만 저항성을 약 54%를 설명할 수 있는 QTL 유전자 *pb-3*과 같은 주요한 유전자가 존재한다고 하였다. 그러나 불행하게도 이들을 검정할 수 있는 특이적인 primer 혹은 RFLP 마커 등은 알려지지 않았다. 이와 같이 뿌리혹병 저항성 양배추는 2개 이상의 유전자가 관여하는 양적 저항성이며 저항성 유전자에 관련된 정보가 아직 부족한 실정이어서 저항성 품종의 개발이 지연되고 있다(Hirai, 2006). *P. brassicae*에 대한 *B. oleracea*의 저항성 연구 및 새로운 저항성 육종 소재를 발굴하기 위해서는 반드시 효율적인 저항성 검정 방법이 필요하다.

본 연구는 *B. oleracea*에 속하는 양배추와 브로콜리의 저항성 품종을 개발하기 위한 효율적인 뿌리혹병 저항성 검정 방법을 확립하고, 몇 개의 *P. brassicae* 균주를 사용하여 시판 중인 16종 양배추와 17종 브로콜리 품종의 뿌리혹병 저항성 정도를 조사하였다.

재료 및 방법

식물 재배. 양배추 두 품종 대박나(아시아종묘), 오조라(사카타코리아) 종자와 브로콜리 두 품종 녹국(아시아종묘), 아오시마(사카타코리아) 종자를 5×8 육묘용 연결 포트(70 ml/pot, 범농사)에 원예용상토 5호(부농사)를 채워 넣고 파종하여 온실(25±5°C)에서 14일 동안 재배한 후 실험에 사용하였다. 뿌리혹병균의 레이스 검정 실험에서는 Williams 판별 기주 4종(양배추 ‘Jersey Queen’과 ‘Badger Shipper’ 그리고 rutabaga ‘Laurentian’과 ‘Wilhelmsburger’)을 동일한 방법으로 파종하고 재배하여 실험에 사용하였다.

양배추와 브로콜리 시판 품종의 뿌리혹병 저항성 검정 실험은 농우바이오, 몬산토코리아, 사카타코리아, 아시아종묘, 코레곤종묘, 한국다끼이 등의 종자회사가 판매하고 있는 양배추 16종 품종(그랜드마트, 그린햇, 꼬꼬마, 대박나, 레드마트, 루비아, 아시아볼, 오가네, 오조라, 중생루비아, 레드선, YR에코플러스, YR온누리, YR옴파로스, YR호걸, YR호남)과 브로콜리 17종 품종(녹국, 녹색, 킹덤, 파트너, 얼리유, 에쿠스, 나이스그린, 베리덤, 에이스덤, 그린매직, 녹색, 아오시마, 청제, 하이파이버, 그랜저, 업웰빙, 필그림)을 구입하여 위와 동일한 방법으로 재배하여 실험에 사용하였다.

균주 및 접종원 준비. 2009년부터 2010년까지 경기도 연천군(YC), 충청북도 괴산시(GS) 및 강원도 강릉시(GN1, GN2) 등의 배추 및 양배추 재배포장 4곳에서 전형적인 뿌리혹병을 보이는 뿌리를 채집하였다(Table 1). 채집한 시료는 -80°C deep freezer에 보관하면서 실험에 사용하였다.

접종하기 직전에 보관 중인 뿌리혹을 꺼내어 증류수로 수차례 세척하여 이물질을 깨끗이 제거한 후 멸균수를 첨가하여 Waring blender로 마쇄하였다. 그리고 식물 조직을 제거하기 위하여 2겹의 가제로 여과하였으며, 준비한

Table 1. Four field isolates of *Plasmodiophora brassicae* used in this study

Isolate	Collection districts	Host	Year
GS	Goesan-gun, Chungcheongbuk-do	Cabbage	2009
GN1	Gangneung-si, Gangwon-do	Chinese cabbage	2009
GN2	Gangneung-si, Gangwon-do	Chinese cabbage	2010
YC	Yeoncheon-gun, Gyeonggi-do	Chinese cabbage	2009

