

효과적인 무 무름병 저항성 검정법 개발

Development of an Efficient Bioassay Method for Testing Resistance to Bacterial Soft Rot of Radish

*Corresponding author

Tel: +82-42-860-7434

Fax: +82-42-861-4913

E-mail: kjchoi@krcit.re.kr

이수민¹ · 최용호¹ · 장경수¹ · 김현¹ · 이선우² · 최경자^{1*}¹한국화학연구원 친환경신물질연구센터, ²동아대학교 응용생물공학과Soo Min Lee¹, Yong Ho Choi¹, Kyoung Soo Jang¹, Hun Kim¹, Seon-Woo Lee², and Gyung Ja Choi^{1*}¹Center for Eco-friendly New Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 34114, Korea²Department of Applied Bioscience, Dong-A University, Busan 49315, Korea

Pectobacterium carotovorum subsp. *carotovorum* (*Pcc*) causes bacterial soft rot on a wide range of crops worldwide, especially in countries with warm and humid climates. This study was conducted to establish an efficient screening method for resistant cultivars of radish (*Raphanus sativus*) to bacterial soft rot. Resistance degrees of 60 commercial radish cultivars to the *Pcc* KACC 10421 isolate were investigated. For further study, six radish cultivars (Awooriwoldong, YR Championyeolmu, Jeonmuhumu, Bitgoeunyeolmu, Sunbongaltari, Housecheongok) showing different level of resistance to the bacterium were selected. The development of bacterial soft rot on the cultivars was tested according to several conditions such as incubation temperature, seedling stage of radish, inoculum concentration to develop the disease. On the basis of the results, we suggest that an efficient screening method for resistant radish to *Pcc* is to inoculate twenty-day-old seedlings with a bacterial suspension of *Pcc* at a concentration of 8×10^5 cfu/ml and then to cultivate the plants in a growth room at 25°C and 80% RH with 12-hour light per day.

Keywords: Breeding, Disease resistance, *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*, *Raphanus sativus*, Screening

Received August 2, 2018

Revised August 22, 2018

Accepted August 22, 2018

서 론

육종의 발달 덕분에 무(*Raphanus sativus*)는 작형이 세분화되어 연중 재배가 가능하게 된 작물 중 하나이다. 이로 인해 연작 재배지가 증가하는 추세이고, 이러한 재배 환경에 따라 각

종 병해의 발생이 점차 증가하고 있다. 현재까지 무에는 무름병을 포함하여 19종의 병해가 발생한다고 보고되어 있다(KSPP, 2009). 배추과 작물의 무름병은 주로 병원세균 *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (*Pcc*)과 *Pseudomonas marginalis* pv. *marginalis*에 의해 발생하며, 일부 다른 *Pectobacterium* 속 병원균도 무름병을 일으키고, *P. marginalis* pv. *marginalis*는 브로콜리, 컬리플라워 등에 head rot을 일으킨다고 알려져 있다(Rimmer, 2007). 우리나라에서 무에 무름병을 일으키는 병원균으로는 *Pcc*와 *P. marginalis* pv. *marginalis*

Research in Plant Disease

pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

www.online-rpd.org

그리고 *Pectobacterium chrysanthemi*가 보고되었으나(KSPP, 2009), 무 재배지에서 이들 3종 병원균의 밀도에 대한 보고는 아직 없다.

*Pcc*는 *Brassica* 속 작물, 당근, 무, 감자 등 대부분 채소에 발생하는 병으로 재배 기간뿐만 아니라 저장 중에도 발생하여 심각한 피해와 경제적 손실을 초래한다(Aleck과 Harrison, 1978; Ren 등, 2001). *Pcc*는 기주 식물 잔재물에서 월동하고 환경이 좋아지면 곤충, 다른 병, 농기구, 저온 피해 등으로 생긴 상처를 통해 기주 내로 침입하여 무름병을 일으킨다(Rimmer, 2007). *Pcc*에 의한 무름병 발병 기작을 살펴보면, 발병에 적합한 습도와 온도 그리고 혐기상태 등이 되면 병원균의 농도가 10^7 cfu/g으로 증가하게 되고, 정족수 감지 자가유도자(quorum sensing autoinducer)인 *N*-(3-oxohexanoyl)-L-homoserine lactone이 충분히 축적되면 cellulase, protease, pectate lyase, polygalacturonase와 같이 병원성과 관련된 효소를 생산한다(Collmer와 Keen, 1986; Eriksson 등, 1998; Jones 등, 1993; Kotoujansky, 1987; Pérombelon 등, 1979; Pirhonen 등, 1993). 이러한 효소는 기주의 세포벽을 분해하며, 세포막의 물리적인 강도를 약화시켜 세포막에 손상을 줌으로써 세포 내 전해질이 누출되어 썩는 악취와 함께 식물 조직의 무름 증상을 야기하게 된다(Collmer와 Keen, 1986; Kotoujansky, 1987).

*Pcc*에 의한 무름병은 포장에서 뿐만 아니라 운송과 저장 중에도 발생하여 더욱 심각한 피해를 초래한다(De Boer와 Kelman, 1978). 이러한 경제적 손실에도 불구하고 streptomycin, oxolinic acid, 탄산칼슘제 등을 이용한 화학적 방제는 효과적이지 않고, 병원균을 특이적으로 감염하여 용균시키는 박테리오파지를 생물학적 방제 방법으로 이용하려는 움직임이 있지만 국내에서의 연구는 이제 시작 단계이다(Jee 등, 2012; Rimmer, 2007). 이러한 방제 방법들의 한계를 극복하고 가장 효과적으로 무름병을 방제하기 위한 방안은 저항성 품종을 재배하는 것으로 알려져 있다. 무름병 저항성 품종을 개발하기 위해서는 저항성 유전자원 확보와 이를 이용한 저항성 품종 육종이 수행되어야 하는데, 이 과정에서 대량 시료에 대하여 효과적으로 저항성을 검정하는 것이 중요하다. 무름병 접종을 위해서 기존에는 주로 상처 접종을 하였으나, Lee (2002)와 Chung 등(2003)은 mineral oil을 이용하여 무름병균을 접종하는 방법은 상처 내기와 접종 후 습식처리 없이도 자연발병과 유사하게 무름병을 유발한다고 보고하였다. 그리고 무름병 저항성 유전자원 선발을 위한 연구들도 보고되었다(Ren 등, 2001; Williams, 1981). 하지만 무름병에 대한 저항성 무 품종 육성을 위한 효과적인 저항성 검정법에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 효율적인 무 무름병 저항성 검정법을 확립하

기 위해, 시판 중인 60개의 무 품종들의 저항성 정도를 조사하고, 이 결과로부터 저항성 정도가 다른 무 품종 6개를 선발하여 접종원 농도, 접종하는 무 유묘의 생육 시기, 접종 후 식물체 재배 온도에 따른 무 유묘의 무름병 발생을 조사하였다.

