

# 국내 재배포장에서 수집한 뿌리혹병균(*Plasmodiophora brassicae*) 균주들에 대한 배추 품종들의 저항성 반응

조수정 · 심선아 · 장경수 · 최용호 · 김진철 · 최경자\*

한국화학연구원 산업바이오화학연구센터

## Resistance of Cultivars of Chinese Cabbage to *Plasmodiophora brassicae* Isolates of Several Races Collected in Korea

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

Chemical Biotechnology Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea

**Abstract.** Clubroot disease caused by *Plasmodiophora brassicae*, induces damage to cruciferous vegetables worldwide. For control of the disease, many CR (clubroot resistant) F<sub>1</sub> hybrid cultivars of Chinese cabbage have been bred and released in Korea. In this study, we determined the race of 10 field isolates of *P. brassicae* collected from ten regions in Korea using Williams' differential varieties and investigated the degree of resistance of 25 commercial CR cultivars of Chinese cabbage to the isolates. The clubroot pathogens were assigned into two (HS and YC), two (HN1 and HN2), two (DJ and SS) and four (GS, GN, JS, and PC) isolates for race 2, race 4, race 5, race 9, respectively. All CR cultivars showed similar response, resistant or susceptible, to each isolate and the *P. brassicae* isolates were divided into two groups. Among them, the DJ, GS, GN, HS, and JS isolates could not infect the CR cultivars. In contrast, the SS, HN1, HN2, PC, and YC isolates caused severe clubroot disease on the CR cultivars like susceptible cultivars. Even though they belong to the same race, the CR cultivars showed a different response to the pathogens. The results suggest that the breakdown of CR in Chinese cabbage has already occurred in cultivation areas of Korea and resistance source introduced in CR cultivars may be very limited. In addition, it is likely that resistance genes of Williams' differential varieties to *P. brassicae* are different from the gene of CR cultivars of Chinese cabbage used in the study.

**Additional key words:** *Brassica rapa*, breeding, clubroot, differential varieties, resistance gene

### 서 언

우리나라에서 배추(*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*)는 김치의 주재료로, 여름의 고령지 재배, 겨울의 난지 재배 그리고 봄 가을의 일반 재배를 통하여 연중 생산하고 있는 가장 중요한 채소 중 하나이다. 그런데 1990년대 후반부터 배추에 *Plasmodiophora brassicae* Woron.에 의한 뿌리혹병 (clubroot)이 심하게 발생하여 배추의 품질을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 생산량 감소를 초래하고 있다(Cho et al., 2003). *P. brassicae*는 인공배지에서 배양되지 않는 활물기생균으로, 배추뿐만 아니라 양배추, 무 등 거의 모든 십자화과 작물에

뿌리혹병을 일으켜 전 세계적으로 피해를 주고 있다. 뿌리혹병균은 병든 조직에 무수히 많은 휴면포자를 형성하고, 이것은 휴면포자로 토양에서 월동하는데 환경이 적합하면 7년 이상 생존한다고 알려져 있다(Karling, 1968). 배추 뿌리혹병을 방제하기 위해서는 살균제를 이용한 화학적 방제 및 석회질 시비를 통한 토양 pH 조정 등의 경종적 방법이 있지만 이러한 방법으로 완벽한 방제는 어렵다(Voorrips, 1995).

환경 및 경제적 측면에서, 배추 뿌리혹병을 방제하기 위한 가장 효과적인 방법 중 하나는 저항성 품종 재배인데, 우리나라에도 여러 종자회사에서 개발한 많은 저항성 품종들

\*Corresponding author: kjchoi@kriict.re.kr

※ Received 11 August 2011; Accepted 11 September 2011. 본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 채소병리검정지원사업단(과제번호: 609002-5호)의 지원에 의해 이루어진 것이다.

이 판매되고 있다. 배추의 뿌리혹병 저항성은 European fodder turnip인 Siloga, Milan White, Gelria 및 Debra로부터 도입되었으며, *B. rapa*에는 최소한 8개의 저항성 유전자가 있다고 보고되었다(Hirai 2006; Piao et al., 2009). Siloga로부터 *Crr1*, *Crr2* 및 *Crr4* 유전자가, Milan White로부터 *Crr3*이, Gelria R과 ECD02(136-8)로부터 각각 *CRb*와 *Cra* 유전자가, 그리고 Debra로부터 *CRk*와 *CRc* 저항성 유전자가 알려져 있다. 하지만 아직 정확한 유전자 분석과 역할에 대해서는 보고되어 있지 않다.