포자현탁액은 광학현미경 하(300배)에서 hemocytometer를 이용하여 포자 농도를 측정하였다(Jo 등, 2011). 포자 농도에 따른 뿌리혹병 발생 실험을 제외한 모든 실험은 포자현탁액의 최종 농도를 ml 당 5×10^8 개가 되도록 멸균수로 희석하여 접종원으로 사용하였다. 포자 농도에 따른 뿌리혹병 발생 실험에서는 포자현탁액 농도를 ml 당 6.3×10^7 , 1.3×10^8 , 2.5×10^8 , 5×10^8 및 1×10^9 개로 각각 조정하여 실험에 사용하였다.

접종 및 병조사. 온실에서 재배한 양배추와 브로콜리 유묘에 포자현탁액을 포트 당 5 ml씩 토양 관주하여 접종하였다. 접종한 유묘는 20°C 항온항습실에서 하루에 12시간 동안 광을 처리하며 3일 동안 배양한 후에 온실(20±5°C)로 이동하여 수분을 공급하며 재배하였다. 배양 기간에 따른 뿌리혹병 발생 실험을 제외한 모든 실험은 접종 5주 후에 뿌리를 수확하여 뿌리혹병 발생 정도에 따라 발병도를 조사하였다. 조사 기준은 0=뿌리혹병 발생이 없음, 1=측근에 흑이 착생되어 비대 정도가 적고 서로 독립하여 존재, 2=측근에 흑이 착생되며 비대 정도가 비교적 큼, 3=주근에 흑이 착생되며 서로 접합되고 비대 정도가 큼, 4=주근에 흑이 착생되며 서로 접합되고 비대 정도가 매우 큼 등의 5단계로 하였다(Kuginuki 등, 1999; Suwabe 등, 2003).

레이스 검정 실험에서는 Williams 판별 기주 4종(양배추 ‘Jersey Queen’과 ‘Badger Shipper’ 그리고 rutabaga ‘Laurentian’과 ‘Wilhelmsburger’)에 각 뿌리혹병균의 포자현탁액을 포트 당 5 ml씩 관주하여 접종 6주 후에 뿌리에 발생한 뿌리혹병 정도에 따라 발병도를 조사하였다. 평균 발병도가 1.0 이하일 때 저항성으로, 그리고 1.0 초과이면 감수성으로 판단하였으며, 4개 기주에서의 반응을 저항성과 감수성으로 결정한 후 Williams 레이스 판별기준표에 따라 레이스를 결정하였다(Williams, 1966). 모든 실험은 10반복으로 2회 실시하였으며, SAS(SAS Institute, Inc., 1989, Cary, NC) 프로그램을 이용하여 ANOVA 분석을 하였다. 처리 평균간 비교를 위하여 Duncan's multiple range test ($P=0.05$)를 실시하였다.

결과 및 고찰

균주 및 레이스 검정. Williams(1966)의 레이스 판별 기주인 양배추 2종(Jersey Queen, Badger Shipper)과 rutabaga 2종(Laurentian, Wilhelmsburger)을 이용하여 포장에서 채집한 뿌리혹병균의 레이스를 동정한 결과, 뿌리혹병균들은 레이스 2 혹은 레이스 9로 확인되었다(Table 2). YC 균주는 네 기주 중 ‘Wilhelmsburger’에만 저항성

Table 2. Race determination of four field isolates of *Plasmiodiophora brassicae* using the differential varieties of Williams (1966)^a

