

고추 풋마름병에 대한 효율적인 저항성 검정법 확립

Development of an Efficient Bioassay Method to Evaluate Resistance of Chili Pepper Cultivars to *Ralstonia solanacearum*

황성민 · 장경수 · 최용호 · 김헌 · 최경자*

한국화학연구원 친환경신물질연구센터

***Corresponding author**

Tel: +82-42-860-7434

Fax: +82-42-861-4913

E-mail: kjchoi@kriict.re.kr

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

Center for Eco-friendly New Material, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 34114, Korea

Bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum* is an important disease in cultivation of chili pepper, causing plant death and significant yield losses. Cultivation of disease-resistant varieties is the most suitable measure to control bacterial wilt of chili pepper. To establish an efficient screening method for resistant chili pepper to *R. solanacearum*, six resistant or susceptible cultivars to the *R. solanacearum* were selected and the development of bacterial wilt on the cultivars according to several conditions was investigated. Drenching bacterial suspension into the cut roots using a scalpel was more simple and effective to distinguish resistant and susceptible cultivars than inoculation methods of root-dipping or soil-drenching without wounding. A resistant pepper, 'MC4' to *R. solanacearum* showed high resistance under the developed conditions which were 21- to 28-day-old pepper inoculated with 1×10^8 cfu/ml of bacterial suspension. On the other hands, the susceptible cultivars represented high disease severity under the conditions. These results indicated that we developed an efficient method to evaluate resistance of chili pepper cultivars against bacterial wilt. In addition, we successfully evaluated resistance degree of 140 commercial chili pepper cultivars to *R. solanacearum* using the developed method.

Keywords: Bacterial wilt, Breeding, *Capsicum annuum*, Disease resistance, Inoculation method

Received August 8, 2017

Revised August 28, 2017

Accepted September 4, 2017

서론

고추(*Capsicum annuum* L.)는 가지과 작물로 국내 조미 채소 중 가장 많이 재배되는 고소득 작물이다. 그런데 연작재배로 인해 토양 및 재배지역 내의 병원균 밀도가 증가하여 다양한 병원균에 노출되어 많은 피해를 입고 있다. 고추에 발생하는 주요 병해로는 탄저병, 흰가루병 등의 균류병, 유사균류병인 역병, 풋

마름병 및 세균점무늬병 등의 세균병, 다양한 바이러스에 의한 병해 그리고 *Meloidogyne* spp.에 의한 몇 가지 뿌리혹선충병 등이 보고되어 있다(The Korean Society of Plant Pathology, 2009).

고추에 풋마름병을 일으키는 *Ralstonia solanacearum*은 열대, 아열대, 온대 기후지역에 분포하고 있으며, 고추, 토마토 등의 가지과 작물을 비롯한 다양한 작물에 병을 일으키는 넓은 기주 범위를 가지는 병원균이다(Hayward, 1991). 또한 *R. solanacearum*은 토양에서 오랫동안 생존할 수 있는 토양전염성 병원균으로(Hayward, 1991; Ito 등, 1998), 식물의 뿌리나 줄기에

Research in Plant Disease

pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

www.online-rpd.org

생긴 상처를 통하여 식물체 내부로 침입하고(Vasse 등, 1995; Wallis와 Truter, 1978) 물관으로 이동하여 식물 물관을 폐색하여 시들음을 발생시켜 식물을 고사시키는 것으로 알려져 있다(Denny와 Hayward, 2001).

*R. solanacearum*에 의해 발생하는 고추 풋마름병은 초기 감염증상이 고추 역병과 유사하여 병 진단에 혼란을 주고 있으며, 뚜렷한 방제 방법이 없어 고추 풋마름병에 의한 피해 면적이 계속 늘어나고 있다(Kim 등, 2012; Park과 Kim, 1991). 고추 풋마름병에 대한 방제 방법으로는 chloropicrine, methyl bromide 또는 dazomet 혹은 증기 등에 의한 토양소독 그리고 비기주 작물과 윤작하는 경종적 방법이 알려져 있으나(Lee 등, 2015b; Michel 등, 1997), 병원균의 기주범위가 넓어 대체 작물을 선발하기도 어렵고 방제효과가 효과적이지 않을 뿐만 아니라 환경오염 등에 대한 부작용으로 고추 풋마름병 방제에 어려움이 있다. 오늘날에는 식물병을 방제하기 위한 방법으로 방제 효과가 높으며, 비용이 적게 들고, 장기적으로 환경친화적인 방제방법으로 인식 되고 있는 저항성 품종이나 대목을 이용한 접목 재배 방법을 선호하고 있으며 이에 관한 연구가 많이 진행되고 있다(Balatero 등, 2005; Kinloch와 Hinson, 1972; Rhoades, 1976). 특히 고추 풋마름병과 관련해서는 고추 유전자원의 풋마름병 저항성 스크리닝을 통한 저항성 유전자원 선발 및 저항성 품종을 이용한 친환경적 방제 방법에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Goth 등, 1983; Han 등, 2000; Jang 등, 2012; Kim 등, 1998; Lim과 Kim, 1994; Peter, 1984; Tran과 Kim, 2012; Wai 등, 2013).

*R. solanacearum*는 식물의 기주 범위에 따라 크게 5개의 race로 구분하는데(He 등, 1983), 감자, 토마토, 고추 등 기주범위가 제한된 race 3과 기주범위가 상당히 광범위한 race 1이 알려져 있다(Huang 등, 2009; Schonfeld 등, 2003). 또한 당류 탄소원의 분해 능력에 따라 1, 2, 3, 4, 5 등 다양한 생리형(biovar)으로 분류된다(Buddenhagen 등, 1962; Hayward, 1991). 국내에서 토마토로부터 분리한 71개 *R. solanacearum*은 biovar 3과 biovar 4로 동정되었으며(Yun 등, 2004), Lim 등(2008)은 가지에서 분리한 48개의 균주도 biovar 3과 4였다고 보고하였다. 또한 토마토와 고추로부터 분리된 35개 균주는 기주와 관계없이 모두 biovar 4였으며(Seo 등, 2007), 다양한 작물에서 분리한 478개 *R. solanacearum* 균주 중 고추 풋마름병관련 균주들은 biovar 3과 4로 동정되었으며 모두 race 1에 속하였다(Jeong 등, 2007).

Matos 등(1990)에 의해 보고된 'MC4'와 'MC5' 그리고 Malaysian accession 'LS2341' (Mimura 등, 2008) 등이 풋마름병 저항성으로 알려져 있다. 특히 'MC4'는 biovar 1, 3 형질을 가지는 *R. solanacearum*에 대해 풋마름병 저항성을 가지며, 일본의 'Mie-

Midori' 저항성 품종(Matsunaga와 Monma, 1999)과 함께 고추 품종의 육종 소재로 많이 이용되고 있다(Lopes 등, 2005; Quezado-Soares와 Lopes, 1995). 국내에서는 가지, 토마토, 고추로부터 분리한 *R. solanacearum* 균주들의 race 및 생리형 동정에 관해서는 보고되었으나(Jeong 등, 2007; Lim 등, 2008; Seo 등, 2007; Yun 등, 2004), 고추의 풋마름병 저항성에 관한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구는 풋마름병에 대한 새로운 저항성 육종 소재의 발굴과 저항성 품종의 개발을 위한 효율적인 고추 풋마름병 저항성 검정 방법을 개발하기 위하여, 저항성 및 감수성 고추 품종 및 계통('무한질주', '미팅', '부강', '신세계', 'MC4', '수비초')을 선발하고, 접종 방법, 접종하는 고추의 생육시기, 접종원 농도 등의 발병 조건에 따른 이들 품종에서의 풋마름병 발생을 조사하여 고추 풋마름병 저항성 검정법을 확립하였고, 이 방법을 이용하여 시판 고추 품종 140개의 풋마름병에 대한 저항성 정도를 조사하였다.

재료 및 방법

균주 및 생리형(biovar) 검정. 고추로부터 분리한 *R. solanacearum* KACC 10711 (SL1931) 균주를 농업유전자원정보센터(Korea Agricultural Culture Collection, KACC, Jeonju, Korea)에서 분양받아 실험에 사용하였다.