재료 및 방법

식물체 준비. 시판 중인 무 품종 60개(신젠타종묘로부터 '대동', '대평여름', '명산', '새롬', '선봉알타리', '태청', '강추', '몬산 토코리아로부터 '관동여름', '대박', '백자', '빛고은열무', '슈퍼모델', '여름춘향이열무', '장형봄', '청운', '청운플러스', '청일품', '탐스런', 'YR챔피온열무'을, 농우바이오로부터 '길조', '슈퍼길조', '백옥', '대들보', '만사형통'을, 아시아종묘로부터 '가을김장', '동하', '미농조생', '박자', '백춘', '시래기', '아시아가을저장', '알파인', '장생', '청두', '청수궁중', '태창'을, 팜한농으로부터 '평강김장', '초롱', '토광', '산나리열무', '송백', '하우스청옥', '보석알타리', '한농알타리'을, 코레곤종묘로부터 '초비', '강성', '극동', '비바리월동', '전무 후무'를, 제일종묘로부터 '참조아열무', '청풍명월', '명가가을1호', '태광', '백세1호', '건강시래기1호', '우정알타리', '슈퍼시래기', '제일보라', '백동'을, 그리고 권농종묘로부터 '금봉'을 구입하여 실험에 사용하였다.

발병 조건에 따른 무 품종들의 무름병 발생 실험은, 60개 시판 무 품종의 *Pcc*에 대한 저항성 정도를 조사한 결과로부터 무 무름병에 대하여 저항성 정도가 서로 다른 '아우리월동(Koregon Seed, Ansong, Korea)', 'YR챔피온열무(Monsanto Korea, Seoul, Korea)', '전무 후무(Koregon Seed, Ansong, Korea)', '빛고은열무(Monsanto Korea, Seoul, Korea)', '선봉알타리(Syngenta Korea, Seoul, Korea)', '하우스청옥(Farm Hannong, Seoul, Korea)' 여섯 품종을 실험에 사용하였다.

무의 생육 정도에 따른 무름병 발생 실험을 제외한 모든 실험에서는 5×8 육묘용 연결포트(70 ml/pot, Bumnong, Jeongup, Korea)에 원예용상토 5호(Punong, Gyeongju, Korea)를 넣고 종자를 1립씩 파종하고 온실(25°C±5°C)에서 18일 동안 재배한 유묘를 사용하였다. 그리고 접종하는 무의 생육시기에 따른 무 무름병 발생 정도를 조사하기 위해서는 앞에서와 동일한 방법으로 파종하고 온실(25°C±5°C)에서 13일, 20일, 27일, 34일 동안 재배한 유묘를 실험에 사용하였다(Fig. 1).

접종원 준비. 무 무름병균은 농촌진흥청 농업유전자원센터(KACC, Rural Development Administration, Jeonju, Korea)로부터 *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10421 균주를 분양 받아 실험에 사용하였다. Petri dish(직경 8.5 cm)에 준

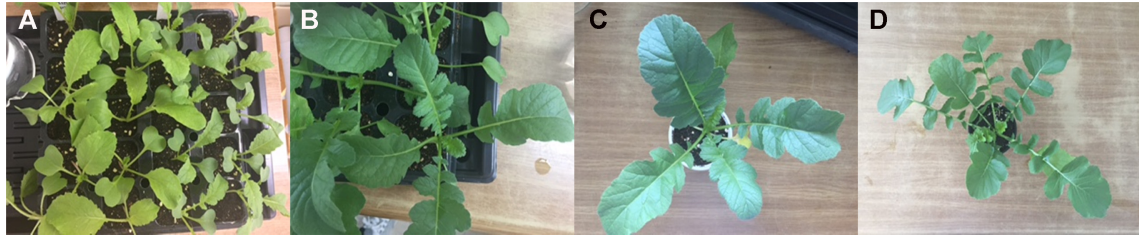


Fig. 1. Growth stage of radish plants used in this study. (A) 13-day-old seedlings, (B) 20-day-old seedlings, (C) 27-day-old seedlings, (D) 34-day-old seedlings.

비한 nutrient agar (NA; Becton, Dickinson and Co., Sparks, MD, USA) 배지에 KACC 10421 균주를 도말하여 접종하고 1일 동안 배양한 후에 nutrient broth (NB; Becton, Dickinson and Co., Sparks, MD, USA) 배지를 5 ml씩 넣고 잘 섞어주었다. 이 세균현탁액을 2 ml 취하여 새로운 NB 배지 200 ml에 접종한 뒤 30°C, 200 rpm으로 36시간 동안 진탕배양하였다. 이 세균 배양액을 4°C에서 8,000 rpm으로 10분간 원심분리한(Beckman Coulter Inc., Brea, CA, USA) 후에 상층액은 버리고 남은 침전물(세균)에 멸균수를 넣고 흔들어 세균현탁액을 만들었다. 이를 물로 희석하고 UV spectrophotometer (Beckman Coulter Inc., Brea, CA, USA)로 OD₆₀₀ 값을 측정하여 세균 농도를 OD₆₀₀=0.2 (1×10⁸ cfu/ml)로 조정하였고, 이 세균현탁액을 멸균수로 희석하여 1×10⁶ cfu/ml 농도의 세균현탁액을 준비하였다.

병원균 농도에 따른 무 무름병 발생실험을 위해서는, OD₆₀₀=0.2(1×10⁸ cfu/ml)로 조정한 세균 현탁액과 이를 1/10씩 희석하여 1×10⁷, 1×10⁶, 1×10⁵ cfu/ml가 되도록 조정한 세균 현탁액을 준비하였다.

병원균 접종 및 병조사. 준비한 *Pcc* KACC 10421 균주의 세균현탁액과 멸균한 glycerol (Duksan Pure Chemicals, Ansan, Korea)을 4:1 비율로 혼합하고 고르게 섞이도록 잘 흔들어준 후에 식물체 기부에 5 ml씩 관주하여 접종하였다. 접종한 식물체의 재배 온도에 따른 무름병 발생 실험을 제외한 모든 실험은 병원균을 접종한 식물체를 25°C 습실상에서 암상태로 24시간 동안 배양하고, 습실처리한 유묘는 항온항습실(25°C, 상대습도 80%)로 이동하여 하루에 12시간씩 광(55 μmol/m²·s)을 조사하면서 재배하였다.