Host	<i>P. brassicae</i> isolate			
	GS	GN1	GN2	YC
Jersey Queen	0.5±0.5 ^b (R ^c)	0.7±0.8 (R)	0.9±0.3 (R)	3.9±0.3 (S)
Badger Shipper	0.0±0.0 (R)	0.0±0.0 (R)	0.1±0.3 (R)	3.7±0.5 (S)
Laurentian	3.9±0.3 (S)	3.5±0.7 (S)	3.6±0.8 (S)	3.8±0.6 (S)
Wilhelmsburger	2.4±0.7 (S)	2.4±0.5 (S)	2.9±0.5 (S)	0.2±0.4 (R)
Race	9	9	9	2

^a14-day-old seedlings were inoculated with *P. brassicae* by drenching the roots with the spore suspension of each isolate to give inoculum density of 2.5×10^9 spores/pot. The plants were incubated in a growth chamber at 20°C for 3 days with 12-hr light a day and then transferred to a greenhouse (20±5°C). Six weeks after inoculation, disease severity of seedlings was rated on a scale 0 to 4. 0, no symptoms; 1, a few very small separate globular clubs on lateral roots; 2, medium separate globular clubs on lateral roots; 3, intermediate symptoms on main roots; and 4, severe clubs on main roots.

^bEach value represents the mean (±standard deviation) of two runs with 10 replicates each.

^cS, susceptible (disease index ≥ 1.0); R, resistant (disease index < 1.0).

을 나타내고, 양배추 두 품종과 rutabaga ‘Laurentian’에서는 높은 발병도를 나타내 레이스 2로 동정되었다. GN1, GN2 및 GS 균주들은 rutabaga 두 품종에서는 병원성을 나타내었지만, 양배추 두 품종은 이들 균주에 저항성을 보여 레이스 9로 확인되었다. 우리나라에는 레이스 10과 12를 제외한 모든 레이스가 존재한다고 보고되어 있으며, 이들 중 레이스 2와 4는 우점하는 레이스에 속하며 레이스 9 또한 배추에서 많이 발견되는 레이스 중 하나로 보고되었다(Cho 등, 2003; Jang 등, 2007).

접종 농도와 배양 기간에 따른 뿌리혹병 발생. GN1 균주를 이용하여 접종 농도와 접종 후 배양 기간에 따른 발병 정도를 조사하기 위하여, 14일 동안 재배된 양배추 2품종(‘대박나’, ‘오조라’)과 브로콜리 2품종(‘녹국’, ‘아오시마’)에 포트 당 3.1×10^8 , 6.3×10^8 , 1.3×10^9 , 2.5×10^9 및 5.0×10^9 개씩을 접종하고 4주, 5주 그리고 6주 동안 재배한 후에 발병도를 조사하였다. 접종된 양배추 ‘대박나’와 ‘오조라’ 그리고 브로콜리 ‘아오시마’와 ‘녹국’의 모든 처리구의 평균 발병도는 각각 1.9, 3.2, 2.8 및 2.7로 ‘대박나’는 다소 낮은 뿌리혹병 발생이 있었으나, 나머지 세 품종은 유사한 정도의 감수성을 나타냈다(Fig. 1). 포트 당 접종농도가 3.1×10^8 , 6.3×10^8 , 1.3×10^9 , 2.5×10^9 및 5.0×10^9 개로 증가함에 따라 양배추 ‘대박나’는 1.3, 1.7,