R. solanacearum KACC 10711 균주의 생리형 검정은 단당류 알코올 및 이당류 탄수화물의 이용과 그것의 산화에 따른 차이에 기초해 개선된 방법을 이용하여 실시하였다(Hayward, 1964; Huang 등, 2012). 그리고 positive control로 *R. solanacearum* KACC 10700 (biovar 3)과 SL1944 (biovar 4) 균주를 사용하였는데, KACC 10700 균주는 농업유전자원센터로부터 그리고 SL1944 균주는 동아대학교로부터 분양받아 실험에 사용하였다. 기본배지(NH₄H₂PO₄ (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 1 g, KCl (Sigma-Aldrich) 0.2 g, MgSO₄·7H₂O (Sigma-Aldrich), 0.2 g, bacto peptone (Becton, Dickinson and Co., Sparks, MD, USA) 1 g, phenol red (Sigma-Aldrich) 0.08 g, agar (Becton, Dickinson and Co.) 3 g, 증류수 1 l)를 pH 7.4로 조정된 후에 고압멸균하였다. 멸균한 배지에 여과 살균한 20% 탄수화물 용액(glucose, trehalose, mannitol, sorbitol, dulcitol, lactose, maltose, cellobiose; Sigma-Aldrich)을 최종 1%가 되도록 첨가한 후 24-well cell culture cluster (Costa, Corning Inc., NY, USA)의 각 well에 2 ml씩 분주하였다. *R. solanacearum* 균주는 TTC 배지(bacto peptone (Becton, Dickinson and Co.) 10 g, casein hydrolysate (Becton, Dickinson and Co.) 1 g, glucose (Sigma-

Aldrich) 5 g, agar (Becton, Dickinson and Co.) 17 g, 증류수 1 l, 2,3,5-triphenyl tetrazolium chloride (Sigma-Aldrich) 1% 수용액 5 ml) (Kelman, 1954)에 도말하여 28°C에서 48시간 동안 배양한 균주를 10^8 cfu/ml의 농도가 되도록 조정하고, 이를 각 well에 20 μ l씩 접종한 후 30°C 배양기에서 5일 동안 반응 정도를 관찰하였으며, 색이 노랗게 변하면 양성으로 판정하였다. 무처리구는 멸균수 20 μ l를 첨가하여 동일하게 배양하였다.

식물체 준비. 고추 풋마름병에 저항성 계통인 'MC4'와 감수성 계통인 '수비초'는 동아대학교로부터 분양받아 증식한 후 실험에 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 시판 고추 품종 140개는 시중에서 구입하여 실험에 사용하였다. 발병 조건에 따른 풋마름병 발생 실험은 두 계통 'MC4'와 '수비초' 그리고 풋마름병 저항성 품종으로 판매되고 있는 '무한질주'(Syngenta Korea, Seoul, Korea)와 '미팅'(대목, Sakata Korea, Seoul, Korea), 그리고 일반 품종 '신세계'(Sakata Korea)와 '부강'(Farm Hannong, Seoul, Korea)을 선발하여 실험에 사용하였다.

육묘용 연결포트(5×8개, 토양 68 ml, Bumngong, Jeongup, Korea)에 원예용 상토(원예용상토 5호, Punong, Gyeongju, Korea)를 넣고 각 품종의 종자를 파종하고 유리온실(25°C±5°C)에서 21일(4엽기) 동안 재배한 고추 유묘를 새로운 플라스틱 포트(직경 9 cm, 토양 400 ml)로 이식하고 7일 동안 더 재배하였다. 접종하는 고추의 생육시기에 따른 풋마름병 발생 실험을 위해서는 종자를 파종하고 온실(25°C±5°C)에서 14일(2엽기), 21일(4엽기), 28일(6엽기), 35일(8엽기) 동안 재배한 고추 유묘를 새로운 플라스틱 포트(직경 9 cm, 토양 400 ml)로 이식한 후에 7일 동안 재배한 식물을 실험에 사용하였다. 식물을 재배할 때 시비는 별도로 하지 않았다.

접종원 준비. *R. solanacearum* KACC 10711 균주를 CPG broth (casamino acids (Sigma-Aldrich) 1 g, peptone (Becton, Dickinson and Co.) 10 g, glucose (Sigma-Aldrich) 5 g, distilled water 1 l)에 접종하여 30°C에서 160 rpm으로 24시간 전배양하였다. 전배양한 병원균을 500 ml의 CPG broth에 1%(v/v)가 되도록 접종하고 30°C에서 160 rpm으로 24시간 진탕 배양하였다. 세균 배양액을 8,000 rpm으로 10분간 원심분리한 후에 상층액을 제거하고 세균 pellet에 멸균수를 첨가하고 잘 흔들어 세균을 현탁하였다.

접종원 농도에 따른 풋마름병 발생 실험을 제외한 모든 실험에서 세균 현탁액은 흡광도(OD₆₀₀, optical density)를 0.3 (1×10^8 cfu/ml)으로 조정하여 실험에 사용하였으며, 접종원 농도에 따른 풋마름병 발생 실험을 위해서는 세균 현탁액의 농도

를 1×10^8 cfu/ml, 1×10^9 cfu/ml (OD₆₀₀=0.6) 및 3×10^9 cfu/ml (OD₆₀₀=0.9)로 준비하였다.

병원균 접종 및 발병. 토양 관주법과 뿌리 침지법을 이용한 접종 방법을 제외한 모든 실험은 고추 식물체의 배측으로부터 2–3 cm 떨어진 곳에 멸균한 scalpel을 삽입하여 뿌리에 상처를 가하고 그 곳에 세균 현탁액 20 ml를 관주하여 접종하였다.

뿌리 침지법은 28일 동안 재배한 고추 유묘의 뿌리를 수세한 다음 세균 현탁액(1×10^8 cfu/ml, 40 ml)에 30분간 침지한 후 원예용 상토가 담긴 플라스틱 포트(직경 9 cm, 토양 400 ml)로 이식하였다. 그리고 토양 관주법에서는 상처없이 식물체가 있는 토양에 준비한 세균 현탁액(1×10^8 cfu/ml)을 포트 당 20 ml씩을 관주하여 접종하였다.

그리고 접종한 고추 유묘는 항온항습실(30°C, 상대습도 60–70%)에서 하루에 12시간씩 광($55 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)을 조사하면서 물 높이가 5 mm 이하가 되도록 유지하면서 저면 관수하여 재배하였다. 시판품종 140개의 풋마름병에 대한 저항성 검정에서는 동일한 방법으로 접종하고 유리온실(30°C±5°C)에서 저면 관수하면서 재배하였다. 접종한 고추는 동일한 방법으로 재배하였다.

풋마름병 발생 조사. 발병 조건에 따른 풋마름병 발생 실험은 병원균을 접종하고 5일, 10일, 15일 동안 재배한 후에 고추의 풋마름병 발생 정도를 조사하였으며, 시판중인 140개 품종의 풋마름병 저항성 실험은 병원균 접종 7일, 11일 및 15일 후에 조사하였다. 병조사는 아래와 같은 발병지수(disease index)를 사용하여 수행하였는데, 0=풋마름병 증상 없음, 1=전체 잎의 1–25% 시들음 증상, 2=전체 잎의 26–50% 시들음 증상, 3=전체 잎의 51–75% 시들음 증상, 4=전체 잎의 76–100% 시들음 증상 등 5단계이다(Roberts 등, 1988). 그리고 평균 발병도가 1.0 이하이면 저항성으로, 1.1–2.0은 중도저항성으로, 2.1 이상은 감수성으로 판정하였다.

조사한 발병지수로부터 아래와 같은 수식에 따라 병진전곡선하면적(AUDPC, area under disease progress curve)을 계산하였다(Jeger와 Vianen-Rollinson, 2001; Madden 등, 2007). $AUDPC = \sum (X_i + X_{i+1}) / 2 \times (T_{i+1} - T_i)$, X_i 는 첫 번째 병반면적, X_{i+1} 은 첫 번째 이후의 증가한 병반면적, $T_{i+1} - T_i$ 은 두 조사시점의 경과 일수를 나타낸다. 그리고 가장 감수성이 높은 품종의 AUDPC 값에 대한 각 품종의 상대적 AUDPC (rAUDPC, relative AUDPC) 백분율을 계산하였다.

모든 실험은 6반복으로 2회 수행하였으며, SAS (SAS 9.1, SAS

Institute Inc., Cary, NC, USA) 프로그램을 이용하여 ANOVA 분석을 하고 처리 평균간 비교를 위하여 Duncan's multiple range test ($P=0.05$)를 실시하였다.

결과 및 고찰

R. solanacearum의 생리형. *R. solanacearum* KACC 10711 균주의 생리형(biovar)을 조사한 결과, 모든 검정에서 양성 반응을 나타내 KACC 10711 균주는 biovar 3으로 동정되었다(Fig. 1). 그리고 대조구인 *R. solanacearum* KACC 10700과 SL1944는 각각 biovar 3과 4의 반응을 보였다.