온도에 따른 무름병 발생 실험은 접종한 식물체를 20°C, 25°C, 30°C 습실상에서 암상태로 24시간 배양한 후에 각각 20°C, 25°C, 30°C 생육실로 이동하여 하루에 12시간씩 광을 조사하면서 재배하였다. 그리고 접종 3일, 4일, 5일 후에 무 유묘에 발생한 무름병 발생 정도에 따라 Table 1과 같은 기준으로 발병도를 조사하고 이를 백분율로 환산하였다. 그리고 평균 발병

Table 1. Disease index of radish bacterial soft rot according to symptom

Disease index	Symptom
0	Healthy plant
1	Chlorosis or rot 1–25%
2	Chlorosis or rot 25–50%
3	Chlorosis or rot 50–75%
4	Chlorosis or rot 75–100%, plant was dead

도가 20% 이하이면 저항성으로, 21–40%는 중도저항성으로, 41% 이상은 감수성으로 판정하였다.

접종 3일, 4일, 5일 후에 병 발생 조사한 각 품종의 발병도 (%)를 아래와 같은 식에 따라 AUDPC (area under the disease progress curve, 병진전곡선하면적)를 계산하였다(Jeger와 Viljanen-Rollinson, 2001; Madden 등, 2007). AUDPC (area under the disease progress curve)= $\sum_{i=1}^n [t(i+1)-t_i] \times [DS(i+1)+DS_i]/2$; n=number of assessments, t_i=number of days after inoculation on assessment date i, DS_i=disease severity on assessment date i. 그리고 가장 감수성이 높은 품종의 AUDPC 값에 대한 각 품종의 상대적 AUDPC (rAUDPC, relative AUDPC)를 계산하였다.

통계 분석. 모든 실험은 2회 독립적인 반복을 수행하였고, 반복 당 개체는 10개로 하였다. SAS (SAS 9.1, SAS Institute Inc., USA) 프로그램을 이용하여 ANOVA 분석을 하고 처리, 평균간 비교를 위하여 Duncan's multiple range test (p=0.05)를 실시하였다.

결과 및 고찰

무름병에 대한 시판 무 품종의 저항성. 무의 무름병 저항성 검정법 확립을 위한 실험에 사용할 저항성 정도가 서로 다른 품종을 선발하고자 60개 시판 품종의 무름병 발생을 실험

Table 2. Resistance degree of 60 commercial radish cultivars to *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10421^z

Cultivar	Trait ^y	Days after inoculation ^x			AUDPC ^w	rAUDPC ^v
		3	4	5		
Awooriwoldong	R	1.3±1.8 ^u	6.3±1.3	6.3±1.3	10.6	5.3
YR Champiomyeolmu	–	1.3±1.3	5.0±2.5	12.5±7.5	12.5	6.3
Superkiljo	–	2.5±2.5	17.5±12.5	21.3±13.8	30.6	15.4
Myounggakaekul1ho	–	10.0±7.5	18.8±3.8	18.8±5.0	38.1	19.2
Janghyoungbom	–	16.3±8.8	17.5±7.5	18.8±8.8	43.1	21.7
Kiljo	–	10.0±5.0	28.8±3.8	42.5±17.8	60.0	30.2
Jeonmuhumu	–	10.0±0.0	35.0±7.5	41.3±1.3	65.6	33.0
Cheongwoonplus	–	10.0±10.0	40.0±15.0	42.5±17.0	71.3	35.9
Cheongdoo	–	20.0±10.0	30.0±5.0	47.5±12.5	73.8	37.1
Bitgoeunyeolmu	–	22.5±7.5	33.8±3.8	35.0±5.0	73.8	37.1
Baekchun	–	23.8±6.3	31.3±13.8	37.5±20.0	73.8	37.1
Mansahyoungtong	R	26.3±1.3	30.0±5.0	37.5±12.5	75.0	37.7
Taecheong	R	22.5±15.0	35.0±10.0	37.5±7.5	76.3	38.4
Jangseng	–	25.0±7.5	36.3±3.8	36.3±3.8	79.4	39.9
Gangchoo	–	25.0±22.5	41.3±13.8	43.8±11.8	88.1	44.3
Asiakaeuljeojang	–	21.3±8.8	41.3±13.8	55.0±0.0	90.0	45.3
Kwandongyeoreum	–	26.3±6.3	41.3±1.3	45.0±5.0	90.0	45.3
Dongha	–	22.5±12.5	45.0±12.5	46.3±11.3	90.6	45.6
Baekok	–	31.3±18.8	40.0±10.0	40.0±10.0	91.3	45.9
Supersiraegi	–	26.3±8.8	42.5±2.5	48.8±1.3	93.1	46.8
Taekwang	–	31.3±3.8	40.0±2.5	51.3±8.8	96.9	48.7
Daepyoungyeoreum	–	37.5±12.5	41.6±11.6	41.6±11.6	99.8	50.2
Chamjoayeolmu	–	30.0±5.0	42.5±2.5	55.0±15.0	100.0	50.3
Cheongwoon	–	23.8±8.8	50.0±12.5	61.3±1.3	104.4	52.5
Hannongaltari	–	26.3±6.3	48.8±6.3	62.5±20.0	106.3	53.5
Kuekdong	R	26.3±6.3	51.3±11.3	58.8±18.8	106.9	53.8
Bibariwoldong	R	35.0±5.0	47.5±7.5	51.3±11.3	108.1	54.4
Cheongilpoom	–	38.8±27.5	42.5±23.8	55.0±37.5	108.8	54.7
Chorong	–	36.3±23.8	46.3±13.8	56.3±16.3	110.6	55.6
Baekse1ho	–	33.8±16.3	50.0±7.5	53.8±3.8	110.6	55.6
Daedong	–	35.0±10.0	46.3±8.8	58.8±3.8	110.6	55.7
Minongjoseng	–	40.0±10.0	47.5±2.5	48.8±1.3	111.9	56.3
Sannariyeolmu	–	28.8±1.3	53.8±3.8	60.7±3.2	112.8	56.8
Kangseong	R	25.0±7.5	56.3±6.3	66.3±3.8	114.4	57.5
Sueprmodel	–	43.8±13.8	46.3±16.3	48.8±16.3	114.4	57.5
Baekdong	–	35.0±7.5	51.3±3.8	60.0±5.0	116.3	58.5
Daedlbo	–	38.8±11.3	47.5±20.0	71.3±21.3	121.9	61.3
Tamseureon	R	41.3±3.8	51.3±13.8	60.0±22.5	122.5	61.6
Kuembong	–	40.0±10.0	56.3±11.3	56.3±11.3	124.4	62.6
Cheongsukungjung	–	27.1±14.6	63.1±4.8	72.0±13.7	126.2	63.5
Chobi	–	35.0±5.0	57.5±2.5	68.8±8.8	126.9	63.8
Cheongpungmyoungweol	–	47.5±10.0	55.0±12.5	68.8±26.3	136.9	68.9
Pyounggangkimjang	–	47.5±2.5	57.5±7.5	66.3±13.8	138.1	69.5
Tokwang	–	43.8±3.8	62.5±2.5	68.8±8.8	140.6	70.8
Daebak	–	52.5±10.0	58.8±3.8	61.3±1.3	141.9	71.4
Saerom	–	46.3±6.3	63.8±11.3	65.0±12.5	142.9	71.7
Taechang	–	47.5±2.5	56.3±6.3	81.3±13.8	144.4	72.6
Woojeongaltari	–	36.6±24.1	68.9±1.1	78.6±3.6	144.8	72.9
Siraegi	–	47.5±22.5	62.5±10.0	72.5±20.0	146.3	73.6
Yeoreumchunhyang	–	60.0±2.5	60.0±2.5	62.5±5.0	151.3	76.1
Baekja	–	51.3±33.8	67.5±17.5	70.0±15.0	153.8	77.4
Myoungsan	–	59.9±12.4	63.6±8.6	74.9±2.6	160.9	81.0
Bakja	–	51.3±2.5	67.5±5.0	70.0±16.3	165.6	83.3
Sunbongaltari	–	52.6±0.1	75.8±9.2	75.8±9.2	166.4	83.7
Geonkangsiraegi	–	65.7±1.8	77.2±7.8	83.8±8.8	184.8	93.0
Songbaek	–	71.3±28.8	78.8±21.3	93.8±6.3	196.9	99.1
Housecheongok	–	71.3±26.3	81.3±16.3	91.3±8.8	198.1	99.7
Boseokaltari	–	75.0±25.0	75.0±25.0	97.5±2.5	198.8	100