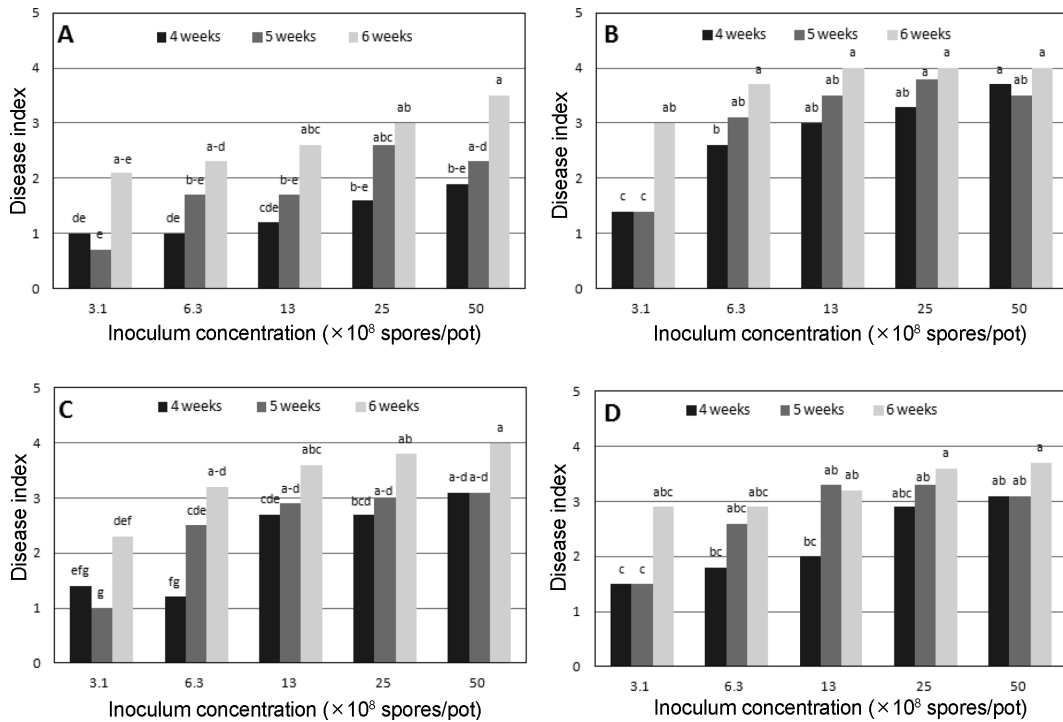


Fig. 1. Clubroot development of cabbage (A, B) and broccoli (C, D) seedlings according to inoculum concentration and incubation period after inoculating with *Plasmiodiophora brassicae*. A, Daebakna; B, Ohjora; C, Nokguk; D, Ahosima. 3.1, 3.1×10^8 spores/pot; 6.3, 6.3×10^8 spores/pot; 13, 1.25×10^9 spores/pot; 25, 2.5×10^9 spores/pot; 50, 5.0×10^9 spores/pot. Columns labeled with the same letter are not significantly different in Duncan's multiple range test ($P = 0.05$).

1.8, 2.4, 2.6의 뿌리혹병 발병도를, 양배추 ‘오조라’는 1.9, 3.1, 3.5, 3.7, 3.7의 발병도를, 브로콜리 ‘아오시마’는 2.0, 2.4, 2.8, 3.3, 3.3의 발병도를, 그리고 브로콜리 ‘녹국’은 1.6, 2.3, 3.1, 3.2, 3.4로 실험한 양배추와 브로콜리는 품종에 관계없이 접종한 포자의 수가 증가할수록 뿌리혹병 발생은 증가하였다.

실험한 양배추와 브로콜리 품종들은 접종 후 재배 기간이 4주, 5주 및 6주로 길어짐에 따라 ‘대박나’는 1.3, 1.8, 2.7의 뿌리혹병 발병도를, ‘오조라’는 2.8, 3.1, 3.7의 발병도를, ‘아오시마’는 2.3, 2.8, 3.3의 발병도를 그리고 ‘녹국’은 2.2, 2.5, 3.4의 평균 발병도를 나타내었다(Fig. 1). 두 기주의 품종 모두에서 뿌리혹병균을 접종하고 재배 기간이 길어짐에 따라 뿌리혹병 발생은 증가하였다. 접종 4주 후에는 뿌리혹병 발생이 적고, 접종 후에 6주 동안 재배하였을 때에는 품종 간의 저항성 차이가 줄어들어 접종 5주 후에 병조사하는 것이 바람직하다고 생각되었다.

