

RESEARCH ARTICLE

전남북 지역 맥류 붉은곰팡이병균의 Propiconazole 약제에 대한 감수성 변화

백지선¹, 나주영¹, 이미정¹, 임수빈¹, 최정혜¹, 장자영¹, 이데레사¹, 최효원², 김점순^{1*}

¹국립농업과학원 유해생물과, ²국립농업과학원 작물보호과

Change in the Sensitivity to Propiconazole of *Fusarium graminearum* