

국내 벼키다리병균의 Prochloraz 약제에 대한 저항성 변화

최효원^{1*} · 이용환² · 홍성기³ · 이영기¹ · 남영주¹ · 이재금¹ · 한송희¹

¹국립농업과학원 작물보호과, ²농촌진흥청 재해대응과, ³국립농업과학원 유해생물팀

Monitoring for the Resistance to Prochloraz of *Fusarium* Species Causing Bakanae Disease in Korea

Hyo-Won Choi^{1*}, Yong Hwan Lee², Sung Kee Hong³, Young Kee Lee¹, Young Ju Nam¹, Jae Guem Lee¹ and Song Hee Han¹

¹Crop Protection Division, National Academy of Agricultural Science, Wanju 565-851, Korea

²Disaster Management Division, Rural Development Administration, Jeonju 560-500, Korea

³Microbial Safety Team, National Academy of Agricultural Science, Wanju 565-851, Korea

ABSTRACT : To investigate the changes of the resistance to prochloraz of *Fusarium* species causing bakanae disease, *Fusarium* isolates were collected from various regions in Korea, and pathogenicity tests were performed using rice seeds. Minimum inhibitory concentration (MIC) and effective concentration of 50% (EC₅₀) values of isolates were determined using the agar dilution method. High frequency distribution of MIC values of prochloraz against isolates collected in 2006~2007 and 2013~2014 years were 3.125~6.25 µg/mL and 6.25~12.5 µg/mL, respectively. The mean EC₅₀ value of isolates increased from 0.3142 µg/mL in 2006~2007 to 0.8124 µg/mL in 2013~2014. Based on the EC₅₀ value of isolates collected in 2006~2007, the resistant baseline of prochloraz was determined as 0.6 µg/mL. Compared with the ratio of resistant isolates in 2006~2007, the ratio of resistant isolates in 2013~2014 increased from 6.5% to 41.6%.

KEYWORDS : Bakanae disease, *Fusarium fujikuroi*, Prochloraz resistance

서론

벼키다리병은 대표적인 종자 전염성 병해로 *Fusarium fujikuroi* Nirenberg에 의해 발생한다. 농촌진흥청에 따르면 이 병의 본답 발병율은 2006년 28.8%에서 2012년에는 20%로 감소하는 추세였으나, 2013년에는 31%로 크게 증가하여 문제시된 바 있다. 키다리병의 방제를 위해서는 약제를 사용하여 종자를 소독하는 방법이 가장 효과적인 것

으로 알려져 있으나 최근에는 약제 소독을 실시한 종자에서도 키다리병이 발생하여 이에 대한 원인 분석이 필요할 실정이다.

국내에서 벼키다리병에 대한 연구는 1980년대 초반에 이루어졌는데, 키다리병의 발생 생태 및 피해 해석에 관한 연구가 주로 수행되었다[1, 2]. 이후, 국내에서 키다리병은 문제되지 않았다가 2002년 이후 발생이 증가하면서 종자 소독제의 약량 및 약액 온도, 처리 시간에 따른 효과 검정[3], prochloraz와 fludioxonil 혼용 침지에 의한 방제 방법[4] 등 종자소독과 관련된 연구가 진행되었으며, 그 후에는 prochloraz에 대한 약제 저항성 및 교차 저항성에 대한 연구가 일부 수행된 바 있다[5, 6].

Prochloraz는 1977년에 처음 사용된 DMI계(sterol 14 α-demethylase inhibitor) 살균제로서 전 세계적으로 약 50개국에서 30종 이상의 작물에 사용되고 있다[7]. 특히 prochloraz는 benzimidazole계 살균제 저항성인 식물병원균에 대해 우수한 방제 효과를 나타내기 때문에, benomyl 저항성을 나타낸 복숭아 잣빛무늬병균(*Monilinia fructicola*)의 방제에 사용되었으며[8], 아마 종자병원균인 *Phoma exigua* var. *linicola*의 방제에도 사용되고 있다[9]. 그러나 프랑스

Kor. J. Mycol. 2015 June, 43(2): 112-117
<http://dx.doi.org/10.4489/KJM.2015.43.2.112>
 pISSN 0253-651X • eISSN 2383-5249
 © The Korean Society of Mycology