^zTwenty-day-old seedlings were inoculated with *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10421 by drenching the proximal of plants with bacterial suspension at a concentration of 8×10^5 cfu/ml. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 25°C for 24 hours and then transferred to a growth room at 25°C and 80% RH with 12 hours light a day. Three, four, and five days after inoculation, disease severity of plants was investigated on a scale of 0–4.

^yResistance to bacterial soft rot: –, unknown; R, resistant.

^xDisease severity (%) = $\{ \sum (\text{disease index} \times \text{the number of diseased plants}) / (\text{the highest disease index} \times \text{the number of plants rated}) \} \times 100$.

^wAUDPC (area under the disease progress curve) = $\sum_{i=1}^n [t(i+1) - t_i] \times [DS(i+1) + DS_i] / 2$; n = number of assessments, t_i = number of days after inoculation on assessment date i , DS_i = disease severity on assessment date i .

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

^uMean disease severity ± standard deviation of two runs with ten replicates each.

한 결과, 실험한 모든 품종은 접종 후 재배 기간이 길어짐에 따라 무름병 발생이 증가하였으며, 품종에 따라 5.3부터 100의 rAUDPC를 보여 실험한 품종들은 무름병에 대하여 다양한 저항성을 보였다(Table 2). Mineral oil을 이용한 무름병균 접종법은 기존의 접종법에서 사용한 상처 내기와 접종 후 습실처리 없이도 자연발병과 유사하게 무름병을 유발하며, 세균현탁액과 mineral oil을 4:1로 혼합하고 이를 배추에 관주접종 하였을 때 무름병이 균일하게 발생하였다(Chung 등, 2003; Lee, 2002). 이는 접종 시에 사용하는 mineral oil이 식물조직에 혐기성 조건을 유도하고 수분증발을 억제하기 때문이다(Chung 등, 2003). 본 실험에서는 mineral oil 대신에 glycerol을 사용하였는데, mineral oil은 물에 녹지 않고 세균현탁액과 층이 분리되어 병원균을 고르게 접종하는데 어려운 점이 있다. 따라서 mineral oil 대신에 수분증발을 억제하면서 물에 잘 용해되는 glycerol을 세균현탁액과 4:1로 혼합하여 무 기부에 접종하는 방법을 사용했는데, 이 방법은 무름병 발생에 효과적인 것으로 생각되었다(Table 2).

실험한 60개 품종 중 종자회사에서 무름병 저항성 품종으로 공시된 7개 품종은 '아우리월동', '만사형통', '태청', '극동', '비바리월동', '강성', '탐스런' 이었는데 이들의 무름병 저항성 정도는 다양하였다(Table 2). 이들 중 '아우리월동'은 가장 낮은 5.3의 rAUDPC를 보였으며, 실험한 품종 중 가장 저항성이 높은 품종이었다. 그리고 '만사형통'과 '태청'은 각각 37.7과 38.4의 rAUDPC를 보였으며, 나머지 '극동', '비바리월동', '강성', '탐스런'은 고도로 감수성 반응을 보이는 '하우스청옥'과 '보석알타리'보다는 낮으나 상대적으로 높은 53.8-61.6의 rAUDPC를 보였다. 그리고 종자회사에서 저항성을 공시하지 않은 53개 품종 중 'YR챔피언열무', '슈퍼길조', '명가가을1호'는 각각 6.3, 15.4, 19.2의 낮은 rAUDPC를 보였다(Table 2).

이들 결과로부터 rAUDPC를 이용한 무 품종들의 무름병 저항성 기준은 rAUDPC가 0-20%이면 저항성, 21-40%는 중도저항성 그리고 41% 이상의 rAUDPC를 나타내는 품종은 감수성으로 결정하는 것이 적절할 것으로 생각되었다. 이를 기준으로, 실험한 60개 품종의 저항성을 분석하면 실험한 품종 중 저항성 품종은 4개, 중도저항성 품종은 10개 그리고 나머지 46개 품종은 감수성이었다.