뿌리혹병균은 기주의 종 및 계통에 따라 다양한 병원성 반응을 보인다고 알려져 왔다(Buczacki et al., 1975; Tanaka et al., 1998; Williams, 1966). 따라서 뿌리혹병균의 레이스 동정을 위하여 양배추 2품종과 rutabaga 2품종을 이용하여 16개의 레이스로 구분하는 Williams(1966) 방법과 ECD(European clubroot differentials) 품종을 사용하는 방법이 유럽과 북미 지역에서 널리 사용되어 왔다(Buczacki et al., 1975). Yoshikawa (1981)에 의하면, 일본에서는 European fodder turnip을 이용하여 뿌리혹병에 저항성(CR, clubroot resistance)인 배추 품종을 50개 이상 육성하여 일본에 출시하였다. 그런데 저항성 배추 품종을 재배한 이후에 이들을 침해하는 뿌리혹병균이 출현하여 대부분의 CR 품종의 저항성이 무너지는 일이 발생했다(Kuginuki et al., 1999; Tanaka et al., 1998). 한편 Hatakeyama et al.(2004)은 뿌리혹병균의 레이스 동정을 위해 기존에 사용하여온 Williams 판별법보다 CR 배추 품종을 침해하는 뿌리혹병균에 저항성 차이를 보이는 CR 품종인 Super CR Hiroki와 Ryutoku 그리고 감수성 1품종을 이용하여 뿌리혹병균의 레이스를 동정하는 것이 더 효율적이며, 일본에는 3품종에서의 반응에 따라 4가지 그룹의 뿌리혹병균이 존재한다고 보고하였다. 하지만 우리나라에서는 아직 CR 배추를 침해하는 뿌리혹병균에 관한 자세한 보고가 없을 뿐만 아니라, 뿌리혹병균 레이스와 CR 배추 품종들의 저항성과의 관계도 알려지지 않았다.

본 연구에서는 뿌리혹병균의 레이스와 CR 배추의 뿌리혹병 저항성과의 관계를 규명하기 위하여, 우리나라 배추 주산지로부터 뿌리혹병균을 채집하고 Williams 판별품종에 따라 이들의 레이스를 동정하였으며, 여러 종자회사에서 판매하고 있는 뿌리혹병 저항성 배추 품종을 25종 구입하여 이들 균주에 대한 저항성을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 공시품종 및 육묘

여러 종자회사로부터, 뿌리혹병에 대한 저항성 품종으로

판매하는 배추품종 25종(‘대통배추’, ‘맞춤배추’, ‘부활배추’, ‘불암플러스배추’, ‘아름찬배추’, ‘올품배추’, ‘챔피온배추’, ‘추월배추’, ‘CR고냉지노랑’, ‘CR농심배추’, ‘CR맛배추’, ‘CR맛짱’, ‘CR명가배추’, ‘CR명품’, ‘CR안심배추’, ‘CR알찬’, ‘CR요시마사’, ‘CR장군배추’, ‘CR진심배추’, ‘CR청록배추’, ‘CR키요시’, ‘CR하계배추’, ‘CR황금배추’, ‘CR황록’, ‘CR황태자’)과 일반 품종 3종(‘강력여름배추’, ‘노랑김장배추’, ‘삼복엇갈이배추’)의 종자를 구입하였다. 5 × 8 육묘용 연결 포트(70 mL/pot, 범농사)에 원예용상토 5호(부농사)를 넣고 각 품종의 종자를 포트 당 1립씩 파종하여 온실(25 ± 5 °C)에서 10일 동안 재배한 묘를 실험에 사용하였다.

수집한 뿌리혹병균의 레이스 검정 실험은 Williams 판별 기주인 양배추 2종(Jersey Queen, Badger Shipper)과 rutabaga 2종(Laurentian, Wilhelmsburger)의 종자를 배추와 동일한 방법으로 파종하고 온실에서 14일간 재배한 후 실험에 이용하였다.

### *P. brassicae* 균주

2009년부터 2010년까지 대전시(DJ), 경기도 연천군(YC), 충청남도 서산시(SS), 충청북도 괴산시(GS), 전라남도 해남군(HN1, HN2) 그리고 강원도 강릉시(GN), 황성군(HS), 정선군(JS), 평창군(PC) 등의 배추 및 양배추 재배포장 10곳에서 전형적인 뿌리혹병을 보이는 뿌리를 채집하였다(Table 1). 채집한 시료는 -80 °C deep freezer에 보관하면서 실험에 사용하였다. 이들 중 연천, 정선 및 강릉 지역에서 채집한 균주들은 증식하여 실험에 사용하였다. 각 균주의 이병조직 1g으로부터 휴면포자를 수확하고, 감수성 배추 품종인 ‘노랑김장배추(문산토코리아사)’를 파종하여 온실에서 재배한 본엽 2엽기 육묘 100주에 준비한 뿌리혹병균을 접종하였다. 접종한 식물은 20 °C 항온항습실에서 1주일 동안 배양한 후 큰 포트에 이식하여 온실(20 ± 5 °C)에서 60일 동안 재배한 뿌리를 수확하고 사용할 때까지 deep freezer에 저장하였다.