Jeong 등(2007)은 우리나라에서 분리한 478개 균주 중 440개 균주가 race 1이었으며, 특히 고추로부터 분리한 균주는 모두 race 1이라고 하였다. 또한 당류 탄소원의 분해 능력에 따라 5개의 생리형(biovar)으로 나뉘는데(Buddenhagen 등, 1962; Hayward, 1991). 우리나라에는 풋마름병균의 생리형이 biovar 1, 2, 3, 4가 보고되어 있는데, biovar 1과 2는 소수이고 대부분이 biovar 3과 4였다(Jeong 등, 2007; Lim 등, 2008; Seo 등, 2007; Yun 등, 2004). 그리고 Fegan과 Prior (2005)는 Phylotype을 아시아, 아메리카, 아프리카, 인도네시아 4개로 구분하였는데, race 1 균주이고 biovar 3과 4 균주는 'Phylotype 아시아'에 속한다고 하였다. 이상의 보고로부터 본 연구에 사용한 *R. solanacearum* KACC 10711 균주는 고추에서 분리한 race 1 균주이고, biovar 3으로 동정되어 고추 풋고추 풋마름병 저항성 검정 체계 확립에 적합한 균주로 생각되었다.

접종방법에 따른 고추 풋마름병의 발생. 저항성 및 감수성

고추 6개 품종에 3가지 방법(토양관주법, 뿌리침지법, 뿌리절단 후 관주법)으로 접종하여 풋마름병 발생을 조사한 결과, 뿌리 근처 토양에 풋마름병균 현탁액을 관주하는 접종방법의 경우 6개 품종 모두에서 0-1.0의 낮은 발병도와 0-5.0의 AUDPC를 보여, 이 방법은 감수성 고추 품종들의 풋마름병 발생이 적어 고추의 저항성 검정에 적합하지 않음을 알 수 있었다(Table 1). 한편 고추 뿌리를 세균 현탁액에 침지하는 방법으로 접종한 경우에는 'MC4' 계통은 접종 15일 후에 발병도 1.5와 AUDPC 10.3을 보였고, 감수성 품종들에서는 평균 발병도 3.5-3.7과 AUDPC 36.9-40.3을 나타냈다. 그리고 scalpel로 뿌리를 절단하고 그 상처 부위에 접종원을 관주하는 방법에 의해서는 저항성 계통인 'MC4'는 평균 발병도 1.0과 AUDPC는 4.0의 값을 보였고, 감수성 품종들은 모두 평균 발병도 4.0과 AUDPC 36.5-45.0를 나타냈다(Table 1). 따라서 뿌리침지법과 뿌리절단 후 관주법은 저항성 품종 MC4에서 저항성이 잘 나타나고, 감수성 품종들에서 풋마름병이 심하게 발생하였으므로 두 방법은 고추의 풋마름병 저항성 검정에 이용할 수 있는 접종 방법으로 생각되었다. 하지만 뿌리침지법은 작업과정이 복잡하고 노동력이 많이 요구되는 단점을 가지고 있어 효율적인 풋마름병 저항성 검정을 위해서는 뿌리절단 후 관주접종하는 방법이 가장 효과적이라 생각되었다.

Winstead와 Kelman (1952)은 저항성과 감수성 계통의 효과적인 저항성 검정에 있어서 줄기주사접종 방법은 뿌리절단 관주 방법보다 더 높은 발병률을 보였으나, 저항성 평가를 위해서는 저항성과 감수성 계통에서 가장 큰 발병도 차이를 나타낸 뿌리절단 후 관주하여 접종하는 방법이 효과적이라 보고하였는데, 이는 우리의 연구 결과와 일치하는 결과이다. 한편 토

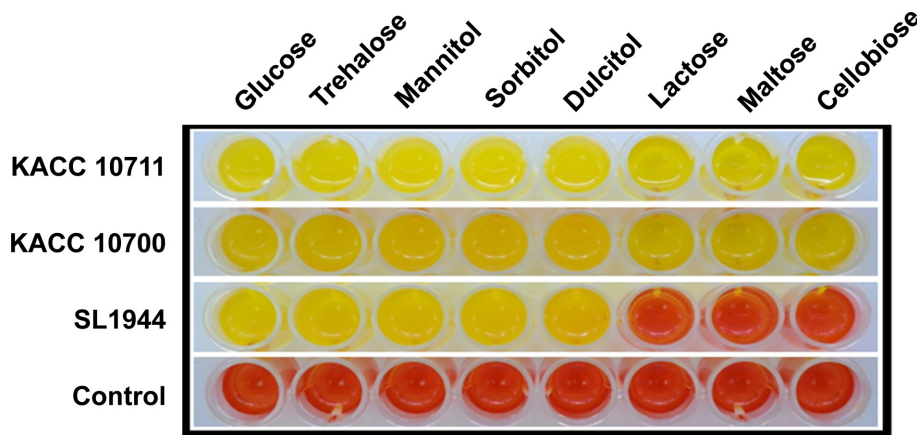


Fig. 1. Biovar classification of *Ralstonia solanacearum* isolates. Biovars of *R. solanacearum* strains were determined by their ability to utilize five carbohydrates including glucose, trehalose, mannitol, sorbitol, dulcitol and to oxidize lactose, maltose, and cellobiose. Control means negative control.

Table 1. Development of bacterial wilt on six chili pepper cultivars according to inoculation method^a

Cultivar	Trait ^b	Root-dipping ^c			Soil-drenching ^d			Drenching with wounding ^e					
		5 ^f	10	15	5	10	15	5	10	15	AUDPC		
Muhanjiju	MR	2.2 ^h	3.0	3.2	34.0 a ^g	0	0.5	1.0	5.0 a	1.3	2.8	4.0	30.5 ab
Meeting	R	0.8	1.0	1.5	12.8 b	0	0	0	0 b	0.5	2.2	3.2	21.5 ab
Bukang	S	2.7	3.5	3.7	40.3 a	0	0	0	0 b	1.8	3.5	4.0	36.5 a
Sinsegae	S	2.3	3.2	3.5	36.3 a	0	0	0	0 b	3.0	4.0	4.0	45.0 a
MC4	R	0	1.3	1.5	10.3 bc	0	0	0.7	1.8 ab	0	0.3	1.0	4.0 c
Subicho	S	3.0	3.2	3.5	39.8 a	0	0.5	0.7	4.3 a	1.7	4.0	4.0	38.5 a

^aOne week after transplanting, the potted plants were inoculated with *Ralstonia solanacearum* (OD₆₀₀=0.3, 20 ml/pot) by using methods of root-dipping, soil-drenching, and drenching with wounding. The inoculated plants were incubated in a growth chamber (30°C). Five, ten and fifteen days after inoculation, disease severity of the plants was investigated on a scale of 0–4. 0=no symptom, 1=1–25% leaves wilted, 2=26–50% leaves wilted, 3=51–75% leaves wilted, 4=76–100% leaves wilted.

^bResistance to bacterial wilt: R, resistant; MR, moderately resistant; S, susceptible.

^cSeedlings were uprooted and the roots were washed gently in water. The plant were inoculated with the pathogen by dipping the roots in bacterial suspension for 30 min. The infected plants were transplanted into a plastic pot.

^dPlants were inoculated with *R. solanacearum* by pouring the bacterial suspension (20 ml) on soil without wounding.

^ePlants were inoculated with *R. solanacearum* by cutting the roots with a scalpel, and then 20 ml of bacterial suspension (OD₆₀₀=0.3) was applied to soil.

^fDays after inoculation.

^gArea under disease progress curve.

^hEach value represents the mean disease index of two runs with six replicates each.

ⁱValues in the labeled with the same letter within each column are not significantly different in Duncan's multiple range test at P=0.05.

Table 2. Development of bacterial wilt on six chili pepper cultivars according to growth stage of plant^a

Cultivar	Trait ^b	21-day-old ^c			28-day-old			35-day-old			42-day-old						
		5 ^d	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	AUDPC			
Muhanjiju	MR	0.8 ^f	2.7	3.0	25.0 ab ^g	2.2	3.2	3.5	35.8 ab	3.8	4.0	4.0	49.0 a	2.8	4.0	4.0	44.0 ab
Meeting	R	2.3	3.0	4.0	36.5 ab	1.7	3.2	3.3	32.8 ab	2.7	3.7	4.0	42.0 ab	3.0	4.0	4.0	45.0 ab
Bukang	S	2.8	3.5	4.0	41.5 a	2.8	3.8	4.0	43.0 a	3.3	3.7	4.0	45.0 a	3.7	4.0	4.0	48.5 a
Sinsegae	S	2.7	3.8	4.0	42.5 a	2.2	3.8	4.0	40.0 a	4.0	4.0	4.0	50.0 a	3.0	3.5	4.0	42.5 ab
MC4	R	0	0.3	0.8	3.5 c	0	0.3	1.0	4.0 c	0.5	1.8	2.7	18.3 bc	0.7	2.8	3.5	26.3 bc
Subicho	S	1.2	2.7	3.5	28.3 ab	2.2	4.0	4.0	41.0 a	2.0	3.8	4.0	39.0 ab	3.5	3.5	3.8	44.5 ab

^aOne week after transplanting, the potted plants were inoculated with *Ralstonia solanacearum* by cutting the roots with a scalpel, and then 20 ml of bacterial suspension (OD₆₀₀=0.3) was applied to soil. The inoculated plants were incubated in a growth chamber (30°C). Five, ten and fifteen days after inoculation, disease severity of the plants was investigated on a scale of 0–4. 0=no symptom, 1=1–25% leaves wilted, 2=26–50% leaves wilted, 3=51–75% leaves wilted, 4=76–100% leaves wilted.

