

효율적인 배추 무름병 저항성 검정법 개발

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

***Corresponding author**

Tel: +82-42-860-7434

Fax: +82-42-861-4913

E-mail: kjchoi@kriict.re.kr

이수민^{1,2} · 최용호¹ · 김현^{1,3} · 김흥태² · 최경자^{1,3*}¹한국화학연구원 친환경신물질연구센터, ²충북대학교 식물학과,³과학기술연합대학원대학교 의약화학 및 약리생물학과Soo Min Lee^{1,2}, Yong Ho Choi¹, Hun Kim^{1,3}, Heung Tae Kim², and Gyung Ja Choi^{1,3*}¹Center for Eco-friendly New Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 34114, Korea²Department of Plant Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea³Department of Medicinal Chemistry and Pharmacology, University of Science and Technology, Daejeon 34113, 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 Chinese cabbage to bacterial soft rot. Resistance degrees of 65 commercial Chinese cabbage cultivars to the *Pcc* KACC 10225 isolate were investigated. For further study, three Chinese cabbage cultivars (Taebong, Hadaejangkun, CR Alchan) 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 growth stage of Chinese cabbage seedling, inoculum concentration, and incubation temperature after inoculation. On the basis of the results, we suggest that an efficient screening method for resistant Chinese cabbage to *Pcc* is to inoculate twenty one-day-old seedlings with a bacterial suspension of *Pcc* at a concentration of 1×10^7 cfu/ml, and to incubate the plants in a dew chamber at 25°C for 24 hr and then to cultivate in a growth room at 25°C and 80% relative humidity with 12-hr light per day.

Keywords: Bacterial soft rot, Breeding, Chinese cabbage, Disease resistance, Screening

Received August 14, 2020

Revised September 4, 2020

Accepted September 4, 2020

서론

배추의 무름병은 그람양성세균인 *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (*Pcc*)에 의해 발생한다(Korean Society of Plant Pathology, 2009). *Pcc*는 기주 식물 잔재물에서 월

동하고 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 등으로 병원균의 농도가 10^7 cfu/g으로 증가하게 되고, quorum sensing autoinducer인 *N*-(3-oxohexanoyl)-L-homoserine lactone이 충분히 축적되면 cellulase, protease, pectate lyase, polygalacturonase와 같은 병원성 관련 효소를 생산하게 된다(Collmer와 Keen, 1986; Eriksson 등, 1998; Jones 등, 1993; Kotoujansky, 1987; Péom-

Research in Plant Disease

pISSN 1598-2262, eISSN 2233-9191

www.online-rpd.org

© The Korean Society of Plant Pathology

© This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

belon 등, 1979; Pirhonen 등, 1993). 이러한 효소는 기주의 세포 벽을 분해하여 세포막에 손상을 줌으로써 세포 내 전해질이 누출되어 썩는 악취와 함께 식물 조직의 무름 증상을 유발한다 (Collmer와 Keen, 1986; Kotoujansky, 1987).

*Pcc*는 기주 범위가 매우 넓은 세균이고, 토양에서 오랫동안 생존이 가능하며, 작물의 모든 생육 기간에 발생하는데 한번 잎에 감염되면 빠른 속도로 다른 조직으로 전이되고, 저장 중에도 발생하기 때문에 *Pcc*에 의한 무름병은 경제적 손실이 큰 식물병 중 하나이다 (Aleck과 Harrison, 1978; De Boer와 Kelman, 1978; Fritz와 Honma, 1987; Ren 등, 2001). Streptomycin과 oxolinic acid 등의 항생제 및 탄산칼슘제 등을 이용하는 화학적 방제가 널리 사용되고 있다. 최근에는 *Pseudomonas*나 *Bacillus*와 같은 길항미생물을 이용하거나 (Colyer와 Mount, 1984; Geels와 Schippers, 1983; Raju 등, 2006; Zhao 등, 2013), *Pcc*를 특이적으로 감염하여 용균시키는 박테리오파지를 생물학적 방제 방법으로 이용하려는 시도가 있다 (Jee 등, 2012; Rimmer, 2007). 하지만 우리나라의 기후가 점점 아열대 기후로 변하면서 배추의 무름병 발생도 크게 증가하고 있어, 이들 방법을 통한 실질적인 방제효과를 얻기는 매우 어려운 현실이다.

일반적으로 저항성 품종을 재배하여 식물병, 특히 토양병, 세균병 및 바이러스병을 방제하는 것은 친환경적이면서도 가장 효과적인 방제 방법으로 인식되고 있다 (Lee et al., 2018a; Taylor et al., 2002). 무름병에 대한 저항성 품종 개발을 개발하기 위해서는 저항성 유전자를 확보하고 이를 이용하여 저항성 품종 육종을 진행하게 되는데, 이 때 대량 시료에 대하여 효과적으로 병 저항성을 검정하는 것이 매우 중요하다. 무름병 저항성 유전자 선별을 위한 연구들이 보고되었다 (Ren 등, 2001; Williams, 1981). 그리고 Lee 등 (2018b)은 무의 무름병에 대한 저항성 품종 개발을 위한 효과적인 저항성 검정 방법에 대하여 보고하였다. 하지만 무름병에 대한 저항성 배추 품종 육성을 위한 효과적인 저항성 검정법에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 효율적인 배추 무름병 저항성 검정법을 확립하기 위해, 시판 품종 65개의 배추 품종들의 저항성 정도를 조사하고, 이 결과로부터 저항성 정도가 다른 배추 품종 3개를 선별하여 접종하는 배추 유묘의 생육 시기, 접종원 농도, 접종 후 배추의 재배 온도에 따른 무름병 발생을 조사하였다.