뿌리혹병균의 접종을 위하여, 보관 중인 이병조직을 꺼내어 증류수로 수 차례 세척하여 이물질을 제거한 후 여기에 멸균수를 첨가하여 Warning blender로 마쇄하였다. 그리고 2겹의 가제로 여과하여 식물조직을 제거한 뿌리혹병균의 포자 현탁액을 준비하였다. 현탁액의 포자 농도를 조사하기 위하여 광학현미경 하(300배)에서 hemocytometer를 이용하여 휴면포자의 수를 측정하였다(Jo et al., 2010). 그리고 멸균수로 희석하여 실험하고자 하는 농도의 포자현탁액을 제조하였는데, 뿌리혹병균의 레이스 검정 실험은 1.6 × 10<sup>8</sup> spores · mL<sup>-1</sup>로 그리고 이들에 대한 배추 품종들의 저항성 반응 실험은 8 × 10<sup>7</sup> spores · mL<sup>-1</sup>이 되도록 하였다.

**Table 1.** List of 10 field isolates of *Plasmiodiophora brassicae* used in this study.

Isolate	Districts of collection	Host	Year
DJ	Daejeon-si	Chinese cabbage	2009
GS	Goesan-gun, Chungcheongbuk-do	cabbage	2009
GN	Gangneung-si, Gangwon-do	Chinese cabbage	2009
HN1	Haenam-gun, Jeollanam-do	Chinese cabbage	2010
HN2	Haenam-gun, Jeollanam-do	Chinese cabbage	2010
HS	Hoengseong-gun, Gangwon-do	Chinese cabbage	2010
JS	Jeongseon-gun, Gangwon-do	Chinese cabbage	2009
PC	Pyeongchang-gun, Gangwon-do	Chinese cabbage	2010
SS	Seosan-si, Chungcheongnam-do	Chinese cabbage	2009
YC	Yeoncheon-gun, Gyeonggi-do	Chinese cabbage	2009

**Table 2.** Race determination of 10 field isolates of *Plasmiodiophora brassicae* using the differential varieties of Williams (1966)<sup>2</sup>.

Host	<i>P. brassicae</i> isolate									
	DJ	GN	GS	HN-1	HN-2	HS	JS	PC	SS	YC
Jersey Queen	0.0 ± 0.0 <sup>Y</sup> (R <sup>X</sup> )	0.7 ± 0.8 (R)	0.5 ± 0.5 (R)	4.0 ± 0.0 (S)	4.0 ± 0.0 (S)	4.0 ± 0.0 (S)	0.7 ± 0.6 (R)	0.9 ± 0.3 (R)	0.3 ± 0.4 (R)	3.9 ± 0.3 (S)
Badger Shipper	0.0 ± 0.0 (R)	0.0 ± 0.0 (R)	0.0 ± 0.0 (R)	4.0 ± 0.0 (S)	3.5 ± 0.5 (S)	3.8 ± 0.4 (S)	0.0 ± 0.4 (R)	0.1 ± 0.3 (R)	0.0 ± 0.0 (R)	3.7 ± 0.5 (S)
Laurentian	0.7 ± 0.5 (R)	3.5 ± 0.7 (S)	3.9 ± 0.3 (S)	4.0 ± 0.0 (S)	4.0 ± 0.0 (S)	4.0 ± 0.0 (S)	2.7 ± 0.9 (S)	3.4 ± 0.8 (S)	0.7 ± 0.8 (R)	3.8 ± 0.6 (S)
Wilhelmsbuger	0.1 ± 0.0 (R)	2.4 ± 0.5 (S)	2.4 ± 0.7 (S)	4.0 ± 0.0 (S)	4.0 ± 0.0 (S)	0.6 ± 0.4 (R)	2.6 ± 0.5 (S)	2.6 ± 0.5 (S)	0.4 ± 0.4 (R)	0.2 ± 0.4 (R)
Race	5	9	9	4	4	2	9	9	5	2

<sup>2</sup>14-day-old seedlings were inoculated with *P. brassicae* by drenching the roots with the spore suspension of each isolate to give inoculum density of  $8.0 \times 10^8$  spores-pot<sup>-1</sup>. The plants were incubated in a growth chamber at 20°C for 3 days with 12 h 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.

<sup>Y</sup>Each value represents the mean (± standard deviation) of two runs with 10 replicates each.

<sup>X</sup>S, susceptible (disease index ≥ 1.0); R, resistant (disease index < 1.0).

### 뿌리혹병균 접종 및 병조사

온실에서 재배한 배추 및 Williams 판별 기주 4종에 각각의 뿌리혹병균 포자현탁액을 포트 당 5mL씩 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. 배추는 접종 5주 후에 그리고 레이스 판별품종은 6주 후에 뿌리에 발생한 뿌리혹병 정도에 따라 발병도를 조사하였다. 조사기준은 0 = 뿌리혹병 발생이 없음, 1 = 측근에 뿌리혹이 착생되어 혹의 크기가 적고 서로 독립하여 존재, 2 = 측근에 뿌리혹이 착생되며 혹의 크기가 비교적 큼, 3 = 주근에 뿌리혹이 착생되며 서로 접합되고 혹의 크기가 큼, 4 = 주근에 뿌리혹이 착생되며 서로 접합되고 혹의 크기가 매우 큼 등의 5단계로 하였다(Kuginuki et al., 1999; Suwabe et al., 2003).