*Corresponding author
 E-mail: hyon338@korea.kr

Received May 4, 2015
 Revised June 16, 2015
 Accepted June 18, 2015

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에서 맥류에 eyespot을 일으키는 *Tapesia*균과 목화 반쪽시 들음병을 일으키는 *Verticillium dahlia*균에서 prochloraz 저항성 균주가 보고된 바 있다[10, 11]. Prochloraz는 침투 이행성이 뛰어난 약제이므로 벚키다리병의 방제를 위한 종자 소독제로 1983년에 등록되어 최근까지도 사용되고 있다. 그러나 2006년부터 2009년 사이에 국내에서 분리한 키다리병균의 prochloraz 저항성 분포가 보고되었으며[5, 6], 중국의 경우 장수(Jiansu)지역에서 분리한 키다리병 균주에서 약 82%가 prochloraz 저항성임을 보고하였다[12]. 특히 일본에서는 1980년대 여러 지역에서 종자소독을 실시하였음에도 벚키다리병이 대발생하였는데, 그 원인으로 benomyl 저항성 균의 출현을 보고한 바 있다[13].

따라서 본 연구에서는 최근 약제 소독을 실시한 종자에서도 키다리병이 발생하는 원인을 구명하기 위하여, 2006년부터 2007년, 그리고 2013년부터 2014년에 걸쳐 분리한 균주를 대상으로 벚에 대한 병원성을 확인하고, 병원성이 확인된 균주에 대해 한천희석법을 이용하여 prochloraz에 대한 감수성 정도를 조사하였다. 그 결과를 바탕으로 연도별 저항성 변이를 분석하였고, 우리나라에 분포하는 벚키다리병균의 prochloraz 약제에 대한 저항성 기준을 설정하였다.

재료 및 방법

벚키다리병균 분리 및 보존

2006년부터 2007년과 2013년부터 2014년에 걸쳐 전국에서 벚 키다리병을 수집하였다. 벚 육묘기부터 등숙기까지 벚키다리병에 감염된 식물체 또는 종자를 수집하여 균을 분리하였다. 채집한 시료 중 유묘는 지제부를 약 5 mm 길이로 절단하였고, 종자는 그대로 1% 차염소산나트륨 용액으로 1분간 표면 살균한 뒤, 멸균수로 세척하고 건조하여 물한천배지에 치상하였다. 치상 5~7일후, 현미경으로 관찰하여 전형적인 사슬 모양의 분생포자를 확인하고, 단포자 분리하였다. 또한, 분담후기에 벚줄기에 키다리병이 발생한 경우, 벚 줄기를 직접 습식처리한 후 균총으로부터 단포자 분리를 실시하였다. 2006년부터 2007년에는 총 139개, 2013년부터 2014년에는 총 451개 균주를 분리하였으며, 단포자 분리한 균주는 감자한천 사면배지(potato dextrose agar, PDA)에 배양하고, 10°C에 보관하면서 실험에 사용하였다.

병원성 검정

분리한 균주의 병원성 확인을 위하여 물한천배지가 담긴 시험관을 이용하여 병원성 검정을 수행하였다. 벚 종자(추청벼)를 철저히 소독하기 위하여 1% 차염소산나트륨 용액에 1시간 동안 침지하고 건조시킨 후, prochloraz 500배액에 8시간 동안 침지 처리하고 세척하였다. 다시 12시간 동안 건조시킨 후, water agar 배지가 10 mL 들어있는 시

험관(직경 30 mm, 길이 200 mm)에 피종하여 키다리병 감염여부를 조사하였다.

분리 균주의 포자현탁액을 만들기 위하여 균주를 PDA 배지에 접종하여 25°C에서 10일간 배양하였다. 멸균수를 PDA plate에 부어 포자현탁액을 제조하고, haemocytometer로 1×10^6 spores/mL의 농도로 조절하였다. 포자현탁액 1 mL에 소독한 종자 20립을 넣어 25°C에서 48시간 침지한 뒤 water agar가 들어있는 시험관에 3립씩 피종하였고, 대조구는 멸균수를 사용하였다. 피종 후 28°C, 12 h light/12 h dark 조건인 배양기에서 2주간 생육시킨 후 발병 정도를 조사하였다.