^bResistance to bacterial wilt: R, resistant; MR, moderately resistant; S, susceptible.

^c21-day-old, fully expanded two-leaf stage; 28-day-old, fully expanded four-leaf stage; 35-day-old, fully expanded six-leaf stage; 42-day-old, fully expanded eight-leaf stage.

^dDays after inoculation.

^eArea under disease progress curve.

^fEach value represents the mean disease index of two runs with six replicates each.

^gValues in the labeled with the same letter within each column are not significantly different in Duncan's multiple range test at P=0.05.

마토의 풋마름병 저항성 연구에서는 토마토 줄기에 병원균을 주사하여 접종하는 방법이 효과적이라고 보고한 것도 있으나 (Kishun과 Chand, 1990; Lim과 Kim, 1994), Lee 등(2015a)은 토마토의 풋마름병 저항성을 검정하기에 상처없이 병원균을 토양에 관주하여 접종하는 것이 뿌리에 상처를 주고 병원균을 관주하여 접종하는 것보다 더 효과적이었다고 하였다. *R. solanacearum*은 자연 상태에서 토양속의 뿌리를 통하여 침입하므로 포장에서의 재현성 및 뿌리 조직 등의 차이에 유래한 저항성 경우 등을 고려한다면 뿌리에 접종하는 것이 바람직하며, 같은 풋마름병이라도 기주에 따라 저항성 검정에 효과적인 접종 방법은 다른 것으로 생각되었다. 이상의 결과로부터 고추의 풋마름병 저항성 검정에서 접종 방법으로는 고추 뿌리절단 후 상처 부위에 병원균을 관주하는 방법이 효과적인 것으로 생각되었다.

고추의 생육 시기에 따른 풋마름병 발생. 접종하는 고추의 네 가지 생육시기에 따른 고추 6개 품종에서 풋마름병 발생 정도를 조사한 결과, 접종 15일 후의 저항성 계통('MC4')의 경우 21일, 28일, 35일, 42일 재배한 고추 유묘는 각각 0.8, 1.0, 2.7, 3.5의 평균 발병도와 3.5, 4.0, 18.3, 26.3의 AUDPC를 나타냈으며, 'MC4'의 생육시기가 증가함에 따라 풋마름병 발생도 증가하였다(Table 2). 이와 달리 감수성 품종들은 평균 발병도 3.5-4.0과 AUDPC 28.5-50.0으로 21일 재배한 '수비초'를 제외하면 고추의 생육시기와 관계없이 모두 풋마름병이 심하게 발생하였다(Table 2).

가지과 작물인 토마토와 감자의 경우에는 어린 유묘나 노화된 식물에 풋마름병 병원균을 접종하기보다 토마토는 24일 그리고 감자는 20-25일 재배한 식물에 접종하는 것이 상대적 저항성 수준을 평가하는데 적당하다고 하였다(Gonzalez 등, 1973; Winstead와 Kelman, 1952). 이와 같이 생육 시기에 따라 저항성이 변화하는 것은 양적저항성에서 일반적으로 나타나는 현상이며, 질적 저항성의 경우에는 대부분 식물체의 생육 시기에 저항성이 영향을 받지 않는다(Lee 등, 2014; Jo 등, 2015; Lee 등, 2015c). 따라서 'MC4'는 생육 시기에 따라 풋마름병에 대한 저항성에 차이를 나타내므로 'MC4'의 저항성은 양적저항성으로 생각되었다(Table 2).

생육 시기고추를 대상으로 저항성 검정에 적합한 생육 시기를 보고한 연구는 거의 없는 실정인데, 본 연구에서 실험한 고추의 생육시기 중 21-28일에서 'MC4'의 저항성이 잘 나타나고, 28일 재배한 '수비초'는 28일 재배하였을 때 감수성이 높으므로 고추 풋마름병 저항성 검정을 위해서는 21일(4엽기) 재배한 고추 유묘를 새로운 포트에 이식하여 7일 동안 재배한 고추를 접

종에 사용하는 것이 효과적이라 생각되었다.

접종원 농도에 따른 고추 풋마름병 발생. KACC 10711 균주를 세 가지 농도(1×10^8 cfu/ml, 1×10^9 cfu/ml, 3×10^9 cfu/ml)의 세균 현탁액으로 고추 6개 품종에 접종하고 풋마름병 발생을 조사한 결과, 저항성 계통 'MC4'는 각각 0.5, 1.8, 2.2의 발병도를 보여 접종원 농도가 증가함에 따라 풋마름병 발생이 증가하였으며 1×10^8 cfu/ml로 접종하였을 때 저항성을 나타냈다(Table 3). 이와 달리 감수성 품종들은 접종 농도와 관계없이 3.7 이상의 평균 발병도를 보였다. 그리고 중도저항성으로 알려진 '무한질주'는 1×10^8 cfu/ml 농도로 접종하고 10일 후에 조사하였을 때에만 중도저항성을 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 1×10^8 cfu/ml로 접종하였을 때 'MC4'와 '무한질주'가 각각 저항성과 중도저항성을 그리고 감수성 품종은 높은 감수성을 보여 이 접종 농도가 가장 효과적이라고 생각되었다(Table 3).

또한 병원진균선하면적(AUDPC) 분석에서 1×10^8 cfu/ml로 접종한 'MC4'는 2.3을 보였고 감수성 품종들은 35.5-41.0을 보였다. 중도저항성 품종으로 알려진 '무한질주'는 감수성보다 다소 낮은 21.8을 보였다. 그 외의 접종원 농도 실험에서 'MC4' 계통의 경우 8.5-14.0의 AUDPC를 보였고, 감수성 품종들에서는 38.5-46.5의 AUDPC를 나타내었다(Table 3).

멜론의 덩굴조짐병 저항성은 단인자우성 유전자인 'Fom-1', 'Fom-2'에 의한 질적저항성으로 알려져 있는데 이들 저항성은 접종 농도가 증가하여도 저항성에는 변화가 없었다(Lee 등, 2015c). 그리고 고추의 역병 저항성은 양적저항성인데 접종 농도가 증가하면 저항성이 감소한다고 알려져 있다(Barksdale 등, 1984; Kim 등, 1989). 단일 농도(5×10^4 sporangia/pot)로 접종하였을 때 고추 100개 품종 중 6개 품종은 실험한 4개 역병 균주 모두에 대해 고도의 저항성을 나타내었는데, 이들 품종도 더 높은 농도로 접종하였을 때에는 접종 농도가 증가함에 따라 발병도가 증가하였다(Jo 등, 2014). 따라서 고추 'MC4'의 접종 농도에 따른 풋마름병 저항성 차이는 'MC4'가 풋마름병에 대해 질적저항성이 아니며 양적저항성이기 때문인 것으로 생각되었다.