재료 및 방법

식물체 준비. 시판 중인 배추 품종 65개 (Syngenta Korea [Seoul, Korea]로부터 '가을황', '신농봄', 'CR일사천리', '아름찬', '올품', '황금알', 'CR농심', 'CR안심', 'CR진심' 및 'CR황금', Mon-

santo Korea [Seoul, Korea]로부터 '강력여름', '노랑관동', '노랑김장', '노랑김치', '부활', '불암3호', '불암여름배추', '불암플러스', '삼보엇갈이', '써그린', '진청', '참이슬엇갈이', '챔피온' 및 'CR청록'을, Nongwoobio [Suwon, Korea]로부터 '금방울', '대통', '뚝심엇갈이', '맛춤', '산울림', '쌈이랑', '우리', '월동천하', '추월', 'CR맛', 'CR여름맛', 'CR입춘', 'CR하계' 및 '월동대장'을, Farmhannong [Seoul, Korea]으로부터 'CR알찬'과 'CR맛짱'을, Koregon [Anseong, Korea]에서 'CR요시마사', 'CR키요시', 'CR황록' 및 '금촌얼갈이'를, Hyundai Seed [Icheon, Korea]로부터 '씨알제왕', 'CR고냉지노랑' 및 'CR황태자'를, Jeil Seed [Jeungpyeong, Korea]로부터 'CR명가'와 '항암쌈배추'를, Sakata Korea [Seoul, Korea]로부터 '노랑맛하장', '파워춘광', '춘광', '옥황씨알', '상장군', '영광', '태봉', '천하장군', '하대장군', 'CR명품', 'CR장군'을, Nonghyup Seed [Anseong, Korea]로부터 'CR강산'을, Woori Seed [Sejong, Korea]로부터 '청옥'과 '청야'를, Takii Korea [Seoul, Korea]에서 'CR하루요시'를, 그리고 Changxing Seed [Wuhan, China]로부터 'Jinjinsanhaodabaicai'를, 중국 Degao Seed [Dezhou, China]로부터 'DegaoCR1016'와 'DegaoCR117'을, 일본 Norin [Tokyo, Japan]으로부터 'Akimeki')를 구입하여 실험에 사용하였다.

발병 조건에 따른 배추 품종들의 무름병 발생 실험은, 65개 시판 배추 품종의 *Pcc*에 대한 저항성 정도를 조사한 결과로부터 무름병에 대하여 저항성 정도가 서로 다른 3개 품종, '태봉 (Sakata Korea)', '하대장군 (Sakata Korea)', 'CR알찬 (Farmhannong)'을 선별하여 실험에 사용하였다.

배추의 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±5°C)에서 18일 동안 재배한 유묘를 사용하였다. 그리고 접종하는 배추의 생육 시기에 따른 무름병 발생 정도를 조사하기 위해서는 앞에서와 동일한 방법으로 파종하고 온실 (25±5°C)에서 14일, 21일, 28일, 35일 동안 재배한 각각 2엽, 4엽, 6엽, 8엽이 완전 전개된 유묘를 실험에 사용하였다 (Fig. 1).

접종원 준비. 배추 무름병균은 농촌진흥청 농업유전자원 센터 (KACC, Rural Development Administration, Jeonju, Korea)로부터 *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10225 균주를 분양 받아 실험에 사용하였다. Petri dish (직경 8.5 cm)에 준비한 nutrient agar (Becton, Dickinson and Co., Sparks, MD, USA) 배지에 KACC 10225 균주를 도말하여 접종하고 30°C에서 1일 동안 배양한 후에 nutrient broth (NB; Becton, Dickinson

and Co.) 배지를 5 ml씩 넣고 잘 섞어주었다. 이 세균현탁액을 2 ml 취하여 새로운 NB 배지 200 ml에 접종하고 30°C에서 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 멸균수로 희석하고 UV spectrophotometer (Beckman Coulter Inc.)로 OD₆₀₀값을 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 배추 무름병 발생실험을 위해서는, 1×10⁸ cfu/ml로 조정된 세균 현탁액을 10배씩 희석하여 1×10⁷, 1×10⁶, 1×10⁵ cfu/ml 농도의 세균 현탁액을 준비하였다.

병원균 접종 및 병조사. 준비한 Pcc KACC 10225 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 24시간 동안 배양하였으며, 습실처리한 배추 유묘는 항온항습실(25°C, 상대습도 80%)로 이동하여 하루에 12시간씩 광(55 μmol/m²·sec)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.

배추 유묘에 발생한 무름병의 발생 정도를 Table 1과 같은 기준으로 발병도로 조사하였으며, 이를 다시 백분율로 환산하여 발병도(%)로 나타내었다. 그리고 조사한 각 품종의 발병도(%)를 아래와 같은 식에 따라 병진전곡선하면적(area under the disease progress curve, AUDPC)를 계산하였다(Jeger와 Viljanen-Rollinson, 2001; Madden 등, 2007). 그리고 65품종의 무름병 발생 실험의 경우에는 각 품종의 상대적 AUDPC (relative AUDPC, rAUDPC)를 계산하였는데, 감수성이 가장 높은 'CR알찬'의 AUDPC에 대한 각 품종의 AUDPC의 백분율(%)로 하였다.

$AUDPC = \sum_{i=1}^n [t(i+1) - ti] \times [DS(i \times 1) + DSi]/2$; n=number of assessments, ti=number of days after inoculation on assessment date i, DSi=disease severity on assessment date i.