이상의 결과로부터 양배추 및 브로콜리의 뿌리혹병에 대한 저항성을 효율적으로 검정하기 위해서는 포트 당 2.5×10^9 개의 포자를 접종하고 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온실에서 5주 동안 재배하는 것이 적합하다고 생각되었다.

포장 균주에 대한 양배추와 브로콜리 품종의 저항성.

시판되고 있는 양배추와 브로콜리 품종들의 뿌리혹병 저항성 정도를 알아보기 위하여, 양배추 16종과 브로콜리 17종을 4개의 *P. brassicae* 포장 균주로 접종하고 5주 동안 재배한 결과, 실험한 품종들은 4개 균주에 대하여 다양한 저항성 반응을 나타내었다(Tables 3, 4). GN1, GN2, GS 및 YC 균주에 의한 16종 양배추 품종의 뿌리혹병 평균 발병도는 각각 2.3, 2.7, 2.8 및 4.0으로 *P. brassicae* 균주 간에 병원성 차이가 있었다(Table 3). 레이스 2인 YC 균주에 대해서는 실험한 모든 품종이 높은 감수성을 나타내었지만, 레이스 9인 GN1, GN2 및 GS 균주에 대해서는 ‘오가네’는 GN1, GN2, GS 균주들에 대하여 중도저항성을 보였고, ‘YR 온누리’, ‘대박나’, ‘YR 호남’ 및 ‘YR 옴팔로스’는 GN1 균주에 대하여 중도저항성을 나타내었다. 하지만 고도의 저항성을 나타내는 품종은 없었다.

GN1, GN2, GS 및 YC 균주에 의한 17종 브로콜리 품종의 평균 발병도는 각각 2.5, 2.6, 3.1 및 4.0으로 양배추와 유사한 결과를 보였다(Table 4). 양배추와 브로콜리 모두 YC 균주의 병원성이 가장 높았으며, GS, GN2 그리고 GN1 균주 순으로 병원성이 높았다. 레이스 2인 YC 균주는 양배추와 마찬가지로 실험한 모든 품종에서 발병

Table 3. The degree of resistance of sixteen commercial cabbage cultivars to four field isolates of *Plasmiodiophora brassicae*^a

Cultivar	GN1 (race 9)	GN2 (race 9)	GS (race 9)	YC (race 2)
Ohgane	1.4efg ^b	1.3c	1.9c	4.0a
YR-Onnuri	1.1g	2.5ab	2.1bc	4.0a
Daebakna	1.6d-g	2.3abc	2.7abc	4.0a
YR-Honam	1.3fg	2.8ab	2.6abc	4.0a
YR-Omphalos	1.2fg	3.4abc	3.8a	4.0a
Jungsaengrubia	2.6bcd	2.1bc	2.5abc	4.0a
YR-Hogeol	2.0c-g	3.1ab	2.5abc	4.0a
Redmart	2.5bcd	2.1bc	3.5ab	4.0a
YR-Ecoplus	2.9abc	2.6ab	2.7abc	4.0a
Asiaball	2.2b-f	2.8ab	3.3abc	4.0a
Kkokkoma	2.6bcd	2.6ab	3.1abc	4.0a
Redsun	2.8abc	2.8bc	2.8abc	4.0a
Grandmart	2.4b-e	3.1ab	2.9abc	4.0a
Rubia	3.2abc	2.5abc	3.1abc	4.0a
Greenhot	3.2abc	3.0ab	3.3abc	4.0a
Ohjora	3.7abc	3.5a	2.7abc	4.0a
Mean	2.3	2.7	2.8	4.0

^aSeedlings of 16 commercial cultivars were inoculated with *P. brassicae* by drenching the roots with the spore suspension of each isolate to give inoculum density of 2.5×10^9 spores/pot. The plants were incubated in a growth chamber at 20°C for 3 days with 12-hr light a day and then transferred to a greenhouse (20±5°C). Five weeks after inoculation, disease severity of cabbage seedlings was rated on a scale 0 to 4. 0, no symptoms; 1, a few very small separate globular clubs on lateral roots; 2, medium separate globular clubs on lateral roots; 3, intermediate symptoms on main roots; and 4, severe clubs on main roots.