발병 정도는 Amatulli 등[14]의 방법을 변형하여 사용하였다. 병지수 0은 병이 전혀 걸리지 않은 것, 1은 키가 크지는 않으나 약간 연녹색 띠는 것, 2는 연녹색을 띠면서 3엽이 나오지 않으며 키가 약간 큰 것, 3은 연녹색을 띠면서 3엽이 나오지 않고, 키가 병지수 2에 비해 약간 더 큰 것, 4는 연녹색을 띠면서 3엽이 나오지 않고, 키가 대조구에 비해 2배 정도 큰 것, 5는 전형적인 키다리 증상 혹은 고사한 것으로 하였으며, 병 지수를 100으로 환산하여 발병 정도를 조사하였다.

벚키다리병균의 prochloraz에 대한 약제반응 조사

Prochloraz (a.i. 25%, EC)에 대한 키다리병균의 감수성 정도를 조사하기 위하여 한천희석법을 이용하여 균사생장 억제 정도를 조사하여 비교하였다. 병원성이 확인된 2006년부터 2007년 분리 균주 및 2013년부터 2014년 분리 균주를 PDA 배지에 접종하여 25°C에 7일간 배양하였고, cork borer(직경 5 mm)를 이용하여 균총을 절단하였다. 약제는 멸균수에 용해시켜 PDA 배지에서의 최종농도가 각각 25, 12.5, 6.25, 3.125, 1.5625, 0.78125, 0.390625 $\mu\text{g/mL}$ 이 되도록 첨가하였고, 약제를 혼합한 PDA 배지에 균총을 접종하였다. 병원균을 접종한 배지는 25°C에서 7일간 배양한 후 자란 균총의 직경을 측정하였으며, 약제를 첨가하지 않은 PDA 배지에서의 균총 직경과 비교하여 균사생장 억제율(%)을 계산하였다. SigmaPlot version 12.3 (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA) 프로그램을 이용하여 균사생장을 50% 억제하는 농도인 effective concentration of 50% (EC_{50}) 값을 계산하였고, 균사를 완전히 억제하는 최소억제농도(minimum inhibitory concentration, MIC)를 구하여 균주의 저항성, 감수성 정도를 비교 분석하였다.

균사생장 억제율(%) = $[1 - (\text{약제 배지에서의 균총직경} / \text{무처리 배지에서의 균총직경})] \times 100$

결과 및 고찰

분리 균주의 병원성 검정

2006년부터 2007년에 분리한 139개 균주 중 124개 균주

Table 1. Total numbers of isolates and virulent isolates by pathogenicity test of isolates from rice during 2006~2007 and 2013~2014, respectively

Year	No. of isolates	No. of virulent isolates (Range of disease incidence ^a)	Percentage of virulent isolates (%)
2006~2007	139	124 (40.0~100.0)	89.2
2013~2014	451	375 (37.3~100.0)	83.1

^aDisease incidence was determined by mean of disease index on five replications of each isolate using rice seeds soaking inoculation, on a 1~100 scale.

에서 병원성이 확인되었고, 2013년부터 2014년에 분리한 451개 균주 중 375개 균주가 병원성이 있는 것으로 나타났다(Table 1). 일반적으로 벼키다리병은 *F. fujikuroi*에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으나 말레이시아, 인도네시아 등의 동남아시아 지역에서는 *Fusarium andiyazi*, *Fusarium proliferatum*, *Fusarium verticillioides* 등 *Gibberella fujikuroi* 종 복합체에 속하는 종들도 병을 일으킬 수 있다고 보고한 바 있다[15, 16]. 그러나 Mohd Zainudin 등[17]은 벼에서 분리한 *F. fujikuroi*, *F. proliferatum*, *F. sacchari*, *Fusarium subglutinans*, *F. verticillioides*를 대상으로 병원성 검정을 수행한 결과, *F. fujikuroi*만이 키다리병을 일으킨다고 보고하였으며, 벼에서 분리한 모든 *F. fujikuroi*가 병을 일으키는 것이 아님을 증명하였다. 본 실험에서도 형태적, 배양적 특성과 TEF (translation elongation factor 1 alpha) 유전자의 염기서열 분석에 의해 *F. fujikuroi*로 동정된 균주임에도 병원성이 없는 균주가 27개 분리되었으며, 병을 일으키는 균주 중에는 *F. fujikuroi*외에 다른 종으로 동정된 균주가 일부 확인되어 향후 이들 균주에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다(테이더 미제시).