그리고 평균 발병도가 20% 이하이면 저항성으로, 21-45%는 중도저항성으로, 46% 이상은 감수성으로 판정하였다.

통계 분석. 모든 실험은 2회 독립적인 반복을 수행하였고, 반복당 개체는 10개로 하였다. SAS version 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

무름병에 대한 시판 배추 품종의 저항성. 배추의 무름병에 대한 효율적인 저항성 검정 방법을 확립하기 위한 실험에는 저항성 정도가 서로 다른 품종이 필요하다. 이를 위해 시판 무 품종 65개의 무름병 발생을 실험한 결과, 실험한 모든 품종은 접종 후 재배 기간이 길어짐에 따라 무름병 발생이 증가하였으며, 품종에 따라 15부터 100의 rAUDPC를 나타내어 실험한 품종들은 무름병에 대하여 다양한 정도의 저항성을 나타낼 수 있었다(Table 2). Chung 등(2003)은 mineral oil을 이용한 무름병균 관주접종법은 기존의 접종법에서 사용한 상처 내기와 접종 후 습실처리 없이도 자연발병과 유사하게 세균 무름병을 유도한다고 하였다. 그리고 Lee 등(2018b)은 무의 무름병 저항성을 검정할 때 mineral oil 대신에 glycerol을 사용하였는데, 이 방법은 mineral oil이 물에 녹지 않고 세균현탁액과 층이 분리되어 병원균을 일정한 양으로 접종하는데 어려움을 유발하는 점을 개선하고 수분증발은 억제하여 무름병이 고르게 발생하였다고 보고하였다. 본 실험에서도 배추의 무름병 접종을 위해 포자현탁액에 glycerol을 첨가하였을 때 배추 유묘에 무름병이 고르게 발생하여 무름병 발생에 효과적이라고 생각되었다 (Table 2).

실험한 65개 품종 중 종자회사에서 무름병 저항성 품종으로 판매하고 있는 품종은 '태봉', 'CR 요시사마', '하대장군', 'CR키요시', 'CR하루요시', 'CR제왕', 'CR청록', '천하장군' 등 8개 품종이었는데, 이들 중 '태봉'은 가장 낮은 14.8의 rAUDPC을 나타내 실험한 품종 중 가장 저항성이 높은 품종이었다(Table 2). 그리고 '하대장군'은 42.6의 rAUDPC를 보여 중도저항성 품종으로 생각

Table 1. Disease index of Chinese cabbage 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

Table 2. Resistance degree of 65 commercial Chinese cabbage cultivars to *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10225^a

Cultivar	Trait ^b	Days after inoculation ^c				AUDPC ^d	rAUDPC ^e
		4	5	6	7		
Taebong	R	0.0±0.0 ^f	5.0±0.0	25.0±2.2	25.0±2.2	40.0	15
Sangjangkun	-	5.0±1.3	15.0±1.3	30.0±1.8	30.0±1.8	62.5	23
Norangkimchi	-	5.0±0.4	10.0±0.9	35.0±1.9	35.0±1.9	65.0	24
Powerchunkwang	-	0.0±1.3	15.0±1.3	35.0±1.8	35.0±1.8	67.5	25
CR Jangkun	-	5.0±1.3	35.0±1.3	35.0±1.9	40.0±1.9	77.5	29
Gaeulhwang	-	15.0±0.4	30.0±0.4	35.0±1.9	35.0±1.9	82.5	31
Bulam3ho	-	5.0±0.4	15.0±1.3	45.0±1.9	45.0±1.9	85.0	32
Buhwal	-	15.0±0.0	40.0±0.9	40.0±2.7	40.0±2.7	95.0	35
Sinnongbom	-	10.0±0.0	20.0±1.9	55.0±2.2	55.0±1.8	102.5	38
CR Kangsan	-	10.0±1.9	35.0±1.9	40.0±2.2	45.0±1.8	102.5	38
CR Yosimasa	R	5.0±1.8	20.0±1.8	55.0±3.5	55.0±3.5	105.0	39
Norangmathajang	-	15.0±0.9	15.0±1.3	55.0±2.7	55.0±2.7	105.0	39
Yeongkwang	-	0.0±1.7	30.0±1.8	50.0±2.0	50.0±2.0	105.0	39
Woori	-	30.0±2.6	35.0±2.6	40.0±1.8	40.0±1.9	107.5	40
Gimguem3hodae-baekche	-	15.0±1.3	25.0±2.2	50.0±3.5	50.0±3.5	107.5	40
Sanullim	-	25.0±1.8	45.0±2.2	45.0±1.8	45.0±1.8	115.0	43
Hadaejangkun	R	20.0±1.8	35.0±1.9	45.0±3.5	50.0±4.5	115.0	43
Norangkimjang	-	25.0±1.9	35.0±1.9	50.0±1.9	50.0±1.9	122.5	45
Ssamirang	-	30.0±1.8	45.0±1.8	45.0±1.8	55.0±3.5	122.5	45
CR Kiyosi	R	15.0±2.2	25.0±2.2	60.0±3.3	60.0±3.3	122.5	45
CR Myeongka	-	25.0±1.9	35.0±1.9	50.0±2.0	50.0±2.0	122.5	45
CR 1016	-	20.0±1.3	25.0±1.4	60.0±3.6	60.0±3.6	125.0	46
CR Ilsacholli	-	25.0±2.2	50.0±2.2	50.0±4.5	55.0±4.5	127.5	47
Aremchan	-	25.0±2.2	40.0±2.2	50.0±2.0	50.0±2.0	127.5	47
Bulamplus	-	25.0±1.3	30.0±1.4	60.0±3.3	60.0±3.3	130.0	48
CR117	-	5.0±1.7	45.0±1.8	55.0±2.7	55.0±2.7	130.0	48
CR Mat	-	40.0±1.8	40.0±2.2	50.0±4.5	50.0±4.5	135.0	50
CR Cheongrok	-	15.0±1.1	20.0±1.1	75.0±3.7	75.0±3.7	140.0	52
Okhwangssial	-	25.0±1.8	35.0±2.2	65.0±2.6	65.0±2.6	140.0	52
Norangkwandong	-	0.0±1.9	45.0±2.7	65.0±2.6	65.0±2.6	142.5	53
CR Myeongpum	-	20.0±1.8	35.0±1.8	70.0±3.8	70.0±3.8	142.5	53
Champion	-	30.0±1.8	30.0±1.8	65.0±2.6	70.0±3.9	145.0	54
Cheongya	-	25.0±2.2	25.0±2.2	70.0±2.7	75.0±3.7	145.0	54
CR Haruyosi	R	15.0±0.9	20.0±1.3	80.0±5.2	80.0±5.2	145.0	54
CR Hwangkuem	-	30.0±1.9	35.0±1.9	65.0±4.0	65.0±4.0	147.5	55
Sungreen	-	35.0±1.9	40.0±1.9	65.0±4.0	65.0±4.0	152.5	57