^bEach value represents the mean disease index of two runs with 10 replicates each. Values in the labeled with the same letter are not significantly different in Duncan's multiple range test ($P=0.05$).

도 4.0으로 고도의 감수성을 나타냈고, 레이스 9인 GN1 균주는 ‘킹덤’, ‘파트너’, ‘나이스그린’, ‘녹국’, ‘녹세’에 대하여 중도저항성을 보이고, GN2 균주는 ‘베리덤’에 그리고 GS 균주는 ‘하이파이브’, ‘그린매직’ 및 ‘그랜저’에 중도저항성을 나타냈다. 이렇게 양배추와 브로콜리 몇 가지 품종들이 균주에 대하여 다양한 반응을 보이는 이유는 각 병원균의 생리분화에 따른 병원성의 차이와 각 품종이 지닌 복합적인 저항성 유전자가 품종마다 상이하여 균주에 대한 저항성 반응이 다르게 나타난다고 생각되었다(Buczacki 등, 1975; Tanaka 등, 2006). 한편 YC 균주에 의해 모든 양배추 및 브로콜리 품종에서 4.0의 높은 발병도를 나타낸 것은 레이스 2가 Williams 판별품종 중 양배추 2품종 (Jersey Queen과 Badger Shipper) 모두에 뿌리혹병을 일으키는 레이스이기 때문에 나타난 결과로 생각되었다. 따

Table 4. The degree of resistance of seventeen commercial broccoli cultivars to four field isolates of *Plasmiodiophora brassicae*^a

Cultivar	GN1 (race 9)	GN2 (race 9)	GS (race 9)	YC (race 2)
Highfive	2.2bcd ^b	2.4abc	1.9bc	4.0a
Greenmagic	2.4bcd	2.5ab	1.7c	4.0a
Grandeur	2.5a-d	2.7ab	1.7c	4.0a
Kingdom	1.5d	2.9ab	2.9abc	4.0a
Partner	1.5d	2.7ab	3.2a	4.0a
Nicegreen	1.6d	2.6ab	3.8a	4.0a
Nokguk	1.7cd	3.1ab	3.3a	4.0a
Nokse	1.4d	3.2ab	3.5a	4.0a
Earlyou	2.4bcd	2.4abc	3.3a	4.0a
Cheongje	2.5a-d	2.3ab	3.3a	4.0a
Acedom	3.2ab	2.3abc	3.0a	4.0a
Verydom	3.6a	1.8bc	3.5a	4.0a
Nokje	3.6a	2.4abc	3.0ab	4.0a
Equus	2.4bcd	3.4a	3.4a	4.0a
Aoshima	3.1ab	3.1ab	3.5a	4.0a
Upwellbeing	3.3ab	3.1ab	3.5a	4.0a
Pilgrim	2.8abc	3.4a	3.8a	4.0a
Mean	2.5	2.6	3.1	4.0

^aSeedlings of 17 commercial cultivars were inoculated with *P. brassicae* by drenching the roots with the spore suspension of each isolate to give inoculum density of 2.5×10^9 spores/pot. The plants were incubated in a growth chamber at 20°C for 3 days with 12-hr light a day and then transferred to a greenhouse (20±5°C). Five weeks after inoculation, disease severity of broccoli seedlings was rated on a scale 0 to 4. 0, no symptoms; 1, a few very small separate globular clubs on lateral roots; 2, medium separate globular clubs on lateral roots; 3, intermediate symptoms on main roots; and 4, severe clubs on main roots.

^bEach value represents the mean disease index of two runs with 10 replicates each. Values in the labeled with the same letter are not significantly different in Duncan's multiple range test ($P=0.05$).