무 품종의 무름병 저항성을 정도를 판정하기 위해서는 어떤 한 시기에 병조사를 하여 저항성 여부를 조사하는 것보다 Table 1과 같이 여러 시기에 병조사를 하고 AUDPC를 계산하고 이를 다시 감수성 품종의 AUDPC에 대한 상대적 AUDPC (rAUDPC)를 계산하여 저항성을 결정하는 것이 보다 정확할 것이다. 하지만 저항성 품종 육종을 위한 대량 시료의 무름병 저

항성 검정을 위해서는 실험한 모든 시료에 대하여 여러 번 무름병 발생조사를 하여 AUDPC를 구하고 rAUDPC를 계산하여 저항성을 조사하는 것은 소요되는 노동력, 비용 및 시간을 고려할 때 효율적이지 않다. 따라서 위의 rAUDPC 값과 접종 3일, 4일, 5일 후에 병조사한 발병도(%) 결과를 비교하여 병조사 시기를 결정하는 것이 필요하다. 시판 품종 60개의 rAUDPC 값에 따른 저항성 결과와 접종 3일, 4일, 5일 후의 발병도(%) 결과에 기반한 각각의 저항성 결과를 비교한 결과, 접종 4일 후에는 저항성이 5개, 중도저항성이 9개, 감수성이 46개로 품종들의 발병도(%) 기준으로 한 저항성 판정과 rAUDPC를 기준으로 한 저항성 결과를 비교하면 59개(98%)가 일치하였다. 하지만 접종 3일 후에 조사한 발병도(%) 결과로는 저항성이 9개, 중도저항성이 32개, 감수성이 19개로 실험한 품종 중 28개(47%)가 rAUDPC와 같은 저항성 반응을 보였으며, 접종 5일 후에는 저항성이 5개, 중도저항성이 6개, 감수성이 49개로 실험한 품종 중 44개(73%)가 같은 반응을 나타냈다. 따라서 대량의 무 식물들에 대하여 무름병 저항성을 검정하기 위해서는 접종 4일 후에 병조사하는 것이 효과적이라고 생각되었다.

그리고 이들 결과로부터 무의 무름병 저항성 검정법 확립을 위한 실험을 수행할 품종으로 저항성 정도에 차이가 있는 다음과 같은 6개 품종을 선발하였다. 저항성 품종으로는 rAUDPC 값이 10미만인 '아우리월동'과 'YR챔피언열무'를, 중도저항성 품종으로는 각각 33.0와 37.1의 rAUDPC 값을 나타낸 '전무후무'와 '빛고은열무'를, 그리고 70 이상의 rAUDPC 값을 보인 '선봉알타리'와 '하우스청옥'을 감수성 품종으로 선정하였다.

무의 생육 시기에 따른 무름병 발생. 선발한 6개 품종을 파종하고 13, 20, 27, 34일 동안 재배한 무 유묘에 Pcc를 접종하고 무름병 발생을 조사한 결과, 실험한 4가지 생육 시기 중 파종 후 20일된 유묘(4엽 완전 전개)는 저항성 품종인 '아우리월동'과 'YR챔피언열무', 중도저항성 품종인 '전무후무'와 '빛고은열무', 감수성 품종인 '선봉알타리'와 '하우스청옥'의 AUDPC 값이 각각 11.9와 22.5, 59.4와 64.4, 106.3과 113.8으로 선발한 품종들의 저항성 정도와 일치하는 무름병 발생을 보였다(Table 3).

그러나 파종하고 13일된 유묘(2엽 완전 전개)와 27일된 유묘(5엽 완전 전개)는 저항성 품종으로 선발한 '아우리월동'과 'YR챔피언열무', 중도저항성 품종으로 선발한 '전무후무'와 '빛고은열무'의 AUDPC 값이 각각 6.3, 13.8, 9.4, 23.8과 38.1, 70.0, 63.8, 41.3으로 모두 통계적으로 유의성 있는 차이가 없었다(Table 3). 또한 파종 후 34일된 유묘(6엽 완전 전개)에서는 '아우리월동'과 '선봉알타리'는 각각 높은 저항성과 감수성을 나타냈으나, 나머지 4개 품종들의 무름병 발생은 통계적으로 유의성 있는

Table 3. Development of bacterial soft rot on seedlings of six radish cultivars according to plant growth stage^z

Cultivar	13-day-old ^y				20-day-old				27-day-old				34-day-old			
	3 ^x	4	5	AUDPC ^w	3	4	5	AUDPC	3	4	5	AUDPC	3	4	5	AUDPC
Awooriwoldong	2.5 ^v	2.5	2.5	6.3 b ^u	2.5	5.0	8.8	11.9 c	7.5	16.7	27.8	38.1 b	0.0	0.0	7.5	3.8 c
YR Championyeolmu	2.5	5.0	12.5	13.8 b	3.8	10.0	17.5	22.5 c	11.3	35.0	47.5	70.0 b	5.6	11.1	27.8	30.6 bc
Jeonmuhumu	3.8	3.8	3.8	9.4 b	10.0	28.8	41.3	59.4 b	2.5	32.5	57.5	63.8 b	0.0	12.5	21.3	23.1 bc
Bitgoeunyeolmu	7.5	12.5	7.5	23.8 b	21.3	25.0	36.3	64.4 b	8.8	20.0	25.0	41.3 b	3.8	22.5	22.5	37.5 b
Housecheongok	27.5	32.5	41.3	80.6 ab	20.0	55.0	62.5	106.3 a	11.1	21.1	25.0	44.7 b	5.0	30.0	27.5	48.8 b
Sunbongaltari	50.0	71.3	72.5	157.5 a	32.5	50.5	62.5	113.8 a	25.0	57.5	78.8	121.9 a	35.0	57.5	78.8	131.9 a

^zThirteen-, twenty-, twenty seven-, and thirty four-day-old seedlings were inoculated with *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10421 by drenching the proximal of plants with bacterial suspension at a concentration of 8×10^5 cfu/ml. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 25°C for 24 hours and then transferred to a growth room at 25°C and 80% RH with 12 hours light a day. Three, four, and five days after inoculation, disease severity of plants was investigated on a scale of 0–4 and then converted to a percentage value.

^y13-day-old, fully expanded two-leaf stage; 20-day-old, fully expanded four-leaf stage; 27-day-old, fully expanded five-leaf stage; 34-day-old, fully expanded six-leaf stage.

^xDays after inoculation.

^wAUDPC (area under the disease progress curve) = $\sum_{i=1}^n [t(i+1) - t_i] \times [DS(i+1) + DS_i] / 2$; n = number of assessments, t_i = number of days after inoculation on assessment date i , DS_i = disease severity on assessment date i .

^vEach value represents the mean disease severity (%) of two runs with ten replicates each.

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

차이가 없었다.

Doullah 등(2006)은 *Alternaria brassicicola*에 의한 검은무늬 병에 대한 무의 감수성 품종은 무의 생장 단계에 따라 서로 다른 병 발생 정도를 보이는데, 오래된 잎이 어린 잎에 비해 더 높은 감수성을 나타낸다고 보고하였다. 이와 달리 본 실험의 경우에는 감수성 품종으로 선발한 '선봉알타리'는 무의 생육 정도와 관계없이 높은 감수성을 보였으며, '하우스청록'은 20일, 13일, 34일, 27일 순으로 무름병 발생이 높았다.