Continued

Table 2. Continued

Cultivar	Trait ^b	Days after inoculation ^c				AUDPC ^d	rAUDPC ^e
		4	5	6	7		
Kangryokyeoreum	-	5.0±1.9	45.0±3.5	70.0±5.2	75.0±6.7	155.0	57
CR Jewang	R	20.0±1.9	40.0±2.2	70.0±2.7	70.0±2.7	155.0	57
CR Hwangrok	R	25.0±1.9	40.0±2.6	70.0±5.2	70.0±5.2	157.5	58
Samutgali	-	30.0±1.8	50.0±1.8	70.0±2.7	70.0±2.7	160.0	59
Matchum	-	30.0±1.8	50.0±1.6	70.0±3.9	70.0±3.9	160.0	59
CR Jinshim	-	20.0±1.9	40.0±2.6	75.0±6.7	75.0±6.7	162.5	60
Cheonhajangkun	R	25.0±4.5	50.0±4.5	65.0±2.6	70.0±2.7	162.5	60
Allpum	-	25.0±1.9	55.0±3.5	65.0±3.4	65.0±3.4	165.0	61
Woldongcheonha	-	40.0±1.8	60.0±2.2	60.0±3.3	70.0±3.3	165.0	61
Chuwol	-	40.0±1.9	40.0±2.6	70.0±5.2	70.0±5.2	165.0	61
CR Hwangtaeja	-	35.0±2.2	40.0±2.2	75.0±3.7	75.0±3.7	170.0	63
CR Anshim	-	30.0±1.8	45.0±3.5	75.0±5.1	75.0±5.1	172.5	64
CR Gorengjinorang	-	40.0±2.2	60.0±2.2	70.0±3.9	70.0±3.9	175.0	65
Jincheong	-	25.0±1.9	45.0±2.7	80.0±5.2	80.0±5.2	177.5	66
Cheongok	-	25.0±2.2	40.0±2.2	85.0±5.0	85.0±5.0	180.0	67
CR Yeoreummat	-	25.0±1.8	45.0±1.8	80.0±5.2	90.0±7.0	182.5	68
CR Nongshim	-	25.0±4.0	65.0±4.0	65.0±5.1	65.0±2.4	185.0	69
Chameseulgali	-	55.0±2.0	65.0±3.5	65.0±3.4	70.0±3.4	187.5	69
Akimeki	-	30.0±1.8	55.0±3.5	80.0±5.2	80.0±5.2	190.0	70
Hwangkeumal	-	30.0±1.9	45.0±2.7	90.0±7.0	90.0±7.0	195.0	72
CR Ipchun	-	25.0±2.2	70.0±5.2	80.0±5.2	80.0±5.2	202.5	75
CR Hgae	-	10.0±3.6	70.0±3.9	90.0±7.0	90.0±7.0	210.0	78
Geumchonulgali	-	25.0±4.0	80.0±5.2	80.0±3.6	80.0±3.6	212.5	79
Guembangul	-	35.0±2.7	55.0±2.7	100.0±8.9	100.0±8.9	222.5	82
Daetong	-	35.0±1.9	55.0±3.5	100.0±8.9	100.0±8.9	222.5	82
CR Matjjang	-	40.0±2.0	70.0±5.2	95.0±6.9	95.0±6.9	232.5	86
Hangamssambaechu	-	60.0±5.2	80.0±5.2	100.0±8.9	100.0±8.9	260.0	96
Dduksimulgali	-	70.0±4.0	80.0±5.2	100.0±8.9	100.0±8.9	265.0	98
CR Alchan	-	70.0±3.7	85.0±7.1	100.0±8.9	100.0±8.9	270.0	100

^aTwenty four-day-old seedlings were inoculated with *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10225 by drenching the proximal of plants with bacterial suspension at a concentration of 1×10^6 cfu/ml. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 25°C for 24 hr and then transferred to a growth room at 25°C and 80% relative humidity with 12 hr light a day. Four, five, six, and seven days after inoculation, disease severity of plants was investigated on a scale of 0–4.

^bResistance to bacterial soft rot: -, unknown; R, resistant.

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

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

^eRelative AUDPC (rAUDPC, %) of each cultivar to AUDPC of the most susceptible cultivar.

^fMean disease severity ± standard deviation of two runs with 10 replicates each.