뿌리혹병균의 레이스 검정 실험에서는 평균 발병도가 1.0 이하일 때는 저항성으로, 그리고 1.0 초과이면 감수성으로

판단하였으며, 4개 기주에서의 반응을 조사한 후에 Williams 레이스 판별기준표에 따라 레이스를 동정하였다(Williams, 1966). 본 연구에서는 포장 균주를 사용하여 실험하므로 뿌리혹병균의 레이스 동정과 이들 균주에 대한 28종 배추 품종의 저항성 실험은 뿌리혹병균을 동시에 접종하였다. 그리고 모든 실험은 10반복으로 2회 실시하였다.

### 결과 및 고찰

#### 뿌리혹병균의 레이스

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, 4, 5 및 9로 확인되었다(Table 2). 그리고 실험한 모든 균주는 감수성 품종인 '강력여름배추', '삼복엇같이배추' 및 '노랑

**Table 3.** The degree of resistance of 28 commercial Chinese cabbage cultivars to 10 field isolates of *Plasmodiophora brassicae*<sup>z</sup>.

Cultivar	Trait	HS (Race 2)	YC (Race 2)	HN1 (Race 4)	HN2 (Race 4)	DJ (Race 5)	SS (Race 5)	GN (Race 9)	JS (Race 9)	GS (Race 9)	PC (Race 9)
Ahreumchan	CR <sup>y</sup>	0.3 ± 0.6 <sup>x</sup>	3.5 ± 0.7	4.0 ± 0.0	3.6 ± 0.7	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.4 ± 0.5	0.3 ± 0.9	0.0 ± 0.0	3.8 ± 0.4
Buhwal	CR	0.4 ± 0.5	3.8 ± 0.4	4.0 ± 0.0	3.6 ± 0.5	0.2 ± 0.6	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3
Bulam Plus	CR	0.1 ± 0.3	3.9 ± 0.3	4.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.4 ± 0.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.9	4.0 ± 0.0
Champion	CR	0.7 ± 0.9	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.8 ± 0.4	0.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.3 ± 0.0	3.9 ± 0.3
Chuwol	CR	0.6 ± 0.9	3.7 ± 0.6	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.2 ± 0.6	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.9	4.0 ± 0.0
CR-Alchan	CR	0.6 ± 1.0	3.4 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.2 ± 0.6	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.5 ± 0.9	0.4 ± 0.8	0.3 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Ansim	CR	0.3 ± 0.6	3.8 ± 0.4	4.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.1 ± 0.3	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Cheongrok	CR	0.3 ± 0.6	3.6 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.7 ± 0.5	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.1 ± 0.3	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	3.7 ± 0.5
CR-Gonaengiinorang	CR	0.6 ± 0.7	3.5 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.2 ± 0.7	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.2 ± 0.4	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Hagye	CR	0.2 ± 0.4	3.5 ± 0.7	4.0 ± 0.0	3.6 ± 0.8	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Hwanggeum	CR	0.1 ± 0.3	3.9 ± 0.3	4.0 ± 0.0	3.3 ± 0.8	0.5 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3
CR-Hwangrok	CR	0.3 ± 0.5	3.1 ± 0.9	4.0 ± 0.0	2.4 ± 0.9	0.0 ± 0.8	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6
CR-Hwangtaeja	CR	0.5 ± 0.5	3.8 ± 0.4	4.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6	0.4 ± 0.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Janggun	CR	0.6 ± 0.7	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.8 ± 0.4	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.3 ± 0.5	0.2 ± 0.6	0.0 ± 0.0	3.8 ± 0.4
CR-Jinsim	CR	0.2 ± 0.4	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.5 ± 0.7	0.2 ± 0.6	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.4 ± 1.2	3.6 ± 0.5
CR-Kiyoshi	CR	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	4.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.3 ± 0.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Mat	CR	0.5 ± 0.5	3.6 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.2 ± 0.4	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Matijang	CR	0.6 ± 0.7	3.3 ± 0.6	4.0 ± 0.0	3.6 ± 0.5	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Myeongga	CR	0.9 ± 0.5	3.6 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.0 ± 0.9	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.2 ± 0.4	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3
CR-Myeongpum	CR	0.5 ± 0.8	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	3.8 ± 0.6	0.7 ± 0.6	0.1 ± 0.3	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
CR-Nongshim	CR	0.3 ± 0.6	3.5 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.3 ± 0.8	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 1.1	3.1 ± 1.0
CR-Yosimasa	CR	0.5 ± 0.5	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.2 ± 0.7	0.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.3	3.9 ± 0.3
Daetong	CR	0.5 ± 0.7	3.8 ± 0.6	4.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.2 ± 0.4	0.0 ± 0.0	0.3 ± 0.6	3.9 ± 0.3
Matchum	CR	0.2 ± 0.4	3.6 ± 0.7	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0
Olpum	CR	0.1 ± 0.3	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	0.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	3.3 ± 0.8
Gangryeokyeoreum	-	4.0 ± 0.0	3.6 ± 0.7	4.0 ± 0.0	3.7 ± 0.6	2.6 ± 0.7	4.0 ± 0.0	3.9 ± 0.3	3.3 ± 0.6	3.2 ± 0.0	3.9 ± 0.3
Noranggimjang	-	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	4.0 ± 0.0	3.0 ± 0.8	4.0 ± 0.0	3.8 ± 0.4	3.8 ± 0.4	3.9 ± 0.0	4.0 ± 0.0
Sambokeotgalyi	-	3.8 ± 0.4	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.0	3.8 ± 0.4	2.1 ± 0.3	4.0 ± 0.0	3.8 ± 0.4	3.5 ± 0.5	3.7 ± 0.0	4.0 ± 0.0

<sup>z</sup>10-day-old seedlings of Chinese cabbage were inoculated with *P. brassicae* by drenching the roots with the spore suspension of each isolate to give inoculum density of  $4.0 \times 10^8$  spores-pot<sup>-1</sup>. The plants were incubated in a growth chamber at 20°C for 3 days with 12 h light a day and then transferred to a greenhouse (20 ± 5°C). Five weeks after inoculation, disease severity of the 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.

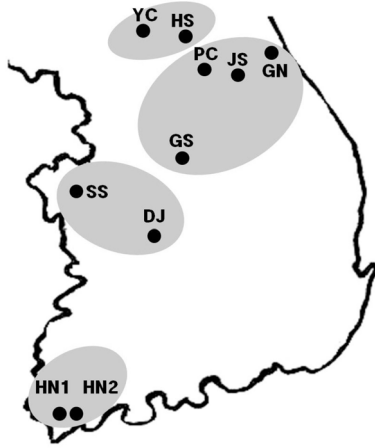
<sup>y</sup>CR, resistant cultivar to clubroot commercialized by each seed company.

<sup>x</sup>Each value represents the mean (± standard deviation) of two runs with 10 replicates each.

김장배추'에 높은 발병도의 뿌리혹병 발생을 보이므로, 실험한 균주들은 모두 병원성이 있는 뿌리혹병균이라는 것을 알 수 있었다(Table 3). HS와 YC 균주들은 4종 기주 중 'Wilhelmsburger'에만 저항성을 나타내고 나머지 품종에서는 뿌리혹병이 많이 발생하여 레이스 2로 동정되었으며, GN, JS, PC 및 GS 균주들은 rutabaga 두 품종에서는 병원성을 나타내었지만, 양배추 두 품종은 이들 균주에 저항성을 보여 레이스 9로 확인되었다(Table 2). 한편, HN1과 HN2 균주는 모든 기주에 병원성을 나타내는 레이스 4였으며, 이와 반대로 DJ와 SS 균주는 모든 기주가 이들에 저항성이

로 레이스 5로 동정되었다. 우리나라에서 레이스 2와 4는 가장 우점하는 레이스이며, 레이스 9 또한 배추에서 많이 발견되는 레이스 중 하나이다(Cho et al., 2003; Jang et al., 2007). 한편 레이스 5는 우점 레이스는 아니지만 배추와 양배추 그리고 순무에서 보고된 바 있다(Cho et al., 2003).

한편 본 실험의 뿌리혹병균들은 Fig. 1에서와 같이 지리적으로 유사한 지역에서 수집한 균주들은 동일한 레이스로 동정되었다(Fig. 1). 기존에 보고된 것과 달리 이 결과는 뿌리혹병균의 이동 및 분화가 빈번하지 않다는 것을 제시하고 있으나, 이것은 다양한 지역에서 많은 균주를 채집하여 확



**Fig. 1.** Field isolates of *Plasmodiophora brassicae* collected from ten regions in Korea. The grouped isolates were determined as same races by differential varieties of Williams. DJ, Daejeon; GS, Goesan; GN, Gangneung; HN, Haenam; HS, Hoengseong; JS, Jeongseon; PC, Pyeongchang; Ss, Seosan; YC, Yeoncheon.

인할 필요가 있다(Buczacki et al., 1975; Jones et al., 1982).

#### 포장 균주들에 대한 CR 품종의 저항성

여러 지역에서 수집한 뿌리혹병균 10종에 대한 CR 배추 품종 25종의 저항성 정도를 조사한 결과, 모든 CR 배추 품종은 접종한 균주에 따라 저항성 혹은 감수성 반응을 나타냈다(Table 3). 그리고 각 균주에 의해 발생하는 25개 CR 품종의 뿌리혹병 발병도는 거의 유사하였다.

실험한 뿌리혹병균들은 CR 품종에서의 반응에 따라 두 그룹으로 나눌 수 있었다(Table 3). 그룹 1에 속하는 DJ, GS, GN, HS 및 JS 균주를 CR 배추 품종에 접종한 경우에는 모든 CR 품종의 발병도가 1.0 미만이었으므로, CR 배추들은 이들 균주에 저항성임을 알 수 있었다. 반면 그룹 2에 속하는 SS, HN1, HN2, PC 및 YC 균주에 의해서는 모든 CR 품종이 3.5 이상의 높은 발병도를 보여, 이들 뿌리혹병균에 의해 CR 배추 품종의 저항성이 무너지는 것을 알 수 있었다. 일본에서는 50품종 이상의 CR 배추 품종이 개발되었으나 거의 모든 CR 배추 품종의 저항성이 무너졌다(Kuginuki et al., 1999; Tanaka et al., 1998). 한편, 우리나라에서는 1995년부터 CR 배추 품종이 개발되었으며, 현재에는 우리도 일본과 마찬가지로 다양한 CR 배추 품종을 침해하는 뿌리혹병균이 포장에 널리 존재하고 있다고 생각되었다.

*B. rapa*에 속하는 European fodder turnip인 Siloga, Gelia R, Milan White 및 Debra에 뿌리혹병 등에 대한 저항성 유전자가 존재한다고 알려져 있었다. 일본에서는 이들로부터 저항성 유전자를 도입하여 CR 배추를 육성하였다고 알려져 있으나, 자세한 육성 과정에 대해서는 보고된 바 없다(Yoshikawa,

1981). CR 배추에 병을 일으키는 뿌리혹병균이 출현한 이후에 포장 균주를 채집하여 CR 배추 품종들의 저항성을 조사한 결과, CR 품종들은 크게 두 그룹으로 구분되며 이들 품종의 반응에 따라 뿌리혹병균들은 4그룹에 속하였다(Hatakeyama et al., 2004; Kuginuki et al., 1999). 그룹 1은 두 CR 품종 모두를 침해하는 균주, 그룹 2와 그룹 3은 한쪽 품종에만 병을 일으키는 균주, 그리고 그룹 4는 양쪽 CR 품종을 모두 감염할 수 없는 균주로 구분하였다. 하지만 우리의 결과에서는 여러 회사로부터 CR 배추 품종을 구입하였음에도 불구하고 각 균주에 대한 CR 품종들의 반응은 거의 차이가 없었다(Table 3). 따라서 실험한 CR 배추 품종들의 저항성 유전자원은 다양성이 낮으며, 거의 동일할지도 모른다고 생각되었다.

European fodder turnip의 뿌리혹병에 대한 저항성 유전자는 Siloga, Milan White, Gelria 및 Debra 등에 8개 이상이 있다(Hirai, 2006; Piao et al., 2009). 그리고 많은 학자들은 *B. rapa*의 뿌리혹병 저항성은 이들은 단인자 우성 유전자에 의한 것이라고 보고하였다(Fuchs and Sacristán, 1996; Hirai et al., 2004; Piao et al., 2002; Strandberg and Williams, 1967; Suwabe et al., 2003). 그러나 Yoshikawa(1981)는 *B. rapa*에서 1개의 주동 유전자와 몇 개의 보족 유전자가 뿌리혹병에 대한 저항성을 나타낸다고 하였다. 한편, 배추의 뿌리혹병 저항성 유전은 단인자 우성인 하나의 저항성 유전자가 저항성 반응에 관여한다고 알려져 있다(James and Williams, 1980; Kuginuki et al., 1999; Yoshikawa, 1993). 그러나, 실제로 European fodder turnip들로부터 배추에 도입된 CR 저항성 유전자는 무엇인지 혹은 한 품종에 몇 개의 저항성 유전자가 도입되었는지에 대해서는 보고된 바 없다. 본 연구에서 그룹 1에 속하는 GN, JS, GS, PC 및 DJ 균주에 대해 CR 품종들은 모두 고도의 저항성을 나타내었으나, 그룹 2에 속하는 SS, HN1, HN2, PC 및 YC 균주들은 실험한 CR 배추 품종에서 감수성 품종과 거의 동일한 정도로 높은 뿌리혹병 발생을 보였다(Table 3). Cho et al.(2008)은 CR 새로운 품종의 뿌리혹병 저항성이 단인자 우성 유전자에 의해 나타낸다고 하였으며, Lee et al.(2001)도 육성한 CR 배추 품종이 단인자 우성 유전을 한다고 하였다. 따라서 본 실험의 CR 배추 품종들도 단인자 우성의 1개 유전자가 뿌리혹병에 대한 저항성을 나타내고, 이 유전자를 극복할 수 있는 뿌리혹병균의 출현에 의해 CR 품종들의 저항성이 무너진다고 생각되었다.

본 연구에서는 2개 이상의 균주가 포함된 4종 레이스의 뿌리혹병균에 대한 CR 배추 품종의 저항성을 조사하였는데, 이들 중 레이스 4를 제외한 3개 레이스의 뿌리혹병균들



**Fig. 2.** Clubroot development on cultivars of Chinese cabbage inoculated with HS (A-D) and YC (E-H) isolates of *Plasmodiophora brassicae*. A and E, Ahreumchan; B and F, CR-Alchan; C and G, CR-Janggun; D and H, Sambokeotgalyi.

은 레이스가 동일함에도 불구하고 CR 품종의 반응은 상반되게 나타났다(Table 3). HS와 YC 균주는 모두 레이스 2임에도 불구하고 HS 균주에 대해서는 CR 배추 품종이 저항성 반응을 나타냈으나, YC 균주에는 감수성을 나타내었다. 또한 DJ와 SS 균주는 레이스 5인데 CR 배추 품종이 DJ에 대해서는 저항성을 보였으나, HM 균주에는 감수성을 나타내었다(Fig. 2). 그리고 레이스 9인 PC, GN, JS 및 GS 균주 중 PC 균주를 제외한 나머지 3개 균주들에는 저항성을 보였으나, PC 균주에는 감수성이었다. 이는 같은 레이스의 균주이지만 병원균의 분화로 인하여 CR 배추 품종에 대한 병원성이 달라졌다고 추측되었다. Williams 판별기주에 의한 레이스 2 뿌리혹병균은 ‘Wilhelmsburger’의 저항성 유전자에 반응하여 기주를 감염할 수 없고, 레이스 9는 ‘Jersey Queen’과 ‘Badger Shipper’에 그리고 레이스 5는 4종 기주 모두의 저항성 유전자에 반응하여 병을 일으키지 못한다. 따라서 본 연구에서 사용된 뿌리혹병균들 중 같은 레이스이나 CR 품종의 반응이 다른 균주를 포함하는 레이스 2, 5 및 9에는 Williams 판별 기주 4종의 저항성 유전자들에 반응하는 균주가 모두 포함되어 있다. 그러므로 본 연구의 CR 배추(*B. rapa* ssp. *pekinensis*)의 뿌리혹병 저항성 유전자는 Williams 판별 기주인 양배추(*B. oleracea*) 2종(‘Jersey Queen’, ‘Badger Shipper’)과 rutabaga(*B. napobrassica*) 2종(‘Laurentian’, ‘Wilhelmsburger’)의 저항성 유전자는 다르다고 생각되었다.

우리나라의 CR 배추 품종 저항성 유전자의 종류와 역사는 알려지지 않지만(Cho et al., 2008), 우리나라의 CR배추 품종 육종에 사용되고 있는 저항성 유전자는 일본에서 유입되었다고 알려져 있다(Hirai et al., 2004). 본 연구에서 특정 뿌리혹병균에 대하여 모든 CR 배추 품종이 유사한 반응을 나타내는 것으로 볼 때, 육종회사에서 사용하는 뿌리혹병

저항성 유전자 source가 거의 동일하거나 상당히 단순하리라 생각되었다. 그리고 채집한 균주의 50%가 개발된 CR 배추 품종의 저항성을 무너뜨리는 뿌리혹병균이므로, 저항성 품종을 침해하는 균주가 이미 포장에 많이 분포하고 있으리라 생각된다. 따라서 뿌리혹병균 저항성 품종 육종에 다양한 뿌리혹병 저항성 유전자원을 이용하는 것이 바람직하며, gene pyramiding에 의해 2개 이상의 유전자가 도입된 저항성 품종을 개발하는 것이 시급하다.

## 초 록

*Plasmodiophora brassicae*에 의해 발생하는 뿌리혹병은 전세계 십자화과 작물에 많은 피해를 주고 있다. 본 연구에서는 우리나라 여러 지역으로부터 10개의 뿌리혹병균을 채집하여 Williams 판별품종을 이용하여 레이스를 검정하고, 이들 균주에 대한 뿌리혹병 저항성(CR) 배추 품종 25개의 저항성 정도를 조사하였다. 실험한 뿌리혹병균 중 HS와 YC 균주는 레이스 2, HN1과 HN2는 레이스 4, DJ와 SS 균주는 레이스 5 그리고 GS, GN, JS 및 PC 균주는 레이스 9로 동정되었다. 시판 중인 25개 CR 배추 품종의 이들 균주에 대한 저항성을 조사한 결과, 각 균주에 대하여 25개 CR 품종은 거의 동일하게 반응하였으며, 뿌리혹병균의 레이스와 관계없이 두 종류의 반응을 나타냈다. DJ, GS, GN, HS 및 JS 등의 5개 균주에는 저항성 반응을 나타내었으며, SS, HN1, HM2, PC 및 YC 균주에 의해서는 감수성 품종과 동일한 정도의 뿌리혹병 발생을 보였다. 이상의 결과로부터 우리나라 포장에는 CR 배추를 감염하는 뿌리혹병균이 이미 존재하고 있으며, 실험한 CR 품종들의 저항성 유전자원은 매우 단순하다고 생각되었다. 또 동일한 레이스의 뿌리혹병균도



CR 품종에 다른 반응을 나타내므로 CR 배추 품종의 저항성 유전자는 Williams 판별 기주의 저항성 유전자와 다르다고 추정된다.