저항성 품종을 육성하기 위해서는 신속하게 병리검정하는 것이 중요하고 또한 저항성 품종의 저항성과 감수성 품종의 감수성이 가장 잘 나타나는 무의 생육 시기에 접종해야 하는데, 무 종자를 파종하고 온실(25°C ± 5°C)에서 20일 정도 재배하여 3–4엽이 완전 전개하였을 때 *Pcc*를 접종하는 것이 효과적이었다.

접종원 농도에 따른 무름병 발생. 선발한 6개 품종의 무 유묘에 병원균 *Pcc*를 8×10^4 , 8×10^5 , 8×10^6 cfu/ml의 농도로 접종하고 무름병 발생을 조사한 결과, 실험한 품종들의 평균 AUDPC는 각각 49.1, 98.7, 152.2로 접종 농도가 증가할수록 저항성 및 감수성 품종들의 무름병 발생은 증가하였다(Table 4). 감수성 품종들은 8×10^4 , 8×10^5 , 8×10^6 cfu/ml로 접종 농도가 증가함에 따라 77.2, 166.2, 176.6의 평균 AUDPC를 보였으며, 저항성 품종들은 41.9, 40.4, 122.2의 평균 AUDPC를 보였다. 즉, 감수성 품종들은 8×10^4 cfu/ml로 접종하였을 때에는 AUDPC가

66.3–88.1이었으나 8×10^5 – 8×10^6 cfu/ml 농도로 접종하였을 때에는 접종원 농도에 관계없이 AUDPC가 176.3–199.4였다. 이와 달리 저항성 품종들은 8×10^4 – 8×10^5 cfu/ml로 접종하였을 때에는 접종원 농도에 관계없이 AUDPC가 27.5–56.3이었으나, 8×10^6 cfu/ml 농도로 접종하였을 때에는 무름병 발생이 크게 증가하여 AUDPC가 90.6–153.8이었다.

실험한 3가지 접종 농도 중 8×10^5 cfu/ml로 접종하였을 때, 저항성 품종, 중도저항성, 감수성 2개 품종들의 AUDPC는 각각 39.7과 41.0, 90.3과 88.8, 166.0과 166.3으로 저항성 품종, 중도저항성, 감수성 품종 간의 무름병 발생(AUDPC)은 통계적으로 유의성 있는 차이를 나타냈다(Table 4). 하지만 8×10^4 cfu/ml와 8×10^6 cfu/ml로 접종하였을 때에는 실험한 저항성 품종, 중도저항성, 감수성 품종 간의 AUDPC는 통계적으로 유의성 있는 차이를 보이지 않았다.

멜론의 덩굴쪼김병(*Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*) 저항성은 단인자우성 유전자인 'Fom-1', 'Fom-2'에 의한 질적 저항성으로 알려져 있는데(Risser 등, 1976), 이들 저항성은 접종 농도가 증가하여도 저항성에는 변화가 없었다(Lee 등, 2015). 그러나 고추의 역병(*Phytophthora capsici*) 저항성의 경우 양적 저항성인데(Lefebvre와 Palloix, 1996; Lefebvre 등, 2002; Thabuis 등, 2003, 2004), 접종 농도가 증가하면 저항성이 감소한다고 알려져 있고(Barksdale 등, 1984; Kim 등, 1989), 고추의 풋마름병(*Ralstonia solanacearum*) 저항성도 접종원 농도가 증가함에 따라 풋마름병 발생이 증가하였다고 하였다(Hwang 등, 2017). 따

Table 4. Development of bacterial soft rot on seedlings of six radish cultivars according to inoculum concentration of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*^z

Cultivar	Inoculum concentration (cfu/ml)											
	8.0×10 ⁴				8.0×10 ⁵				8.0×10 ⁶			
	3 ^y	4	5	AUDPC ^x	3	4	5	AUDPC	3	4	5	AUDPC
Awooriwoldongmoo	10.0 ^w	25.0	42.5	56.3 a ^v	13.1	15.6	24.4	39.7 c	46.3	62.5	90.0	153.8 ab
YR Championyeolmu	5.0	11.3	22.5	27.5 a	13.1	16.3	20.6	41.0 c	23.8	32.5	68.8	90.6 b
Jeonmuhumu	22.5	31.3	50.0	78.8 a	28.8	41.3	45.0	90.3 b	62.5	71.3	80.0	173.8 ab
Bitgoeunyeolmu	17.5	40.0	62.5	88.8 a	30.6	38.1	40.0	88.8 b	55.0	56.3	61.3	141.9 ab
Housecheongok	12.5	32.5	48.8	69.4 a	61.9	66.3	75.6	166.0 a	63.8	73.8	73.8	174.4 ab
Sunbongaltali	11.3	40.0	67.5	85.0 a	63.1	67.5	71.3	166.3 a	61.3	76.3	82.5	178.8 a

^zTwenty-day-old seedlings were inoculated with *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10421 by drenching the proximal of plants with bacterial suspension at concentrations of 8×10⁴, 8×10⁵ and 8×10⁶ cfu/ml. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 25°C for 24 hours and then transferred to a growth room at 25°C and 80% RH with 12 hours light a day. Three, four, and five days after inoculation, disease severity of plants was investigated on a scale of 0-4 and then converted to a percentage value.

^yDays after inoculation.

^xAUDPC (area under the disease progress curve)= $\sum_{i=1}^n [t(i+1)-t_i] \times [DS(i+1)+DS_i]/2$; n=number of assessments, t_i=number of days after inoculation on assessment date i, DS_i=disease severity on assessment date i.

^wEach value represent the mean disease severity (%) of two runs with ten replicates each.

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

라서 무의 무름병 저항성도 고추의 역병 및 풋마름병 저항성과 유사한 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

접종 후 재배 온도에 따른 무 무름병 발생. 선발한 6개 품종의 무 유묘에 *Pcc*를 접종하고 20°C, 25°C, 30°C에서 습실처리하고 재배하여 무름병 발생을 조사한 결과, 재배온도가 20°C, 25°C, 30°C일 때 6개 품종의 평균 AUDPC 값은 각각 49.1, 83.4, 132.3로 재배 온도가 올라갈수록 무름병 발생은 증가하였다 (Table 5). Raju 등(2008)도 20–35°C에서 무에 무름병이 발생하며, 상대습도가 100%이고 온도가 35°C인 경우에 무름병이 가장 심하게 발생했다고 하였다. 감자의 경우에도 접종 후 재배 온도는 무름병 발생에 결정적인 역할을 한다고 알려져 있다(Fox 등, 1971). 본 연구에서도 이들 결과와 마찬가지로 접종 후 재배 온도가 증가함에 따라 무에 무름병 발생도 증가하였다(Table 5).

실험한 세 가지 재배온도 중 25°C와 30°C에서 저항성 품종('아우리월동'과 'YR참피온열무'), 중도저항성 품종('전무후무'와 '빛고은열무'), 감수성 품종('선봉알타리'와 '하우스청옥') 간의 무름병 발생은 모두 통계적으로 유의성 있는 차이를 나타냈다 (Table 5). 하지만 접종하고 20°C에서 재배하였을 때에는 감수성, 중도저항성, 저항성 품종 간의 AUDPC 값은 통계적으로 유의성 있는 차이를 보이지 않았다(Table 5).

효과적인 병 저항성 검정을 위해서는 저항성, 중도저항성, 감수성 품종들의 병 발생이 통계적으로 차이를 보이는 것이 중

요한데, 25°C와 30°C는 이 조건을 만족하였다. 하지만 평균 발병도를 살펴보면 25°C에서는 저항성, 중도저항성, 감수성 품종의 AUDPC가 각각 11.6, 54.1, 184.1이고 30°C에서는 79.4, 118.8, 198.8로 25°C에서는 저항성 품종과 감수성 품종의 AUDPC 차이가 173인 반면에 30°C에서는 119.4이다. 즉, 접종 후 25°C에서 재배하였을 때에 저항성 품종과 감수성 품종의 무름병 발생 차이가 더 크고, 저항성 품종들에서 무름병 발생이 가장 적었다. 따라서 무의 무름병 저항성 검정을 위해서는 *Pcc*를 접종하고 25°C에서 습실처리하고 재배하는 것이 효과적이라고 생각되었다.

만약 무의 무름병에 대한 저항성이 질적 저항성(qualitative resistance)라면, 멜론의 덩굴조끼병(*F. oxysporum* f. sp. *melonis*)에 대한 저항성과 배추의 뿌리혹병(*Plasmodiophora brassicae*)에 대한 저항성처럼 저항성 품종에서 접종 농도, 유묘의 생육 시기, 접종 후 재배 온도 등 발병조건에 따라 병 발생이 거의 차이가 없으며 병원균은 race가 분화되어 있을 것이다(Kim 등, 2016; Lee 등, 2015). 한편, 양적 저항성이라면 고추의 역병(*P. capsici*) 저항성과 양배추의 뿌리혹병(*P. brassicae*) 저항성과 같이 레이스 분화는 없고 단지 균주의 병원력에 반비례하여 저항성을 나타내며, 저항성 품종이라도 발병조건에 따라 저항성 정도에 차이를 보일 것이다(Jo 등, 2014, 2016). 본 연구에서 저항성 품종으로 선발된 '아우리월동'과 'YR참피온열무'는 접종원 농도, 접종하는 무 유묘의 생육 시기, 접종 후 재배온도에 따라 저항성 정도에 차이를 나타냈다. 따라서 '아우리월동'과 'YR참피온열무'

Table 5. Development of bacterial soft rot on seedlings of six radish cultivars according to incubation temperature after inoculation^z

Cultivar	Incubation temperature (°C)											
	20				25				30			
	3 ^y	4	5	AUDPC ^x	3	4	5	AUDPC	3	4	5	AUDPC
Awooriwoldongmoo	10.0 ^w	16.3	18.8	35.6 a ^v	1.3	6.3	7.5	11.3 c	18.8	31.3	52.5	76.3 c
YR Championyeolmu	5.0	11.3	13.8	23.1 a	0.6	6.9	8.8	11.9 c	21.3	40.0	42.5	82.5 c
Jeonmuhumu	3.8	12.5	15.0	23.8 a	6.9	15.6	41.9	52.8 b	38.8	50.0	60.0	118.8 b
Bitgoeunyeolmu	3.8	31.3	45.0	57.5 a	13.1	20.0	44.4	55.4 b	40.0	47.5	62.5	118.8 b
Housecheongok	13.8	48.8	51.3	88.1 a	67.5	70.0	77.5	176.3 a	68.8	82.5	93.8	198.1 a
Sunbongaltali	18.8	28.8	37.5	66.3 a	71.3	80.0	93.8	192.8 a	71.3	81.3	93.8	199.4 a

^zTwenty-day-old seedlings were inoculated with *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10421 by drenching the proximal of plants with bacterial suspension of at a concentration of 8×10^5 cfu/ml. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 20, 25 and 30°C for 24 hours and then transferred to each growth room at 20, 25 and 30°C with 12 hours light a day. Three, four, and five days after inoculation, disease severity of plants was investigated on a scale of 0–4 and then converted to a percentage.

^yDays after inoculation.

^xAUDPC (area under the disease progress curve) = $\sum_{i=1}^n [t(i+1) - t_i] \times [DS(i+1) + DS_i] / 2$; n = number of assessments, t_i = number of days after inoculation on assessment date i , DS_i = disease severity on assessment date i .

^wEach value represent the mean disease severity of two runs with ten replicates each.

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

의 무름병균 *Pcc*에 대한 저항성은 양적 저항성인 것으로 생각되었다.

이상의 결과로부터 무 무름병의 저항성 검정을 위한 효과적인 방법으로 종자를 파종하고 온실(25°C±5°C)에서 20일 동안 재배한 무 유묘의 기부에 *Pcc* 세균현탁액(8×10^5 cfu/ml)을 5 ml 씩 관주접종하고, 25°C 습실상에서 24시간동안 습실처리한 후에 25°C의 항온항습실(상대습도 80%)로 식물체를 이동하여 하루 12시간씩 광을 조사하면서 재배하고, 접종 4일 후에 무 무름병의 발병도(%)를 조사하는 것을 제안하고자 한다.

요 약

Pectobacterium carotovorum subsp. *carotovorum* (*Pcc*)에 의한 무름병은 전세계적으로 문제가 되고 있고 특히 온난 다습한 지역에서 문제가 심각하다. 본 연구는 *Pcc*에 의해 발생하는 무 무름병에 대한 효율적인 저항성 검정법을 확립하기 위하여 수행되었다. 시판 무 품종 60개의 *Pcc*에 대한 저항성 정도를 조사하고, 추후 실험을 위해 저항성에 차이를 보이는 6개 품종을 선발하였다. 이들 6개 품종의 접종하는 무의 생육 시기, 접종원 농도, 접종 후 재배 온도 등의 발병 조건에 따른 무름병 발생을 조사하였다. 이들 실험의 결과로부터 무의 무름병에 대한 저항성을 검정하기 위해서는, 무 종자를 파종하고 온실(25°C±5°C)에서 20일 동안 재배한 유묘에 *Pcc* 균주의 세균현탁액(8×10^5 cfu/ml)을 분무하여 접종하고, 접종한 식물은 25°C 습실상에서

24시간 동안 배양한 후에 25°C, 상대습도 80%의 생육상으로 이동하여 재배하는 것을 제안하고자 한다.