연도별 최소억제농도(MIC) 및 EC₅₀ 값의 변화

살내검정에 의해 병원성이 확인된 499개 균주에 대해 한천희석법을 이용하여 억제반응을 조사한 결과, 2006년부터 2007년과 2013년부터 2014년에 분리한 균주의 MIC 값의 분포도는 각각 Fig. 1A, Fig. 1B와 같이 나타났다. 2006년과 2007년에 분리한 균주 및 2013년과 2014년에 분리한 균주

는 각각 1년 사이에 MIC 값의 변화가 크게 나타나지 않았으며, 이를 근거로 하여 본 연구에서는 2006년부터 2007년 분리 균주를 한 그룹으로, 2013년부터 2014년 분리 균주를 다른 한 그룹으로 분류하여 prochloraz에 대한 저항성 분석을 수행하였다. 그 결과 2006년부터 2007년 분리 균주는 MIC 값이 3.125~6.25 µg/mL인 균주가 가장 높은 빈도로 분포하는 양상이었으나, 2013년부터 2014년에 분리한 균주는 MIC 값이 6.25~12.5 µg/mL의 농도에서 분포 비율이 가장 높았다. 또한 Fig. 1C에서 보는 바와 같이 2006년부터 2007년에 비해 2013년부터 2014년 균주의 MIC 값 분포가 오른쪽으로 이동한 것으로 나타났으며, 이는 국내에 분포하는 키다리병균의 prochloraz에 대한 저항성 정도가 상승하고 있음을 의미한다.

한편, 분리 균주를 대상으로 균사생장을 50% 억제하는 농도인 EC₅₀ 값을 조사하여 그래프로 나타낸 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 2013년부터 2014년 분리 균주의 EC₅₀ 값의 범위가 2006년부터 2007년 분리 균주에 비해 크게 넓어진 것을 볼 수 있다. 즉 2006년부터 2007년 분리 균주의 EC₅₀ 값의 최소값은 0.0001 µg/mL, 최대값은 4.281 µg/mL 인데 비해 2013년부터 2014년 분리 균주의 경우 최소값이 0.0016 µg/mL, 최대값은 16.7947 µg/mL로 나타났다. 또한 2006년부터 2007년 분리 균주의 평균 EC₅₀ 값은 0.3142 µg/mL이었으며, 2013년부터 2014년 분리 균주는 0.8124 µg/mL로 나타나 저항성이 상승하고 있음을 알 수 있다. Shin 등[5]은 2007년에 충북지역에서 분리한 키다리병균의 EC₅₀ 값의 범위를 0.02~1.78 µg/mL, 평균값은 0.25 µg/mL로 보

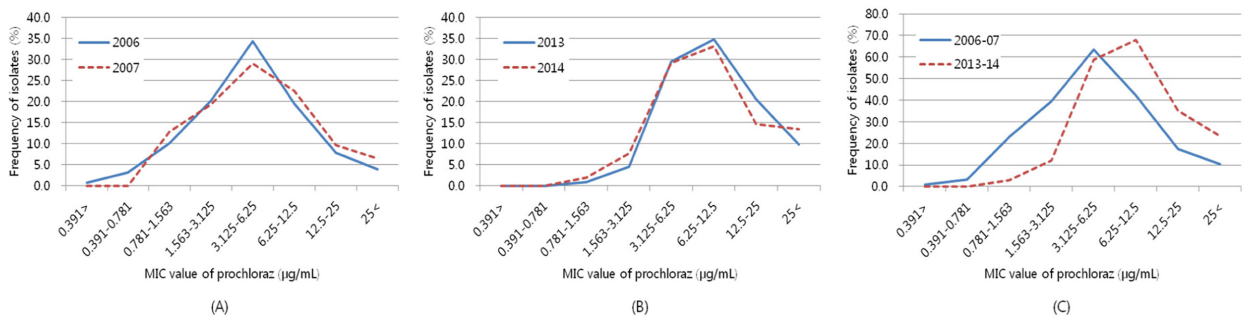


Fig. 1. Minimum inhibitory concentration (MIC) of prochloraz against the mycelia growth of *Fusarium* species isolated from infected rice plants in 2006~2007 and 2013~2014. (A) and (B) indicated MIC pattern of prochloraz against the mycelia growth of isolates collected in 2006~2007 and 2013~2014, respectively. (C) showed change of MIC pattern of prochloraz against the mycelia growth of isolates collected between 2006~2007 and 2013~2014.