라서 양배추 뿌리혹병에 대한 저항성 품종 스크리닝을 위해서는 Williams 판별품종의 양배추 두 품종을 모두 감염할 수 없는 레이스 9 균주가 레이스 2보다 더 적합하리라 생각되었다(Williams, 1966).

*B. oleracea*의 뿌리혹병에 대한 저항성 유전자에 관한 연구가 현재에도 활발히 진행되고 있다(Carlsson 등, 2004). 케일과 양배추 등에서 많은 저항성 유전자를 발견하였으나(Crisp 등, 1989; Landry 등, 1992; Manzaneres-Dauleux 등, 2000), *B. oleracea*의 뿌리혹병에 대한 저항성은 두 개 이상의 다인자에 의해 결정되므로 저항성 품종 개발에 많은 어려움이 따른다(Moriguchi 등, 1999; Nomura 등, 2005; Rocherieux 등, 2004; Voorrips 등, 1997). 현재 저항성 유전자원을 이용하여 뿌리혹병에 대해 저항성인 양배추 품

종이 육종되고 있지만, 국내에는 아직 시판되는 저항성 품종이 없다. 따라서 본 연구에서 확립한 양배추와 브로콜리 저항성 스크리닝 방법은 새로운 저항성 유전자원을 발굴하거나 분자마커 개발 및 저항성 유전자 규명 등의 연구에 유용하게 사용되리라 생각되었다.

요 약

Plasmodiophora brassicae Woron.에 의한 뿌리혹병은 배추과 작물에 발생하는 전 세계적으로 가장 중요한 식물병 중 하나이다. 본 연구는 *Brassica oleracea*에 속하는 양배추와 브로콜리의 뿌리혹병에 대한 효율적인 저항성 검정 방법을 확립하기 위하여, 레이스 9인 GN1 균주를 이용하여 접종원의 농도와 *P. brassicae* 접종 후 배양 기간 등의 발병 조건에 따른 양배추와 브로콜리 뿌리혹병 발생을 조사하였다. 접종원의 농도는 14일 재배한 유묘에 포트 당 2.5×10^9 개의 포자를 접종하는 것이 적당하였으며, 안정적인 발병을 위하여 접종한 유묘는 3일 동안 20°C 생육상에서 하루에 12시간 광을 처리하며 배양하고, 그 후 온실(20±5°C)에서 5주 동안 재배한 후에 발병 정도를 조사하는 것이 요구되었다. 위의 검정법을 이용하여 레이스가 다른 *P. brassicae* 4개 포장 균주에 대한, 시판 중인 양배추 16종과 브로콜리 17종 품종의 저항성 정도를 실험한 결과, 레이스 9인 GN1, GN2 그리고 GS 균주에 대해서는 증도저항성을 보이는 몇 가지 품종이 있었다. 그러나 레이스 2인 YC 균주에 대해서는 실험한 모든 품종이 고도의 감수성 반응을 나타내었다. 따라서 이 방법은 양배추와 브로콜리 뿌리혹병 저항성을 검정하기 위한 효율적인 검정법이라는 것을 알 수 있었다.

Acknowledgement

This study was supported by a grant (Project No. 609002-5) from the Screening Center for Disease Resistant Vegetable Crops of Technology Development Program for Agriculture and Forestry, Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea.