Conflicts of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgments

This research was supported by Golden Seed Project Vegetable Seed Center (213006-05-2-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

- Aleck, J. R. and Harrison, M. D. 1978. The influence of inoculum density and environment on the development of potato blackleg. *Am. J. Potato Res.* 55: 479-494.
- 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.
- Chung, E. K., Zhang, X. Z., Choi, B. R., Lee, E. J., Yeung, Y. R. and Kim, B. S. 2003. Screening of disease resistance of Chinese cabbage

- cultivars and lines to bacterial soft rot. *Res. Plant Dis.* 9: 39-41. (In Korean)
- Collmer, A. and Keen, N. T. 1986. The role of pectic enzymes in plant pathogenesis. *Annu. Rev. Phytopathol.* 24: 383-409.
- De Boer, S. H. and Kelman, A. 1978. Influence of oxygen concentration and storage factors on susceptibility of potato tubers to bacterial soft rot (*Erwinia carotovora*). *Potato Res.* 21: 65-79.
- Doullah, M. A. U., Meah, M. B. and Okazaki, K. 2006. Development of an effective screening method for partial resistance to *Alternaria brassicicola* (dark leaf spot) in *Brassica rapa*. *Eur. J. Plant Pathol.* 116: 33-43.
- Eriksson, A. R. B., Andersson, R. A., Pirhonen, M. and Palva, E. T. 1998. Two-component regulators involved in the global control of virulence in *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 11: 743-752.
- Fox, R. T. V., Manners, J. G. and Myers, A. 1971. Ultrastructure of entry and spread of *Erwinia carotovora* var. *atroseptica* into potato tubers. *Potato Res.* 14: 61-73.
- Hwang, S. M., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, H. and Choi, G. J. 2017. Development of an efficient bioassay method to evaluate resistance of chili pepper cultivars to *Ralstonia solanacearum*. *Res. Plant Dis.* 23: 334-347. (In Korean)
- Jee, S. N., Malhotra, S., Roh, E. J., Jung, K. S., Lee, D. W., Choi, J. H. et al. 2012. Isolation of bacteriophages which can infect *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*. *Res. Plant Dis.* 18: 225-230. (In Korean)
- 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. Hortic. Sci. Technol.* 34: 442-452. (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. Hortic. Sci. Technol.* 32: 66-76. (In Korean)
- Jones, S., Yu, B., Bainton, N. J., Birdsall, M., Bycroft, B. W., Chhabra, S. R. et al. 1993. The lux autoinducer regulates the production of exoenzyme virulence determinants in *Erwinia carotovora* and *Pseudomonas aeruginosa*. *EMBO J.* 12: 2477-2482.
- Kotoujansky, A. 1987. Molecular genetics of pathogenesis by soft-rot *Erwinias*. *Annu. Rev. Phytopathol.* 25: 405-430.
- 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 cultivar of Chinese cabbage. *Plant Pathol. J.* 32: 423-430.
- 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.
- KSPP. 2009. Vegetables. In: *List of Plant Disease in Korea 5th ed.*, eds. by W.-G. Kim and H. M. Koo, pp. 99-103. The Korean Society of Plant Pathology, Suwon, Korea. (In Korean)
- Lee, S. H. 2002. Effective inoculation method and induction of resistance against bacterial soft rot on Chinese cabbage. Master thesis. Chungbuk National University, Cheongju, Korea. (In Korean)
- Lee, W. J., Lee, J. H., Jang, K. S., Choi, Y. H., Kim, H. T. and Choi, G. J. 2015. Development of efficient methods for melon plants resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 33: 70-82.
- Lefebvre, V. and Palloix, A. 1996. Both epistatic and additive effects of QTLs are involved in polygenic induced resistance to disease: a case study, the interaction pepper-*Phytophthora capsici* Leonian. *Theor. Appl. Genet.* 93: 503-511.
- Lefebvre, V., Pflieger, S., Thabuis, A., Caranta, C., Blattes, A., Chauvet, J. C. et al. 2002. Towards the saturation of the pepper linkage map by alignment of three intraspecific maps including known-function genes. *Genome* 45: 839-854.
- Madden, L. V., Hughes, G. and van den Bosch, F. 2007. *The Study of Plant Disease Epidemics*, APS Press, St. Paul, MN, USA. 421 pp.
- Pérombelon, M. C. M., Gullings-Handley, J. and Kelman, A. 1979. Population dynamics of *Erwinia carotovora* and pectolytic *Clostridium* spp. in relation to decay of potatoes. *Phytopathology* 69: 167-173.
- Pirhonen, M., Flego, D., Heikinheimo, R. and Palva, E. T. 1993. A small diffusible signal molecules is responsible for the global control of virulence and exoenzyme production in the plant pathogen *Erwinia carotovora*. *EMBO J.* 12: 2467-2476.
- Raju, M. R. B., Pal, V. and Jalali, I. 2008. Inoculation method of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and factors influencing development of bacterial soft rot in radish. *J. Mycol. Pl. Pathol.* 38: 311-315.
- Ren, J., Petzoldt, R. and Dickson, M. H. 2001. Screening and identification of resistance to bacterial soft rot in *Brassica rapa*. *Euphytica* 118: 271-280.
- Rimmer, S. R. 2007. Bacterial soft rot. In: *Compendium of Brassica Disease*, eds. by S. R. Rimmer, V. I. Shattuck and L. Buchwaldt, pp. 59-60. APS Press, St. Paul, MN, USA.
- Risser, G., Banihashemi, Z. and Davis, D. W. 1976. A proposed nomenclature of *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* races and resistance genes in *Cucumis melo*. *Phytopathology* 66: 1105-1106.
- Thabuis, A., Palloix, A., Pflieger, S., Daubèze, A. M., Caranta, C. and Lefebvre, V. 2003. Comparative mapping of *Phytophthora* resistance loci in pepper germplasm: Evidence for conserved resistance loci across *Solanaceae* and for a large genetic diversity. *Theor. Appl. Genet.* 106: 1473-1485.
- Thabuis, A., Lefebvre, V., Bernard, G., Daubèze, A. M., Phaly, T., Pochard, E. et al. 2004. Phenotypic and molecular evaluation of a recurrent selection program for a polygenic resistance to *Phytophthora capsici* in pepper. *Theor. Appl. Genet.* 109: 342-351.
- Williams, P. H. 1981. *Screening crucifers for multiple disease resistance*. University of Wisconsin, Medison, WI, USA. 105 pp.