되었다. 실험한 품종 중 ‘CR알찬’은 rAUDPC 100.0으로 나타나 무름병에 대하여 높은 감수성 반응을 보였다.

이들 결과로부터 rAUDPC를 이용한 배추 품종들의 무름병 저항성 기준은 rAUDPC가 0–20% 이면 저항성, 21–45%는 중도 저항성 그리고 46% 이상의 rAUDPC를 나타내는 품종은 감수성으로 결정하는 것이 적절할 것으로 생각되었다. 이를 기준으로, 실험한 65개 품종의 저항성을 분석하면 실험한 품종 중 저항성 품종은 1개, 중도저항성 품종은 20개 그리고 나머지 44개 품종은 감수성이었다.

Lee 등(2018b)은 무름병 저항성을 정도를 판정하기 위해서는 어떤 한 시기에 병조사를 하여 저항성 여부를 조사하는 것보다 여러 시기에 병조사를 하고 AUDPC를 계산하고 이를 다시 감수성 품종의 AUDPC에 대한 rAUDPC를 계산하여 저항성을 결정하는 것이 보다 정확할 것이다. 하지만 저항성 품종 육종을 위한 대량 시료의 무름병 저항성 검정을 위해서 실험한 모든 시료에 대하여 여러 번 무름병 발생조사를 하여 AUDPC를 구하고 rAUDPC를 계산하여 저항성을 조사하는 것은 소요되는 노

동력, 비용 및 시간을 고려할 때 효율적이지 않다고 하였다. 따라서 위의 rAUDPC 값과 접종 4일, 5일, 6일, 7일 후에 병조사한 발병도(%) 결과를 비교하여 병조사 시기를 결정하는 것이 필요하다. 시판 품종 65개의 rAUDPC값에 따른 저항성 결과와 접종 4일, 5일, 6일, 7일 후의 발병도(%) 결과에 기반한 각각의 저항성 결과를 비교한 결과, 접종 4일 후에는 무름병이 거의 발생하지 않아 실험에 사용한 품종 중 4개 품종만 감수성 반응을 나타냈으며, 접종 5일 후에는 저항성이 10개, 중도저항성이 35개, 감수성이 20개로 실험한 품종 중 30개(46%)가 rAUDPC와 같은 저항성 반응을 보였다(Table 2). 하지만 접종 6일 후에는 ‘태봉’이 25%의 rAUDPC를 보여 저항성 품종은 없었으나, 중도저항성이 13개, 감수성이 52개로 품종들의 발병도(%) 기준으로 한 저항성 판정과 rAUDPC를 기준으로 한 저항성 결과를 비교하면 57개(86%)가 일치하였다. 그리고 접종 7일 후에는 저항성이 0개, 중도저항성이 11개, 감수성이 54개로 실험한 품종 중 55개(83%)가 같은 반응을 나타냈다. 따라서 대량의 배추 식물들에 대하여 무름병 저항성을 검정하기 위해서는 접종 6–7일 후에

Table 3. Development of bacterial soft rot on seedlings of four Chinese cabbage cultivars according to plant growth stage^a

Plant growth stage ^b	Cultivar	Day after inoculation				AUDPC ^c
		7	8	9	10	
14-Day-old	Taebong	32.5 ^d	32.5	32.5	32.5	97.5 b ^e
	Hadaejangkun	32.5	37.5	37.5	42.5	112.5 ab
	CR Alchan	30.0	40.0	42.5	45.0	120.0 a
21-Day-old	Taebong	22.5	25.0	32.5	37.5	87.5 c
	Hadaejangkun	37.5	40.0	55.0	55.0	141.3 b
	CR Alchan	50.0	55.0	57.5	57.5	166.3 a
28-Day-old	Taebong	7.5	12.5	20.0	25.0	48.8 b
	Hadaejangkun	15.0	27.5	32.5	35.0	85.0 ab
	CR Alchan	17.5	17.5	42.5	47.5	92.5 a
35-Day-old	Taebong	12.5	15.0	17.5	22.5	50.0 b
	Hadaejangkun	10.0	12.5	12.5	22.5	41.3 c
	CR Alchan	25.0	25.0	27.5	30.0	80.0 a

^aSeven-, 14-, 21-, 24-, and 34-day-old seedlings were inoculated with *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10225 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 hr and then transferred to a growth room at 25°C and 80% relative humidity with 12 hr 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.

^bFourteen-day-old, fully expanded two-leaf stage; 21-day-old, fully expanded four-leaf stage; 28-day-old, fully expanded six-leaf stage; 35-day-old, fully expanded eight-leaf stage.

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

^dEach value represents the mean disease severity (%) of two runs with 10 replicates each.

^eValues in the labeled with the same letter within each growth stage are not significantly different based on Duncan’s multiple range test at $P=0.05$.

Table 4. Development of bacterial soft rot on seedlings of four Chinese cabbage cultivars according to inoculum concentration of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*^a

Inoculum concentration (cfu/ml)	Cultivar	Day after inoculation				AUDPC ^b
		7	8	9	10	
1×10 ⁵	Taebong	5.0 ^c	7.5	7.5	17.5	26.3 c ^d
	Hadaejangkun	10.0	15.0	30.0	30.0	65.0 b
	CR Alchan	22.5	22.5	30.0	30.0	78.8 a
1×10 ⁶	Taebong	5.0	10.0	15.0	15.0	35.0 c
	Hadaejangkun	20.0	20.0	25.0	25.0	67.5 b
	CR Alchan	25.0	27.5	32.5	32.5	88.8 a
1×10 ⁷	Taebong	10.0	10.0	10.0	12.5	31.3 c
	Hadaejangkun	15.0	17.5	20.0	22.5	56.3 b
	CR Alchan	30.0	32.5	40.0	40.0	107.5 a

^aTwenty eight-day-old seedlings were inoculated with *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10225 by drenching the proximal of plants with bacterial suspension at concentrations of 1×10⁵, 1×10⁶, and 1×10⁷ cfu/ml. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 25°C for 24 hr and then transferred to a growth room at 25°C and 80% relative humidity with 12 hr 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.

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

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

^dValues in the labeled with the same letter within each inoculum concentration are not significantly different based on Duncan's multiple range test at P=0.05.

병조사하는 것이 효과적이라고 생각되었다.

그리고 이들 결과로부터 배추의 무름병 저항성 검정법 확립을 위한 실험을 수행할 품종으로 저항성 정도에 차이가 있는 다음과 같은 3개 품종을 선발하였다. rAUDPC 값이 20 미만인 '태봉'을 저항성 품종으로, rAUDPC가 45 이하인 '하대장군'을 중도저항성으로 그리고 가장 높은 감수성을 보인 'CR알찬'은 감수성 품종으로 선정하였다.

배추의 생육 시기에 따른 무름병 발생. 선발한 4개 품종을 파종하고 14, 21, 28, 35일 동안 재배한 각각 2엽, 4엽, 6엽, 8엽이 완전하게 전개된 배추 유묘에 *Pcc*를 접종하고 무름병 발생을 조사한 결과, 실험한 4가지 생육 시기 중 파종 후 21일된 유묘(4엽 완전 전개)는 저항성 품종인 '태봉'과 중도저항성인 '하대장군'과 감수성 품종인 'CR알찬'의 AUDPC 값이 각각 87.5, 141.3, 166.3이었으며, 3개 품종들은 서로 통계적으로 유의성 있는 차이를 보였다(Table 3). 그리고 저항성 품종과 감수성 품종 간의 AUDPC 값의 차이도 61.3으로 실험한 생육 시기별 감수성과 저항성 품종 간의 AUDPC 차이가 가장 큰 차이를 보였다(Table 3).

그러나 파종 후 14일 후, 28일 후, 35일 후 배추 유묘들에서는 저항성 품종과 감수성 품종 간의 AUDPC 값의 차이가 각각 22.5, 43.7, 30으로 나타나 그룹간의 발병 정도의 차이가 크지도

않았으며, 저항성, 중도저항성, 감수성 품종의 AUDPC에 통계적으로 유의성 있는 차이가 없었다(Table 3).

Doullah 등(2006)은 *Alternaria brassicicola*에 의한 검은무늬병에 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 품종인 'CR알찬'의 경우에는 21일(4엽 완전 전개)에서 가장 높은 AUDPC를 나타냈고 그 다음은 14일(2엽 완전 전개) 그리고 6엽 및 8엽이 완전 전개된 파종 28일과 35일 유묘는 오히려 무름병 발생이 감소하였다(Table 3).

저항성 품종을 육성하기 위해서는 신속하게 병리검정하는 것이 중요하고 또한 저항성 품종의 저항성과 감수성 품종의 감수성이 가장 잘 나타나는 배추의 생육 시기에 접종해야 하는데, 배추 종자를 파종하고 온실(25±5°C)에서 약 21일 재배하여 본엽 4엽이 완전 전개된 배추 유묘를 사용하여 *Pcc*에 대한 저항성을 검정하는 것이 효과적이라고 생각되었다.

접종원 농도에 따른 무름병 발생. 선발한 3개 품종의 배추 유묘에 병원균 *Pcc* KACC 10225 균주를 1×10⁵, 1×10⁶, 1×10⁷ cfu/ml의 농도로 접종하고 무름병 발생을 조사한 결과, 실험한 품종들의 평균 AUDPC는 각각 56.7, 63.8, 65.0 이었으며, 감수

성인 'CR알찬'의 AUDPC는 각각 78.8, 88.8, 107.5이었다(Table 4). 즉, 접종 농도가 증가할수록 감수성 품종들의 무름병 발생은 증가함을 알 수 있었다. 하지만 저항성 품종인 '태봉'은 접종 농도가 1×10^5 , 1×10^6 , 1×10^7 cfu/ml로 10배씩 증가하여도 AUDPC가 각각 26.3, 35.0, 31.3으로 감수성 품종과 비교할 때 크게 증가하지 않았다(Table 4).

실험한 3가지 접종 농도(1×10^5 , 1×10^6 , 1×10^7 cfu/ml)로 접종하였을 때 품종 간의 무름병 발생(AUDPC)은 모두 통계적으로 유의성 있는 차이를 나타냈다(Table 4). 따라서 3가지 접종 농도 모두 배추의 무름병 저항성 검정에 이용할 수 있다고 판단되었으며, 이들 중 1×10^7 cfu/ml로 접종하였을 때에는 저항성인 '태봉'과 감수성인 'CR알찬'의 AUDPC의 차이가 76.2로 가장 컸다(Table 4). 이를 이어 1×10^6 cfu/ml이 53.8 그리고 1×10^5 cfu/ml이 52.5 차이를 보였다. 이상의 결과로부터 배추의 무름병 저항성을 검정하기 위해서는 1×10^7 cfu/ml로 조정하여 세균현탁액을 식물체당 5 ml씩 접종하는 것이 효율적이라고 생각되었다.