이상의 결과로부터 고추 품종의 풋마름병 저항성을 검정하기 위한 방법으로 5×8 연결포트(토양 68 ml)에 원예용 상토를 넣고 고추 종자를 파종하여 21일 동안 재배한 후에 새로운 포트(직경 9 cm, 토양 400 ml)로 이식하고, 7일 동안 더 재배한 고추의 뿌리에 scalpel로 상처를 내고 $OD_{600}=0.3(1.1 \times 10^8$ cfu/ml) 농도의 풋마름균 현탁액을 포트 당 20 ml를 관주하여 접종하고, 접종한 고추 유묘를 항온항습실(온도: 30°C, 상대습도: 60-70%)에서 하루에 12시간씩 광을 조사하면서 저면관수하

Table 3. Development of bacterial wilt on six chili pepper cultivars according to inoculum concentration of *Ralstonia solanacearum*^a

Cultivar	Trait ^b	Inoculum concentration (cfu/ml)											
		1.1×10 ⁸				1.1×10 ⁹ cfu/ml				2.8×10 ⁹ cfu/ml			
		5 ^c	10	15	AUDPC ^d	5	10	15	AUDPC	5	10	15	AUDPC
Muhanjiju	MR	0.7 ^e	2.0	3.3	21.8ab ^f	1.7	3.3	4.0	35.0 a	1.7	4.0	4.0	38.5 a
Meeting	R	1.7	3.8	4.0	37.5 a	0.8	3.2	3.8	29.5 ab	0.8	3.2	3.2	28.3 ab
Bukang	S	2.2	3.8	4.0	40.0 a	3.3	4.0	4.0	46.5 a	3.3	3.8	4.0	45.5 a
Sinsegae	S	1.5	3.7	3.8	35.5 a	3.2	3.8	4.0	45.0 a	2.5	3.7	3.8	40.5 a
MC4	R	0	0.2	0.5	2.3 c	0	0.8	1.8	8.5 c	0	1.7	2.2	14.0 b
Subicho	S	2.2	4.0	4.0	41.0 a	2.5	3.7	3.7	40.3 a	2.0	3.7	4.0	38.5 a

^aOne week after transplanting, the potted plants were inoculated with *R. solanacearum* by cutting the roots with a scalpel, and then 20 ml of bacterial suspension was applied to soil. The inoculated plants were incubated in a growth chamber (30°C). Five, ten and fifteen days after inoculation, disease index of the plants was investigated on a scale of 0–4. 0=no symptom, 1=1–25% leaves wilted, 2=26–50% leaves wilted, 3=51–75% leaves wilted, 4=76–100% leaves wilted.

^bResistance to bacterial wilt: R, resistant; MR, moderately resistant; S, susceptible.

^cDays after inoculation.

^dArea under disease progress curve.

^eEach value represents the mean disease index of two runs with six replicates each.

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

여 재배하고, 접종 11일 전후에 감수성 대조품종에서 풋마름병 발생이 충분히 발생하면 병조사하는 것이 가장 효과적인 방법이라고 생각되었다.

R. solanacearum에 대한 시판 품종들의 저항성. 시판 중인 고추 140개 품종의 풋마름병에 대한 저항성을 대조 품종인 'MC4'와 '수비초'와 함께 실험하였으며, 풋마름병 발생 정도는 접종 7일, 11일, 15일 후에 발병도로 조사하고 이로부터 AUDPC와 rAUDPC (%)를 계산한 결과, 시판 고추 140개 품종의 AUDPC는 5.4–46 그리고 rAUDPC는 12–100%에 분포하였다(Table 4). 그리고 저항성 대조구인 'MC4'의 AUDPC와 rAUDPC는 각각 5.8과 13%이었고, 감수성 대조구인 '수비초'는 각각 40.5와 88%를 나타냈다. 그리고 종자회사에서 저항성으로 판매하고 있는 4개 품종 '남자의 자격', '무한질주', '미팅', '구십구점구'의 rAUDPC는 각각 18, 44, 50, 59%로 '남자의 자격'이 가장 높은 저항성을 나타냈으며, '무한질주'는 회사에서 중도저항성 품종으로 공시하고 있는데 본 연구에서도 유사한 정도의 저항성을 보였다(Table 4). 그리고 종자회사에서 저항성으로 공시하지 않은 '불맛', '당조마일드', 'PM신강' 또한 20% 이하의 rAUDPC 즉, 높은 저항성을 나타냈다.

이들 결과로부터 rAUDPC를 이용한 고추 품종들의 풋마름병 저항성 기준은 rAUDPC가 0–20%이면 저항성, 21–40%는 중도저항성 그리고 41% 이상의 rAUDPC를 나타내는 품종은 감수성으로 결정하는 것이 적절할 것으로 생각되었다. 이를 기준을 적용하면 실험한 140개 품종 중 저항성 품종은 4개, 중도저항성 품종은 16개 그리고 120개 품종은 감수성이었다. 그리고 고추의 풋마름병 저항성을 검정할 때 포함되는 저항성 대조 품종으로 '불맛'(Syngenta Korea), '남자의 자격'(Syngenta Korea) 및 'PM신강'(NongwooBio, Suwon, Korea)을 그리고 감수성 대조품종으로는 '신조광'(Monsanto Korea, Seoul, Korea), '홍일집'(Monsanto Korea), '희망봉'(NongwooBio), 'PR신나라'(NongwooBio), 'PR열정'(NongwooBio) 및 '천하제일'(Farm Hannong)을 선발할 수 있었다.

소수의 시료의 저항성을 정확하게 조사하기 위해서는 rAUDPC (%)를 기준으로 저항성을 판단하는 것이 효과적이거나, 저항성 품종을 개발하기 위한 상업 육종에서는 많은 시료의 저항성을 효율적으로 판단하는 것이 중요하다. 따라서 일정한 시기에 조사한 발병도를 사용해서 고추 품종들의 저항성을 조사해야 하는데, 시판 품종 140개의 접종 7, 11, 15일 후에 조사한 발병도를 rAUDPC와 비교한 결과, 실험한 모든 품종은 접종 후 재배기간이 길어짐에 따라 발병도는 증가하였다(Table 4). 그리고 감수성 계통인 '수비초'는 접종 7–15일 후 조사에서 모두 감수성

을 보였으나, 저항성 계통인 'MC4'는 접종 7일 후와 접종 11일 후에는 저항성을 나타내나 접종 15일 후에는 중도저항성을 보였다(Table 4). 접종 후 재배기간에 따른 품종들의 풋마름병 저항성을 rAUDPC와 비교해 보면, 접종 7일 후에는 풋마름병 발생이 적어 실험한 품종 중 36개가 저항성이었으며 조사한 발병도와 rAUDPC가 같은 반응을 보이는 품종은 83개(58%)뿐이었

다. 그리고 접종 15일 후에는 풋마름병이 심하게 발생하여 실험한 품종 중 저항성 품종은 없었으며, 발병도와 rAUDPC가 동일한 반응을 나타내는 품종 수는 124개(89%)였다. 이와 달리 접종 11일 후에 조사하였을 때에는 4개 품종이 저항성을 그리고 '무한질주'를 포함하여 13개 품종이 중도저항성을 보였으며, rAUDPC가 같은 반응을 보이는 품종 수가 133개(95%)로 접종

Table 4. Resistance degree of 140 commercial chili pepper cultivars to *Ralstonia solanacearum*^a

Cultivar	Triat ^b	Days after inoculation			AUDPC ^c	rAUDPC (%) ^d
		7	11	15		
Bulmat	—	0 ^e	0.5	1.7	5.4	12
Dangjomild	—	0	0.2	2.7	6.2	13
Namjajakyuk	R	0.2	1.0	1.5	8.1	18
PM Sinkang	—	0.3	0.8	1.8	8.5	18
Dokyachungchung	—	0.3	1.3	1.3	9.5	21
Gangryeokjosenggeon	—	0	1.5	1.8	9.6	21
PR Cheongyang	—	0.2	1.2	2.2	10.3	22
Ildangbaekgold	—	0.5	1.2	1.7	11.0	24
OK Cheongyang	—	0	1.7	2.3	11.4	25
PR Ssaksseuli	—	0	1.8	2.8	12.8	28
Geumhyang	—	0.2	1.8	2.3	12.9	28
Gukbo	—	0.2	1.8	2.7	13.7	30
Auseong	—	0	2.0	3.0	14.0	30
Bitgoeul	—	0.2	2.3	2.3	14.9	32
Ilsongjung	—	0.5	2	2.3	15.4	33
Shinhong	—	0	2.5	2.8	15.6	34
Buldojang	—	0.5	2.3	2.3	16.6	36
Manseokgun	—	0.8	1.8	3.2	18.0	39
Papiyellow	—	0.2	2.7	3.2	18.3	40
Ganggeon	—	0.3	2.8	2.8	18.5	40
Ilinja	—	0.7	2.3	2.8	18.7	41
Tantandaemok	—	0.3	2.8	3.2	19.3	42
PR Smart	—	1.2	2	2.5	19.6	43
Ildeunggongsin	—	0.5	2.5	3.5	19.8	43
Hanson	—	0.5	2.7	3.2	20.0	43
PR Bulmyul	—	1.2	2.0	2.8	20.2	44
Muhanjilju	MR	1.0	2.2	3.0	20.3	44
Cheonnyeonmannyeon	—	0.7	2.7	3.0	20.7	45
PR Power	—	0.8	2.5	3.2	20.8	45
Sunguja	—	1.0	2.3	3.2	21.1	46
Giribbaksu	—	0.3	3.2	3.5	21.5	47
Gangryeoktaeyang	—	0.3	3.0	4.0	21.7	47
Daejangbu	—	0.7	3.0	3.3	22.5	49
Meeting	R	0.8	3.0	3.2	22.8	50
Matggalchan	—	1.3	2.3	3.5	23.4	51