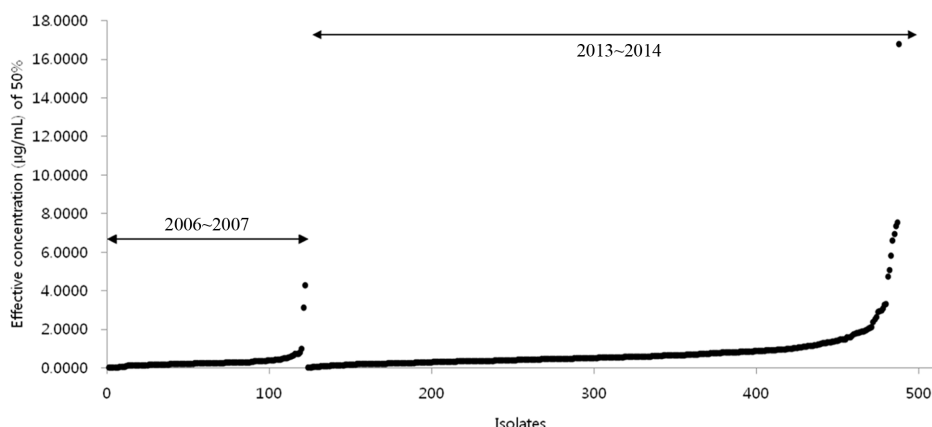


Fig. 2. Variation of effective concentration of 50% (EC₅₀) value of *Fusarium* isolates collected from infected rice plants in 2006~2007 and 2013~2014.

고하였고, Lee 등 [6]은 2006년부터 2009년까지 국내에서 분리한 118개의 키다리병균에 대한 prochloraz 저항성을 검정한 결과, EC₅₀ 값의 범위는 0.002~1.548 µg/mL이며, 평균값은 0.207 µg/mL로 보고하였다. 이와 같은 결과는 본 연구에서의 평균 EC₅₀ 값인 0.3142 µg/mL와 약 0.1 µg/mL의 차이를 나타냈으나, EC₅₀ 값의 범위는 0.0001~4.281 µg/mL로 큰 차이를 나타냈다. 이는 키다리병균의 분리 연도, 지역 및 대상 균주수, 분리 균주의 병원성 여부 등에 대한 차이 때문인 것으로 생각된다.

벼키다리병균의 prochloraz에 대한 저항성 기준

국내에서 분리한 균주의 prochloraz에 대한 저항성 기준을 설정하기 위하여 2006년부터 2007년에 분리한 균주의 균사생장 억제율을 그래프로 나타낸 결과 8개의 균주가 저항성으로 그룹화되는 것으로 나타났으며, 이들의 EC₅₀ 값 범위는 0.6004~4.281 µg/mL로 조사되었다(Fig. 3).

2007년 충북지역에서 분리한 키다리병균의 경우, 저항성 기준 EC₅₀ 값을 0.5 µg/mL로 결정하였으며, 저항성 균주는 0.16~20.0 µg/mL 사이의 약제 농도에서 균사생장 억제율이 큰 폭으로 감소한다고 하였다[5]. 또한 Lee 등 [6]도 prochloraz 감수성 균주들과 확인한 차이를 보이는 EC₅₀ 값인 0.5 µg/mL를 저항성 기준으로 결정하면서 2 µg/mL의 농도에서 저항성 균주의 균사생장 억제율이 급격히 감소한다고 하였다. 이 저항성 기준을 바탕으로 분석했을 때, 2007년 충북지역에서 분리한 키다리병균의 저항성 분포 비율은 13.8%이었고, 2006년부터 2009년에 전국에서 분리한 균주 역시 13.6%로 조사되었다. 그러나 본 연구에서는 저항성과 감수성 균주 간 균사생장 억제율은 확인한 차이를 나타내지는 않았으며, 약 1 µg/mL의 prochloraz 농도에서 8개 균주의 균사생장 억제율이 60% 이하로 감소하는 것으로 나타나 이들 균주가 저항성인 것으로 판단하였고, 저항성 기준 EC₅₀ 값은 0.6 µg/mL로 하는 것이 타당한 것