질적 저항성으로 알려진 멜론의 덩굴쪄김병(*Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*) 저항성은 단일자우성 유전자인 'Fom-1', 'Fom-2'에 의해 저항성이 발현되는데(Risser 등, 1976), 이들 저항성은 병원균의 접종 농도가 증가하여도 저항성에는 변화가 거의 없었다(Lee 등, 2015). 그러나 고추의 역병(*Phytophthora capsici*) 저항성 그리고 고추의 풋마름병(*Ralstonia solanacearum*) 저항성 등 많은 식물병의 저항성들은 양적 저항성인 경우가 많은데(Lefebvre와 Palloix, 1996; Lefebvre 등, 2002; Thabuis 등, 2003, 2004), 이들의 경우에는 접종 농도가 증가하게 되면 저항성이 감소한다고 알려져 있다(Barksdale 등, 1984; Hwang 등, 2017; Kim 등, 1989). 따라서 배추의 무름병 저항성도 고추의 역병 및 풋마름병 저항성과 유사한 경향을 나타낸다고 생각되었다.

접종 후 재배 온도에 따른 배추 무름병 발생. 선발한 품종의 배추 유묘에 *Pcc*를 접종하고 20°C, 25°C, 30°C에서 습실처리하고 재배하여 무름병 발생을 조사한 결과, 재배온도가 20°C, 25°C, 30°C일 때 3개 품종의 평균 AUDPC 값은 각각 51.7, 81.7, 122.9이었으며 감수성인 'CR알찬'의 AUDPC는 각각 68.1, 128.8, 138.8로 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 재배온도가 증가함에 따라 배추에 무름병 발생도 증가하였다(Table 5).

효과적인 병 저항성 검정을 위해서는 저항성, 감수성 품종들의 병 발생에 차이가 크고 이들이 통계적으로 유의성 있는 차이를 보이는 것이 중요하다. 실험한 세 가지 재배온도 20°C, 25°C, 30°C에서 저항성 품종으로 선발한 '태봉'과 감수성 품종으로 선발한 'CR알찬'의 무름병 발생 AUDPC 차이는 각각 45.0, 83.8, 40.7로 25°C에서 가장 큰 차이를 나타냈다. 그리고 저항성 '태봉', 중도저항성 '하대장군', 감수성 'CR알찬'의 AUDPC 값도 25°C에서 재배하였을 때에는 모두 통계적으로 유의성 있는 차이를 나타냈다(Table 5). 하지만 20°C와 30°C에서 재배하였을 때에는 3개 품종이 모두 통계적으로 유의성 있는 차이를 나타내지는 않았다. 따라서 배추 무름병 저항성 검정을 위해서는 *Pcc*를 접종하고 25°C에서 24시간 습실처리한 후에 하루에 12시간씩 광을 조사하면서 25°C 항온항습실에서 재배하는 것이 효과적이라고 생각되었다.

배추의 무름병의 저항성에 대한 연구는 현재까지 없지만 만약에 질적 저항성(qualitative resistance)이라면, 멜론의 덩굴쪄김병에 대한 저항성과 배추의 뿌리혹병(*Plasmodiophora brassicae*)에 대한 저항성처럼 저항성 품종에서 접종 농도, 유묘의 생육 시기, 접종 후 재배 온도 등 발병 조건에 따라 병 발생이 거의 차이가 없으며 병원균은 race가 분화되어 있을 것이다(Kim 등, 2016; Lee 등, 2015). 그러나 이와 달리 양적 저항성이라면 고추의 역병(*P. capsici*) 저항성과 같이 race 분화는 없고 단지 균주의 병원력에 반비례하여 저항성을 나타내며, 저항성 품종이라도 발병 조건에 따라 저항성 정도에 차이를 보일 것이다(Jo 등, 2014, 2016). 본 연구에서 저항성 품종으로 선발된 '태봉'과 '노랑추석'은 접종원 농도, 배추 유묘의 생육 시기, 접종 후 재배 온도에 따라 저항성 정도에 차이를 나타냈다. 따라서 '태봉'과 '노랑추석'의 무름병균 *Pcc*에 대한 저항성은 양적 저항성인 것으로 생각되었다. 이는 포장에서 무름병이 심하게 발생하면 이들 저항성 품종도 감수성 반응을 나타낼 수 있다는 것을 의미한다.

이상의 결과로부터 배추 무름병의 저항성 검정을 위한 효과적인 방법으로 종자를 파종하고 온실(25±5°C)에서 21일 동안 재배하여 4엽이 완전히 전개된 배추 유묘의 기부부 *Pcc* 세균현탁액(1×10^7 cfu/ml)을 5 ml씩 관주접종하고, 25°C 습실상에서 24시간 동안 습실처리한 후에 식물체를 25°C의 항온항습실(상대습도 80%)로 이동하여 하루 12시간씩 광을 조사하면서 재배하고, 접종 7일 후에 배추 무름병의 발병도(%)를 조사하는 것을 제안하고자 한다. 하지만 배추의 무름병에 대한 저항성이 발병 조건 즉 disease pressure에 따라 저항성 정도가 달라지는 양적 저항성으로 생각되므로, KACC 10225가 아닌 다른 *Pcc* 균주를 사용하여 실험할 때는 균주 병원력(virulence)에 따라 접

Table 5. Development of bacterial soft rot on seedlings of four Chinese cabbage cultivars according to incubation temperature after inoculation^a