Table 4. Continued

Cultivar	Triat ^b	Days after inoculation			AUDPC ^c	rAUDPC (%) ^d
		7	11	15		
Dokbulwang	–	0.8	2.8	4.0	23.6	51
Bukang	–	1.2	2.7	3.3	24.0	52
Papired green pepper	–	0.8	3.3	3.8	25.2	55
PR Eokmangum	–	1.0	3.2	3.5	25.3	55
Bongane	–	1.2	3.0	3.5	25.6	56
PR Galmuri	–	1.0	3.3	3.5	25.7	56
PR Ssun	–	1.7	2.5	3.2	25.8	56
Gungyeilhak	–	1.8	2.5	3.2	26.3	57
PR Sanghanga	–	1.3	3.0	3.8	26.8	58
Katagurumai	–	1.8	2.5	3.5	26.9	58
Gusipgujeomgu	R	2.3	2.3	2.7	27.3	59
Hongjanggunbigarim	–	1.0	3.7	3.8	27.9	61
PR Jijon	–	1.7	2.8	3.7	28.0	61
PR Maekom	–	1.2	3.5	4.0	28.6	62
PR Jangwongeubje	–	1.8	3.2	3.3	29.3	64
Chamjoeun	–	1.8	3.3	3.3	29.7	65
Hyangchon	–	2.3	2.5	3.8	30.3	66
Gisedeungdeung	–	2.2	3.0	3.2	30.5	66
Imgeumnim	–	1.7	3.3	4.0	30.6	67
PR Huimangchan	–	1.5	3.7	4.0	31.1	68
PR Pyeongjeong	–	2.5	3.0	3.0	31.8	69
Maekomdalkom	–	1.7	3.8	3.8	32.2	70
Morningput	–	1.7	3.8	3.8	32.2	70
Berodda	–	1.7	3.7	4.0	32.2	70
PR Hwanhoseong	–	1.8	3.7	3.8	32.3	70
Bulsechul	–	1.8	3.7	3.8	32.3	70
Cheonhatongil	–	1.8	3.7	3.8	32.3	70
PR Yeokbalsan	–	2.0	3.5	3.8	32.6	71
Cheonnyeonyaksok	–	2.2	3.3	3.8	32.9	72
Hongsimi	–	2.0	3.7	3.8	33.4	73
Byeonggangse	–	1.7	4.0	4.0	33.4	73
Bacjangdaeso	–	2.2	3.5	3.7	33.5	73
Chukje	–	2.2	3.5	3.7	33.5	73
Geummedal	–	2.2	3.5	3.8	33.7	73
Hat	–	2.0	3.8	4.0	34.2	74
Geochanghan	–	2.2	3.7	3.7	34.3	75
PR Geumsongi	–	2.3	3.5	3.8	34.3	75
PR Sadaechunwang	–	2.2	3.8	3.8	34.9	76
Geumkangseok	–	2.2	3.8	3.8	34.9	76
Yeokganghongjanggun	–	2.0	4.0	4.0	35.0	76
PR Geummaek	–	2.3	3.7	3.8	35.1	76
Onggolchan	–	2.8	3.2	3.5	35.2	77
Yeppeundokyacheong	–	2.3	3.8	3.8	35.5	77
PR Daedeulbo	–	2.3	3.8	4.0	35.9	78

Table 4. Continued

Cultivar	Triat ^b	Days after inoculation			AUDPC ^c	rAUDPC (%) ^d
		7	11	15		
Shintolil	–	2.5	3.7	3.7	36.0	78
Subiyeok	–	2.8	3.3	3.7	36.0	78
PR Geumnara	–	2.5	3.8	3.8	36.6	80
Jinmi	–	2.5	3.8	3.8	36.6	80
Najalran	–	3.0	3.3	3.5	36.7	80
PR Bulrocho	–	2.3	4.0	4.0	36.7	80
Jeongukilju	–	2.3	4.0	4.0	36.7	80
Wanggeon	–	2.7	3.7	3.7	37.1	81
Josaengsintap	–	2.7	3.7	3.8	37.3	81
Shinsegae	–	2.7	3.7	4.0	37.7	82
PR Geosang	–	2.8	3.7	3.8	37.8	82
Dahongchima	–	3.2	3.3	3.5	37.8	82
Duruduru	–	3.2	3.3	3.5	37.8	82
PR Sangseang	–	2.8	3.7	3.8	37.8	82
PR Bultina	–	2.5	4.0	4.0	37.8	82
PR Bulkkeun	–	3.0	3.5	3.8	38.1	83
Hongmiin	–	2.8	3.8	4.0	38.6	84
New wave green pepper	–	2.8	3.8	4.0	38.6	84
PR Hongduke	–	2.7	4.0	4.0	38.9	85
PR Geumgochu	–	3.0	3.7	4.0	39.3	85
Hongboseok	–	2.8	4.0	4.0	39.4	86
Taesang	–	2.8	4.0	4.0	39.4	86
Hanbando	–	3.0	3.8	4.0	39.7	86
Gidaemanbal	–	3.2	3.7	4.0	40.4	88
Dabotap	–	3.0	4.0	4.0	40.5	88
PR Manse	–	3.0	4.0	4.0	40.5	88
PR Manitta	–	3.3	3.7	3.8	40.6	88
Yeongyangmat	–	3.2	3.8	4.0	40.8	89
Hangaram	–	3.3	3.8	4.0	41.4	90
Mansahyeongtong	–	3.2	4.0	4.0	41.6	90
PR Manjangilchi	–	3.2	4.0	4.0	41.6	90
NW Bigarim	–	3.2	4.0	4.0	41.6	90
Anjeonbelteu	–	3.5	3.7	3.8	41.7	91
Haengun	–	3.3	4.0	4.0	42.2	92
Johyang	–	3.3	4.0	4.0	42.2	92
Geumgoeul	–	3.7	3.5	4.0	42.4	92
Buchon	–	3.5	3.8	4.0	42.5	92
Chammani	–	3.7	3.8	3.8	43.2	94
Geumbit	–	3.5	4.0	4.0	43.3	94
Obok	–	3.5	4.0	4.0	43.3	94
Hanpanseung	–	3.5	4.0	4.0	43.3	94
PR Gukgadaepyo	–	3.5	4.0	4.0	43.3	94
Giunchan	–	3.5	4.0	4.0	43.3	94
Ilpyeondansim	–	3.5	4.0	4.0	43.3	94

Table 4. Continued

Cultivar	Triat ^b	Days after inoculation			AUDPC ^c	rAUDPC (%) ^d
		7	11	15		
Segyeil	–	3.7	3.8	4.0	43.6	95
Geummaru	–	3.7	3.8	4.0	43.6	95
Manidda	–	3.7	4.0	4.0	44.4	97
PR Eoulim	–	3.7	4.0	4.0	44.4	97
Euddeum	–	3.8	4.0	4.0	44.9	98
Jjang	–	3.8	4.0	4.0	44.9	98
Dangchan	–	3.8	4.0	4.0	44.9	98
Daechon	–	3.8	4.0	4.0	44.9	98
Supermanidda	–	3.8	4.0	4.0	44.9	98
Hongjinju	–	3.8	4.0	4.0	44.9	98
PR Daechon	–	3.8	4.0	4.0	44.9	98
Shinjogwang	–	4.0	4.0	4.0	46.0	100
Hongiljeom	–	4.0	4.0	4.0	46.0	100
Heemangbong	–	4.0	4.0	4.0	46.0	100
PR Shinnara	–	4.0	4.0	4.0	46.0	100
PR Yeoljeong	–	4.0	4.0	4.0	46.0	100
Cheunhajeil	–	4.0	4.0	4.0	46.0	100
MC4 (control)	R	0	0.7	1.5	5.8	13
Subicho (control)	S	3.0	4.0	4.0	40.5	88

^aOne week after transplanting, the potted plants were inoculated with *R. solanacearum* by cutting the roots with a scalpel, and then 20 ml of bacterial suspension ($OD_{600}=0.3$) was applied to soil. The inoculated plants were incubated in a greenhouse ($30^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$). Seven, eleven and fifteen days after inoculation, disease index of the plants was investigated on a scale of 0–4. 0=no symptom, 1=1–25% leaves wilted, 2=26–50% leaves wilted, 3=51–75% leaves wilted, 4=76–100% leaves wilted.

^bResistance to bacterial wilt: –, unknown; R, resistant; MR, moderately resistant; S, susceptible.

^cArea under disease progress curve.

^dRelative AUDPC (%) of each cultivar to AUDPC of the most susceptible cultivar.

^eEach value represents the mean disease index of two runs with six replicates each.

11일 후의 발병도와 rAUDPC에 의한 저항성 결과와 가장 유사하였다. 따라서 고추의 풋마름병 저항성을 위한 발병도 조사는 접종 11일 후에 하는 것이 바람직 할 것으로 생각되었다.

저항성 품종의 육성을 위한 풋마름병에 대한 저항성 고추 유전자원으로는 MC5, MC4, MC10 등이 보고되었다(Matos 등, 1990). 또한 Indian Hot Pepper, Indian Hot Pepper 계통 KAU, White Khandari, Pant C-1, Malaysian accession LS2341, Mie-Midori (Matsunaga와 Monma, 1999; Mimura 등, 2008; Peter, 1984; Goth 등, 1983)과 PI377688외 2종(Lim과 Kim, 1994), PBC631외 13종(Kim 등, 1998), PR920외 2종(Jang 등, 2012), KC980외 10종(Tran과 Kim, 2012), KC00121외 7종(Wai 등, 2013) 등이 풋마름병에 저항성을 나타내는 유전자원으로 보고되었다. 하지만 높은 이질성을 가지는 풋마름병균의 특성으로 인해 기존의 저항성 고추 품종에서 감수성 반응이 보이는 등의 다

양한 저항성 반응을 나타낸다고 보고되었다(Hanson 등, 1996; Hashimoto 등, 2001).

따라서 향후에는 본 연구에서 확립한 풋마름병 저항성 검정 방법을 사용하여 저항성 품종들이 다양한 균주에 대하여 어떻게 반응하는 지를 조사할 필요가 있다. 풋마름병 저항성이 질적 저항성(qualitative resistance)이라면 배추 뿌리혹병에서와 같은 극단적인 저항성 혹은 감수성을 보이며 균주의 레이스 분화를 보일 것이다(Kim 등, 2016). 하지만 Table 4의 고추 품종들의 풋마름병 저항성 결과로 볼 때 질적 저항성일 가능성은 거의 없다고 생각된다. 만약 고추의 풋마름병 저항성이 양적 저항성(quantitative resistance)이라면 양배추 뿌리혹병과 고추 역병에서처럼 레이스 분화는 없고 *R. solanacearum* 균주들의 병원력(virulence)에 반비례하게 저항성을 나타낼 것이다(Jo 등, 2014, 2016).

요 약

*Ralstonia solanacearum*에 의한 고추 풋마름병은 고추의 생산량 감소에 영향을 미치는 주요 병해 중 하나이다. 그리고 병 저항성 작물을 재배하는 것은 고추의 풋마름병 방제에 가장 효과적인 방제 방법이다. 본 연구는 고추의 풋마름병 저항성을 효율적으로 검정하기 위한 방법을 개발하기 위하여 수행되었다. 풋마름병에 대한 저항성 및 감수성 6개 고추 품종을 선발하고, 다양한 조건에서 이들 품종의 풋마름병 발생을 조사하였다. 접종 방법에 따른 고추 품종들의 풋마름병 발생 정도를 실험한 결과, 상처없이 토양관주하는 방법과 접종원에 뿌리를 침지하는 방법보다 뿌리 절단 후 접종원을 관주하는 방법이 더 간단하고 효율적이었다. 풋마름병 저항성 계통인 'MC4'는 파종 후 21일부터 28일 재배한 고추 유묘에 1×10^8 cfu/ml 농도의 세균 현탁액을 포트 당 20 ml 접종하였을 때 가장 높은 저항성을 나타냈다. 한편 감수성 품종들은 이들 조건에서 높은 감수성을 보였다. 이들 결과는 우리가 고추 품종의 풋마름병에 대한 효율적인 저항성 검정방법을 개발하였다는 것을 나타낸다. 그리고 선발한 발병조건을 사용하여 시판중인 140개 고추 품종의 풋마름병에 대한 저항성 정도를 평가하였다.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no competing and commercial interests in this work.

Acknowledgement

This research was supported by Golden Seed Project Vegetable Seed Center (213006-05-1-SB910), Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Rural Development Administration (RDA) and Korea Forest Service (KFS).

References

- Balatero, C. H., Hautea, D. M., Narciso, J. O. and Hanson, P. M. 2005. QTL mapping for bacterial wilt resistance in Hawaii 7996 using AFLP, RGA, and SSR markers. In: Bacterial Wilt Disease and the *Ralstonia solanacearum* Species Complex, eds. by C. Allen, P. Prior and A. C. Hayward, pp. 301-307. APS Press, St. Paul, USA.
- Barksdale, T. H., Papavizas, G. C. and Johnston, S. A. 1984. Resistance to foliar blight and crown rot of pepper caused by *Phytophthora capsici*. *Plant Dis.* 68: 506-509.
- Buddenhagen, I., Sequeira, L. and Kelman, A. 1962. Designation of races in *Pseudomonas solanacearum*. *Phytopathology* 52: 726.
- Denny, T. P. and Hayward, A. C. 2001. II. Gram-negative bacteria. *Ralstonia* 3rd ed. In: Laboratory Guide for Identification of Plant Pathogenic Bacteria, eds. by N. W. Schaad, J. B. Jones and W. Chun, pp. 151-173. APS Press, St. Paul, MN, USA.
- Fegan, M. and Prior, P. 2005. How complex is the *Ralstonia solanacearum* species complex. In: Bacterial Wilt Disease and the *Ralstonia solanacearum* Species Complex, eds. by C. Allen, P. Prior and A. C. Hayward, pp. 449-462. APS Press, St. Paul, USA.
- Gonzalez, L., Sequeira, L. and Row, P. R. 1973. A root inoculation technique to screen potato seedling for resistance to *Pseudomonas solanacearum*. *Am. Potato J.* 50: 96-104.
- Goth, R. W., Peter, K. V. and Webb, R. E. 1983. Bacterial wilt *Pseudomonas solanacearum* resistance in pepper and eggplant lines. *Phytopathology* 73: 808. (Abstract)
- Han, J. H., Kim, J. Y., Hwang, H. S. and Kim, B. S. 2000. Breeding lines with multiple resistance to both bacterial wilt and Phytophthora blight in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agric. Res. Bull. Kyungpook Natl. Univ.* 18: 9-17. (In Korean)
- Hanson, P. M., Wang, J.-F., Licardo, O., Hanudin, Mah, S. Y., Hartman, G. L., Lin, Y.-C. and Chen J.-T. 1996. Variable reaction of tomato lines to bacterial wilt evaluated at several locations in Southeast Asia. *HortScience* 31: 143-146.
- Hasimoto, N., Matsumoto, S., Yoshikawa, M., Horita, M. and Tsuchiya, K. 2001. Varietal resistance among red pepper and sweet pepper cultivars to *Ralstonia solanacearum* isolated in Kyoto Prefecture. *Jpn. J. Phytopathol.* 67: 201-202.
- Hayward, A. C. 1964. Characteristics of *Pseudomonas solanacearum*. *J. Appl. Microbiol.* 27: 265-277.
- Hayward, A. C. 1991. Biology and epidemiology of bacterial wilt caused by *Pseudomonas solanacearum*. *Annu. Rev. Phytopathol.* 29: 65-87.
- He, L. Y., Sequeira, L. and Kelman, A. 1983. Characteristics of strains of *Pseudomonas solanacearum* from China. *Plant Dis.* 67: 1357-1361.
- Huang, J., Wu, J., Li, C., Xiao, C. and Wang, G. 2009. Specific and sensitive detection of *Ralstonia solanacearum* in soil with quantitative, real-time PCR assays. *J. Appl. Microbiol.* 107: 1729-1739.
- Huang, Q., Yan, X. and Wang, J. F. 2012. Improved biovar test for *Ralstonia solanacearum*. *J. Microbiol. Methods* 88: 271-274.
- Ito, S., Ushilima, Y., Fujii, T., Tanaka, S., Kameya-Iwaki, M., Yoshiware, S. and Kishi, F. 1998. Detection of viable cells of *Ralstonia solanacearum* in soil using a semiselective medium and a PCR technique. *J. Phytopathol.* 146: 379-384.
- Jang, Y., Yang, E. Y., Cho, M. C., Um, Y. C., Ko, K. D. and Chun, C. H. 2012. Effect of grafting on growth and incidence of Phytophthora blight and bacterial wilt of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Hortic. Environ. Biotechnol.* 53: 9-19.
- Jeong, Y., Kim, J., Kang, Y., Lee, S. and Hwang, I. 2007. Genetic diversity and distribution of Korean isolates of *Ralstonia solanacearum*. *Plant Dis.* 91: 1277-1287.
- Jeger, M. J. and Viljanen-Rollinson, S. L. H. 2001. The use of the area

- under the disease-progress curve (AUDPC) to assess quantitative disease resistance in crop cultivars. *Theor. Appl. Genet.* 102: 32-40.
- Jo, E. J., Jang, K. S., Choi, Y. H., Ahn, K. G. and Choi, G. J. 2016. Resistance of cabbage plants to isolates of *Plasmiodiophora brassicae*. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 34: 442-452. (In Korean)
- Jo, E. J., Lee, J. H., Choi, Y. H., Kim, J.-C. and Choi, G. J. 2015. Development of an efficient method of screening for watermelon plants resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 33: 409-419. (In Korean)
- Jo, S.-J. Shim, S.-A., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, J.-C. and Choi, G. J. 2014. Resistance of chili pepper cultivars to isolates of *Phytophthora capsici*. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 32: 66-76. (In Korean)
- Kim, B. S., Cheung, J. D., Cha, Y. S. and Hwang, H. S. 1998. Resistance to bacterial wilt of introduced peppers. *Korean J. Plant Pathol.* 14: 217-219. (In Korean)
- Kim, H., Jo, E. J., Choi, Y. H., Jang, K. S. and Choi, G. J. 2016. Pathotype classification of *Plasmiodiophora brassicae* isolates using clubroot-resistant cultivars of Chinese cabbage. *Plant Pathol. J.* 32: 423-430.
- Kim, J.-H., Kim, S.-T. and Yun, S.-C. 2012. Development of a forecasting model for bacterial wilt in hot pepper. *Res. Plant Dis.* 18: 361-369. (In Korean)
- Kim, Y. J., Hwang, B. K. and Park, K. W. 1989. Expression of age-related resistance in pepper plants infected with *Phytophthora capsici*. *Plant Dis.* 73: 745-747.
- Kinloch, R. A. and Hinson, K. 1972. The Florida program for evaluating soybean (*Glycine max* L. Merr.) genotypes for susceptibility to root-knot nematode disease. *Proc. Soil Crop Sci. Soc. Florida* 32: 173-176.
- Kishun, R. and Chand, R. 1990. Efficacy of different methods of inoculation and inoculum concentrations for inducing bacterial wilt in tomato. *Plant Dis. Res.* 5: 126-131.
- Kelman, A. 1954. The relationship of pathogenicity of *Pseudomonas solanacearum* to colony appearance in a tetrazolium medium. *Phytopathology* 44: 693-695.
- Lee, J. H., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, J.-C. and Choi, G. J. 2015. Development of an efficient screening system for resistance of tomato cultivars to *Ralstonia solanacearum*. *Res. Plant Dis.* 21: 290-296. (In Korean)
- Lee, J. H., Jang, K. S., Lee, W. J., Choi, Y. H. and Choi, G. J. 2014. Resistance of cucurbits to *Podosphaera xanthii* race 1. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 32: 673-683. (In Korean)
- Lee, S. M., Kwak, Y. S., Lee, K. H. and Kim, H. T. 2015b. Control efficacy of fungicides on pepper bacterial wilt. *Korean J. Pestic. Sci.* 19: 323-328. (In Korean)
- Lee, W. J., Lee, J. H., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, H. T. and Choi, G. J. 2015c. Development of efficient screening methods for melon plants resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 33: 70-82. (In Korean)
- Lim, Y. S. and Kim, B. S. 1994. Resistance to bacterial wilt in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Korean J. Plant Pathol.* 10: 73-77. (In Korean)
- Lim, Y. S., Lee, M. J., Cheung, J. D., Rew, Y. H. and Kim, B. S. 2008. Occurrence and biovar classification of bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum* in eggplant (*Solanum melongena*). *Res. Plant Dis.* 14: 10-14. (In Korean)
- Lopes, C. A., Carvalho, S. I. C. and Boiteux, L. S. 2005. Search for resistance to bacterial wilt in a Brazilian Capsicum germplasm collection. In: Bacterial Wilt Disease and the *Ralstonia solanacearum* Species Complex, eds. by C. Allen, P. Prior, C. Hayward, pp. 247-251. APS Press, St. Paul, MN, USA.
- Madden, L. V., Hughes, G. and van den Bosch, F. 2007. The Study of Plant Disease Epidemics, APS Press, St. Paul, MN, USA.
- Matos, F. S. A., Lopes, C. A. and Takatsu, A. 1990. Identification of sources of resistance to *Pseudomonas solanacearum* in *Capsicum* spp. *Hort. Bras.* 8: 22-23.
- Matsunaga, H. and Monma, S. 1999. Sources of resistance to bacterial wilt in Capsicum. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 68: 753-761.
- Mimura, Y., Yoshikawa, M. and Hirai, M. 2008. Property of resistance to bacterial wilt in Capsicum line 'LS2341'. *Hort. Res. Japan* 7 (suppl 1): 100.
- Michel, V. V., Wang, J.-F., Midmore, D. J. and Hartman, G. L. 1997. Effects of intercropping and soil amendment with urea and calcium oxide on the incidence of bacterial wilt of tomato and survival of soil-borne *Pseudomonas solanacearum* in Taiwan. *Plant Pathol.* 46: 600-610.
- Park, S. K. and Kim, K. C. 1991. Pathogenicities of pathogens and disease complex associated with wilt of hot pepper plants cropped in plastic house. *Korean J. Plant Pathol.* 7: 28-36.
- Peter, K. 1984. Indian hot peppers as new sources of resistance to bacterial wilt, Phytophthora root rot, and root-knot nematode. *HortScience* 19: 277-278.
- Quezado-Soares, A. M. and Lopes, C. A. 1995. Stability of the resistance to bacterial wilt of the sweet pepper 'MC-4' challenged with strains of *Pseudomonas solanacearum*. *Fitopatol. Bras.* 20: 638-641.
- Rhoades, H. L. 1976. Effects of *Indigofera hirsute* on *Belonolaimus longicaudatus*, *Meloidogyne incognita*, and *M. javanica* and subsequent crop yield. *Plant Dis. Rep.* 60: 384-386.
- Roberts, P. D., Denny, T. P. and Schell, M. A. 1988. Cloning of the *egl* gene of *Pseudomonas solanacearum* and analysis of its role in phytopathogenicity. *J. Bacteriol.* 170: 1445-1451.
- Seo, S. T., Park, J. H., Han, K. S., Chung, S. R. and Lee, S. D. 2007. Genetic diversity of *Ralstonia solanacearum* strains isolated from pepper and tomato plants in Korea. *Res. Plant Dis.* 13: 24-29.
- Schonfeld, J., Heuer, H., Van Elsas, J. D. and Smalla, K. 2003. Specific and sensitive detection of *Ralstonia solanacearum* in soil on the basis of PCR amplification of *fliC* fragments. *Appl. Environ. Microbiol.* 69: 7248-7256.
- The Korean Society of Plant Pathology. 2009. Vegetables. In: List of Plant Disease in Korea. 5th ed., eds. by W.-G. Kim and H. M. Koo, pp. 99-103. KSP, Suwon, Korea. (In Korean)

- Tran, N. H. and Kim, B. S. 2012. Sources of resistance to bacterial wilt found in Vietnam collections of pepper (*Capsicum annuum*) and their nuclear fertility restorer genotypes for cytoplasmic male sterility. *Plant Pathol. J.* 28: 418-422.
- Vasse, J., Frey, P. and Trigalet, A. 1995. Microscopic studies of intercellular infection and protoxylem invasions of tomato roots by *Pseudomonas solanacearum*. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 8: 241-251.
- Wai, K. P. P., Lee, J. M., Mo, H. S. and Kim, B. S. 2013. Sources of resistance to bacterial wilt and restorer-of-fertility genotype for cytoplasmic male sterility in *Capsicum* pepper. *Hort. Environ. Biotechnol.* 54: 266-271.
- Wallis, F. M. and Truter, S. J. 1978. Histopathology of tomato plants infected with *Pseudomonas solanacearum*, with emphasis on ultrastructure. *Physiol. Plant Pathol.* 13: 307-317.
- Winstead, N. N. and Kelman, A. 1952. Inoculation techniques for evaluating resistance to *Pseudomonas solanacearum*. *Phytopathology* 42: 628-634.
- Yun, G. S., Park, S. Y., Kang, H. J., Lee, K. Y. and Cha, J. S. 2004. Contamination level of *Ralstonia solanacearum* in soil of greenhouses cultivating tomato plants in Chungbuk Province and characteristics of the isolates. *Res. Plant Dis.* 10: 58-62. (In Korean)