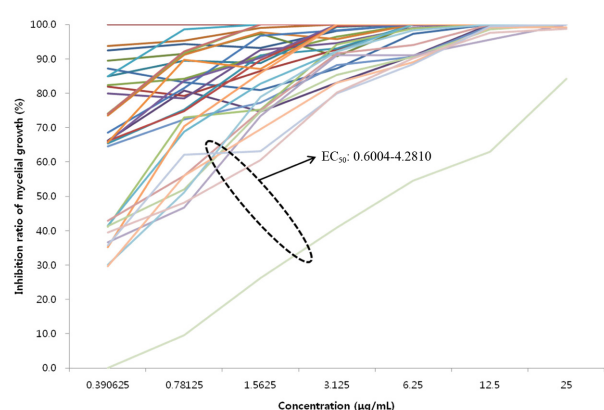


Fig. 3. Baseline of fungicide response resistant to prochloraz on isolates of *Fusarium* species isolated during 2006~2007 in Korea.

으로 생각된다. 8개의 저항성 균주는 모두 6.25 µg/mL 이상의 MIC 값을 나타내었으나, 감수성 균주의 MIC 값 역시 6.25 µg/mL 이상인 것이 일부 존재하므로 prochloraz에 대한 키다리병균의 저항성 기준 설정에는 EC₅₀ 값을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 본 연구에서 결정한 저항성 기준을 바탕으로 분석한 결과, 2006년부터 2007년에 분리한 균주에서는 저항성 균주가 약 6.5%였지만 2013년부터 2014년 분리 균주에서는 41.6%로 저항성 균주의 빈도가 크게 증가한 것으로 나타났다(Fig. 4). Yang 등 [18]은 밀의 병원균인 *Mycosphaerella graminicola*와 triazole계 살균제인 cyproconazole의 상호작용 연구를 통해 병원균의 병원성(virulence)과 약제 내성이 정의 상관관계가 있다고 하였다. 특히 이것은 기주-병원균의 양적 저항성과 관련되며, 병원성과 약제 내성에 관여하는 유전자의 다면 발현 때문이라고 하였다. 또한 보호용 살균제인 chlorothalonil을 처리한 품종에서 분리한 *M. graminicola*의 병원

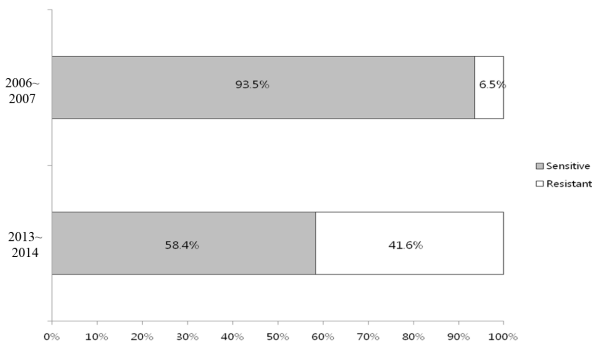


Fig. 4. Percentage of isolates to sensitive and resistant to prochloraz collected in 2006~2007 and 2013~2014. Fungicide response was decided with a baseline level of resistance.

성이 약제를 처리하지 않은 포장에서 분리한 병원균에 비해 더욱 강한 것으로 나타났다[19]. 따라서 국내에서 벼 키다리병 방제를 위해 prochloraz를 계속해서 사용함에 따라 키다리병균의 병원성이 어떤 방향으로 변화하였는지에 대한 조사가 필요할 것으로 생각된다.

지역별 prochloraz 저항성 균주 분포 비교

연도별 분리 균주를 대상으로 prochloraz 저항성 균의 분포 비율을 지역별로 구분하여 비교한 결과 2006년부터 2007년 균주에서는 충북, 전북, 경남지역에 저항성 균주가 분포하지 않는 것으로 나타났으나, 2013년부터 2014년의 경우 전국적으로 prochloraz 저항성 균주의 분포가 확인되었고, 분포 비율도 크게 증가하였다(Table 2). 특히 전남지역은 분리 연도에 관계없이 저항성 분포 비율이 가장 높은 것으로 조사되었다. 또한 각 지역별 평균 EC₅₀ 값을 비교해 보면 2006년부터 2007년 분리균의 경우 0.1698(경남)~0.5262(전남)의 범위였으나, 2013년부터 2014년에는 0.4862(경기)~1.1974(전남)로 크게 증가하였으며, 저항성 균주의 분포 비율과 동일하게 전남지역의 평균 EC₅₀ 값이 가장 높은 것으로 나타났다. 2006년부터 2009년까지 분리한 균주