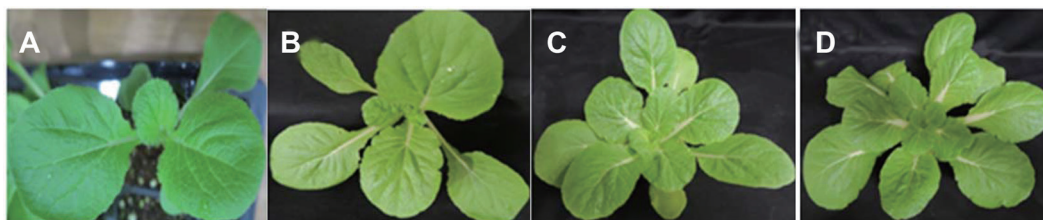
Incubation temperature (°C)	Cultivar	Day after inoculation				AUDPC ^b
		7	8	9	10	
20	Taebong	5.0 ^c	7.5	8.8	8.8	23.1 b ^d
	Hadaejangkun	10.0	21.3	23.8	27.5	63.8 ab
	CR Alchan	17.5	20.0	23.8	31.3	68.1 a
25	Taebong	8.8	13.8	17.5	18.8	45.0 c
	Hadaejangkun	15.0	20.0	27.5	32.5	71.3 b
	CR Alchan	33.8	43.8	45.0	46.3	128.8 a
30	Taebong	22.5	31.3	36.3	38.8	98.1 b
	Hadaejangkun	40.0	42.5	45.0	48.8	131.9 a
	CR Alchan	43.8	41.3	48.8	53.8	138.8 a

^aTwenty eight-day-old seedlings were inoculated with *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* KACC 10225 by drenching the proximal of plants with bacterial suspension of a concentration of 8×10^5 cfu/ml. The inoculated plants were incubated in a dew chamber at 20°C, 25°C, and 30°C for 24 hr and then transferred to each growth room at 20°C, 25°C, and 30°C with 12 hr 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.

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

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

^dValues in the labeled with the same letter within each incubation temperature are not significantly different based on Duncan's multiple range test at $P=0.05$.

**Fig. 1.** Growth stage of Chinese cabbage plants used in this study. Fourteen-day-old (A), 21-day-old (B), 28-day-old (C), and 35-day-old (D) seedlings.

중 농도를 조정할 필요가 있을 것으로 생각된다.

요 약

Pectobacterium carotovorum subsp. *carotovorum* (Pcc)에 의한 무름병은 전세계적으로 문제가 되고 있고 특히 온난 다습한 지역에서 문제가 심각하다. 본 연구는 Pcc에 의해 발생하는 배추 무름병에 대한 효율적인 저항성 검정법을 확립하기 위하여 실험하였다. 시판 배추 품종 65개의 Pcc KACC 10225에 대한 저항성 정도를 조사하고, 추후 실험을 위해 저항성에 차이를 보이는 3개 품종을 선발하였다. 이들 3개 품종의 접종하는 배추의 생육 시기, 접종원 농도, 접종 후 재배 온도 등의 발병 조건에

따른 무름병 발생을 조사하였다. 이들 실험의 결과로부터 배추의 무름병에 대한 저항성을 검정하기 위해서는, 배추 종자를 파종하고 온실(25±5°C)에서 21일 동안 재배한 유묘에 Pcc 균주의 세균현탁액(1×10^7 cfu/ml)을 식물체 기부에 5 ml씩 관주하여 접종하고, 접종한 식물은 25°C 습실상에 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 (213006-05-4-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. Potato J.* 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., Yeoung, 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. *Ann. Rev. Phytopathol.* 24: 383-409.
- Colyer, P. D. and Mount, M. S. 1984. Bacterization of potatoes with *Pseudomonas putida* and its influence on postharvest soft rot diseases. *Plant Dis.* 68: 703-706.
- 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.
- Fritz, V. A. and Honma, S. 1987. The effect of raised beds, population densities, and planting date on the incidence of bacterial in Chinese cabbage. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 112: 41-44.
- Geels, F. P. and Schippers, B. 1983. Selection of antagonistic fluorescent *Pseudomonas* spp. and their root colonization and persistence following treatment of seed potatoes. *J. Phytopathol.* 108: 193-206.
- 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., Malhotra, S., Roh, E., Jung, K., Lee, D., Choi, J. 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.
- 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. Korean Society of Plant Pathology, Suwon, Korea. (In Korean)
- Lee, J. H., Lee, J. and Oh, D.-G. 2018a. Resistance of pepper cultivars to *Ralstonia solanacearum* isolates from major cultivated areas of chili peppers in Korea. *Hortic. Sci. Technol.* 36: 569-576. (In Korean)
- Lee, S. M., Choi, Y. H., Jang, K. S., Kim H., Lee, S.-W. and Choi, G. J. 2018b. Development of an efficient bioassay method for testing resistance to bacterial soft rot of radish. *Res. Plant Dis.* 24: 193-201. (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 screening methods for melon plants resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 33: 70-82. (In Korean)
- 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 the pepper linkage map by alignment of three intraspecific maps including known-function genes. *Genome* 45: 839-845.

- 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.
- Péombelon, 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. 2006. Antagonistic rhizospheric bacteria for management of bacterial soft rot of radish seed crop. *Ann. Plant Prot. Sci.* 14: 393-395.
- 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. Plant 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.
- Taylor, J. D., Conway, J., Roberts, S. J., Astley, D. and Vincente, J. G. 2002. Sources and origin of resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica* genomes. *Phytopathology* 92: 105-111.
- 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.
- 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.
- Williams, P. H. 1981. Workshop on Screening Crucifers for Multiple Disease Resistance. University of Wisconsin, Medison, WI, USA. 105 pp.
- Zhao, Y., Li, P., Huang, K., Wang, Y., Hu, H. and Sun, Y. 2013. Control of postharvest soft rot caused by *Erwinia carotovora* of vegetables by a strain of *Bacillus amyloliquefaciens* and its potential mode of action. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 29: 411-420.