References

- Baggett, J. R. and Kean, D. 1985. Clubroot-resistant broccoli breeding lines OSU CR-2 to OSU CR-8. *HortScience* 20: 784–785.
- Buczacki, S. T., Toxopeus, H., Mattusch, P., Johnston, T. D., Dixon, G. R. and Hobolth, L. A. 1975. Study of physiological specialization in *Plasmodiophora brassicae*: proposals for attempted rationalization through an international approach. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 65: 295–303.
- Carlsson, M., Von Bothmer, R. and Merker, A. 2004. Screening and evaluation of resistance to downy mildew (*Peronospora parasitica*) and clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) in genetic resources of *Brassica oleracea*. *Hereditas* 141: 293–300.
- Cheah, L. H., Veerakone, S. and Kent, G. 2000. Biological control of clubroot on cauliflower with *Trichoderma* and *Streptomyces* spp. *N. Z. Plant Protection* 53: 18–21.
- Cho, W. D., Kim, W. G. and Takahashi, K. 2003. Occurrence of clubroot in cruciferous vegetable crops and races of the pathogen in Korea. *Plant Pathology J.* 19: 64–68.
- Crisp, P., Crute, I. R., Sutherland, R. A., Angell, S. M., Bloor, K., Burgess, H. and Gordon, P. L. 1989. The exploitation of genetic resources of *Brassica oleracea* in breeding for resistance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae*). *Euphytica* 42: 215–226.
- 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.
- Hirai, M. 2006. Genetic analysis of clubroot resistance in *Brassica* crops. *Breed. Sci.* 56: 223–229.
- Ikegami, H., Ito, T., Imuro, Y. and Naiki, T. 1981. Growth of *Plasmodiophora brassicae* in the root and callus of Chinese cabbage. In: Chinese Cabbage, ed. by N. S. Talekar and T. D. Griggs, pp. 81–90. Asian Vegetable Research and Development Center, Taiwan.
- James, R. V. and Williams, P. H. 1980. Clubroot resistance and linkage in *Brassica campestris*. *Phytopathology* 70: 776–779.
- Jang, S. J., Heo, S. H., Jang, C. S. and Kim, H. G. 2007. Races and dominant population of Chinese cabbage clubroot pathogen, *Plasmodiophora brassicae* in Korea. *Res. Plant Dis.* 13: 45–49. (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)
- Karling, J. S. 1968. The Plasmodiophorales: including a complete host index, bibliography, and a description of diseases caused by species of this order, 2nd ed. Hafner, New York. 144 pp.
- 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.
- Manzanares-Dauleux, M. J., Divaret, I., Baron, F. and Thomas, G. 2000. Evaluation of French *Brassica oleracea* landraces for resistance to *Plasmodiophora brassicae*. *Euphytica* 113: 211–218.
- Mattush, P. 1977. Epidemiology of clubroot of crucifers caused by *Plasmodiophora brassicae*. In: Woronin 100 International Conference on Clubroot, ed. by S. T. Buczacki and P. H. Williams, pp. 22–28. University of Wisconsin, Madison, WI, USA.
- 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*. *Breed. Sci.* 49: 257–265.
- Na, J. H. 2008. Cabbage and broccoli. In: The Recent History of Vegetable Seed Industry in Korea, ed. by H. G. Park, O. H. Kwon, H. T. Kim, J. H. Na, Y. Park, J. Y. Park, C. S. Park and Y. C. Cho, pp. 271–280. Seoul National University Press, Seoul, Korea. (In Korean)
- 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 Breed.* 124: 371–375.
- Piao, Z., Ramchiary, N. and Lim, Y. P. 2009. Genetic of clubroot resistance in *Brassica* species. *J. Plant Growth Regul.* 28: 252–264.
- 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., Tsukazaki, 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.
- Tanaka, S., Mido, H. and Ito, S. 2006. Colonization by two isolates of *Plasmodiophora brassicae* with differing pathogenicity on a clubroot-resistant cultivar of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *pekinensis*). *J. Gen. Plant Pathol.* 72: 205–209.
- 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.
- Williams, P. H. 1966. A system for the determination of races of *Plasmodiophora brassicae* that infect cabbage and rutabaga. *Phytopathology* 56: 624–626.
- Yoshikawa, H. 1983. Breeding for clubroot resistance of crucifer crops in Japan. *Jpn. Agr. Res. Quart.* 17: 6–11.
- Yoshikawa, H. 1993. Studies on breeding of clubroot resistance in cole (Cruciferae) crop. *Bull. Natl. Res. Inst. Veg. Ornam. Plants Tea Japan, Ser. A* 7: 1–165.