를 대상으로 한 동일한 조사에서도 전남지역에서 prochloraz 저항성 균주의 비율이 60%로 가장 높았으며, 이는 종자를 자가 채종하여 연속적으로 사용하면서 prochloraz에 지속적으로 노출되고, 이것이 저항성 균의 출현을 야기시켰기 때문이며, 이것이 전남지역에서 키다리병이 심하게 발생하는 원인이라고 하였다[6]. 본 연구에서도 전남지역의 prochloraz 저항성 비율과 평균 EC₅₀ 값이 다른 지역에 비해 현저히 높은 것으로 조사되었으며, 이에 대한 지속적인 모니터링과 약제 저항성 관리 방안 마련이 필요할 것으로 생각된다.

이와 같은 결과에 따르면 최근 키다리병에 대한 약제 방제 효과가 저하되고, 병 발생이 다시 증가하고 있는 원인 중 하나는 종자 소독약제로 가장 많이 사용하고 있는 prochloraz에 대한 저항성 균의 분포가 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 키다리병 방제를 위한 효율적인 종자 소독방법을 개발하기 위해서는 신속하고, 체계적인 약제 저항성 키다리병균의 모니터링 시스템 구축이 필요하며, prochloraz뿐만 아니라 현재 종자 소독약제로 사용되고 있는 여러 약제에 대한 저항성 분포를 조사하고, 다른 약제와의 교차 저항성 및 다중 저항성을 분석하는 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

적 요

국내에 분포하는 벼 키다리병균의 prochloraz에 대한 저항성 정도를 조사하기 위하여 연도별로 균주를 수집하고, 병원성을 검정하였으며, 한천희석법을 사용하여 각 균주의 prochloraz에 대한 minimum inhibitory concentration (MIC) 값과 effective concentration of 50% (EC₅₀) 값을 조사하였다. 그 결과 2006년부터 2007년 분리균의 MIC 값은 3.125~6.25 µg/mL인 균주가 가장 높은 빈도로 분포하였고, 2013년부터 2014년 분리균의 MIC 값은 6.25~12.5 µg/mL의 농도에서 분포 비율이 가장 높았다. 또한 2006년부터 2007년 분리 균주의 평균 EC₅₀ 값은 0.3142 µg/mL이었으며,

Table 2. Frequency of resistant isolates to prochloraz and mean of EC₅₀ value from each province in Korea

Province	Percentage of resistant isolates to prochloraz (%)		Mean of EC ₅₀ value of isolates from each province	
	2006~2007	2013~2014	2006~2007	2013~2014
Gangwon	5.3	28.3	0.2670	0.4862
Gyeonggi	6.7	32.4	0.3138	0.4928
Chungbuk	0.0	41.9	0.1886	0.6684
Chungnam	8.8	45.6	0.2610	0.8111
Jeonbuk	0.0	40.7	0.2062	0.9086
Jeonnam	50.0	63.0	0.5262	1.1974
Gyeongbuk	3.6	30.8	0.3828	0.6562
Gyeongnam	0.0	38.5	0.1698	0.6543

EC₅₀, effective concentration of 50%.

2013년부터 2014년 분리 균주는 0.8124 $\mu\text{g/mL}$ 이었다. 2006년부터 2007년 분리 균주의 prochloraz에 대한 저항성 기준 EC_{50} 값은 0.6 $\mu\text{g/mL}$ 로 하는 것이 타당한 것으로 생각된다. 이 기준에 의한 저항성 균주의 비율은 2006년부터 2007년 분리 균주는 약 6.5%였고, 2013년부터 2014년 분리 균주에서는 41.6%로 저항성 균주의 빈도가 크게 증가한 것으로 나타났다.

Acknowledgements

This study was supported by a grant (Project No. PJ009891) from Rural Development Administration, Republic of Korea.