추가 주요어 : *Brassica rapa*, 육종, 뿌리혹병, 판별 기주, 저항성 유전자

## 인용문헌

- Buczacki, S.T., H. Toxopeus, P. Mattusch, T.D. Johnston, G.R. Dixon, and L.A. Hobolth. 1975. Study of physiologic specialization in *Plasmodiophora brassicae*: Proposals for attempted rationalization through an international approach. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 65:295-303.
- Cho, W.D., W.G. Kim, and K. Takahashi. 2003. Occurrence of clubroot in cruciferous vegetable crops and races of the pathogen in Korea. *Plant Pathol. J.* 19:64-68.
- Cho, K.S., S.Y. Hong, Y.H. Han, B.K. Yoon, S.R. Ryu, and J.G. Woo. 2008. Genetic analysis of clubroot resistance in Chinese cabbage using single-spore isolates of *Plasmodiophora brassicae* and development of RAPD markers linked to its resistance gene. *J. Crop Sci. Biotech.* 11:101-106.
- Fuchs, H. and M.D. Sacristán. 1996. Identification of a gene in *Arabidopsis thaliana* controlling resistance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) and characterization of the resistance response. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 9:91-97.
- Hatakeyama, K., M. Fujimura, M. Ishida, and T. Suzuki. 2004. New classification method for *Plasmodiophora brassicae* field isolates in Japan based on resistance of F<sub>1</sub> cultivars of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.) to clubroot. *Breed. Sci.* 54:197-201.
- Hirai, M. 2006. Genetic analysis of clubroot resistance in *Brassica* crops. *Breed. Sci.* 56:223-229.
- Hirai, M., T. Harada, N. Kubo, M. Tsukada, K. Suwabe, and S. Matsumoto. 2004. A novel locus for clubroot resistance in *Brassica rapa* and its linkage markers. *Theor. Appl. Genet.* 108:639-643.
- James, R.V. and P.H. Williams. 1980. Clubroot resistance and linkage in *Brassica campestris*. *Phytopathology* 70:776-779.
- Jang, S.J., S.H. Heo, C.S. Jang, S.W. Kang, Y.P. Lim, and H.G. Kim. 2007. Race and dominant population of Chinese cabbage clubroot pathogen, *Plasmodiophora brassicae* in Korea. *Res. Plant Dis.* 13:45-49.
- Jo, S.-J., J.S. Kyoung, Y.H. Choi, J.-C. Kim, and G.J. Choi. 2010. Convenient screening method of Chinese cabbage for resistance to *Plasmodiophora brassicae* using soil-drenching inoculation. *Res. Plant Dis.* 16:279-284.
- Jones, D.R., D.S. Ingram, and G.R. Dixon. 1982. Characterization of isolates derived from single resting spores of *Plasmodiophora brassicae* and studies of their interaction. *Plant Pathol.* 31:239-246.
- Karling, J.S. 1968. The Plasmodiophorales. Hafner Publ. Co., New York, USA p. 239.
- Kuginuki, Y., H. Yoshikawa, and M. Hirai. 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.
- Lee, S.-S., H.-B. Suh, and W.-J. Choi. 2001. Population improvement for multi-resistance to turnip mosaic virus and clubroot disease by recurrent selection in Chinese cabbage. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 42:685-688.
- Piao, Z., N. Ramchiary, and Y.P. Lim. 2009. Genetics of clubroot resistance in *Brassica* species. *J. Plant Growth Regul.* 28:252-264.
- Piao, Z.Y., Y.J. Park, S.R. Choi, C.P. Hong, J.Y. Park, and Y.P. Lim. 2002. Conversion of AFLP marker linked to clubroot resistance gene into SCAR marker. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 43:653-659.
- Strandberg, J.Q. and P.H. Williams. 1967. Inheritance of clubroot resistance in Chinese cabbage. *Phytopathology* 57:330.
- Suwabe, K., H. Tsukada, H. Iketani, K. Hatakeyama, M. Fujimura, T. Nunome, H. Fukuoka, S. Matsumoto, and M. Hirai. 2003. Identification of two loci for resistance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Woronin) in *Brassica rapa* L. *Theor. Appl. Genet.* 107:997-1002.
- Tanaka, S., S. Fujiyama, S. Shigemori, A. Nakayama, S. Ito, and I.M. Kameya. 1998. Pathogenesis of isolates of *Plasmodiophora brassicae* from Japan. (1) Race and pathogenesis in clubroot resistant cultivars. *Proc. Assoc. Plant Protect. Kyushu* 44:15-19.
- Voorrips, R.E. 1995. *Plasmodiophora brassicae*: Aspects of pathogenesis and resistance in *Brassica oleracea*. *Euphytica* 83:139-146.
- 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. 1981. Breeding for clubroot resistance in Chinese cabbage. p. 405-413. In: N.S. Talekar and T.D. Griggs (eds.). Chinese cabbage. *Proc. 1st Int. Symp.*, Tsukuba, Japan.
- Yoshikawa, H. 1993. Studies on breeding of clubroot resistance in cole (Cruciferae) crop. *Bull. Natl. Res. Inst. Veg., Orn. Plants & Tea Japan, Ser. A, No. 7*:1-165.