REFERENCES

- Kim CK. Ecological studies of bakanae disease of rice, caused by *Gibberella fujikuroi*. Kor J Plant Prot 1981;20:146-50.
- Sung JM, Yang SS, Lee EJ. Pathogenicity in nursery box and symptom appearance and yield damage in paddy field by each strain of *Fusarium moniliforme*. Kor J Mycol 1984; 12:65-73
- Park HG, Shin HR, Lee Y, Kim SW, Kwon OD, Park IJ, Kuk YI. Influence of water temperature, soaking period, and chemical dosage on bakanae disease of rice (*Gibberella fujikuroi*) in seed disinfection. Kor J Pestic Sci 2003;7:216-22.
- Park WS, Choi HW, Han SS, Shin DB, Shim HK, Jung ES, Lee SW, Lim CK, Lee YH. Control of bakanae disease of rice by seed soaking into the mixed solution of prochloraz and fludioxonil. Res Plant Dis 2009;15:94-100.
- Shin MU, Kang HJ, Lee YH, Kim HT. Detection for the resistance of *Fusarium* spp. isolated from rice seeds to prochloraz and cross-resistance to other fungicides inhibiting sterol biosynthesis. Kor J Pestic Sci 2008;12:277-82.
- Lee YH, Kim SY, Choi HW, Lee MJ, Ra DS, Kim IS, Park JW, Lee SW. Fungicide resistance of *Fusarium fujikuroi* isolates isolated in Korea. Kor J Pestic Sci 2010;14:427-32.
- Dyer PS, Hansen J, Delaney A, Lucas JA. Genetic control of resistance to the sterol 14 α -demethylase inhibitor fungicide prochloraz in the cereal eyespot pathogen *Tapesia yallundae*. Appl Environ Microbiol 2000;66:4599-604.
- Dijkhuizen JP, Ogawa JM, Manji BT. Activity of captan and prochloraz on benomyl-sensitive and benomyl-resistant isolates of *Monilinia fructicola*. Plant Dis 1983;67:407-9.
- Decognet V, Cereau V, Jouan B. Control of *Phoma exigua* var. *linicola* on flax by seed and foliar spray treatments with fungicides. Crop Prot 1994;13:105-8.
- Leroux P, Gredt M. Evolution of fungicide resistance in the cereal eyespot fungi *Tapesia yallundae* and *Tapesia acufiformis* in France. Pestic Sci 1997;51:321-7.
- Kurt S, Dervis S, Sahinler S. Sensitivity of *Verticillium dahliae* to prochloraz and prochloraz-manganese complex and control of *Verticillium* wilt of cotton in the field. Crop Prot 2003;22: 51-5.
- Yang HF, Ji MX, Yao KB, Shu ZL. Study on resistance of *Fusarium moniliforme* to prochloraz and its management. Acta Agriculturae Jiangxi 2013;25:94-6.
- Ogawa K, Takeda S. Population of benomyl-resistant rice bakanae fungus in paddy field. Ann Phytopathological Soc Jpn 1990;56:247-9.
- Amatulli MT, Spadaro D, Gullino ML, Garibaldi A. Molecular identification of *Fusarium* spp. associated with bakanae disease of rice in Italy and assessment of their pathogenicity. Plant Pathol 2010;59:839-44.
- Wulff EG, Sørensen JL, Lübeck M, Nielsen KF, Thrane U, Torp J. *Fusarium* spp. associated with rice Bakanae: ecology, genetic diversity, pathogenicity and toxigenicity. Environ Microbiol 2010;12:649-57.
- Jahan Quazi SA, Meon S, Jaafar H, Ahmad ZA. Characterization of *Fusarium proliferatum* through species specific primers and its virulence on rice seeds. Int J Agric Biol 2013;15: 649-56.
- Mohd Zainudin NA, Razak AA, Salleh B. Bakanae disease of rice in Malaysia and Indonesia: etiology of the causal agent based on morphological, physiological and pathogenicity characteristics. J Plant Prot Res 2008;48:475-85.
- Yang L, Gao F, Shang L, Zhan J, McDonald BA. Association between virulence and triazole tolerance in the phytopathogenic fungus *Mycosphaerella graminicola*. PLoS One 2013;8: e59568.
- Cowger C, Mundt CC. Aggressiveness of *Mycosphaerella graminicola* isolates from susceptible and partially resistant wheat cultivars. Phytopathology 2002;92:624-30.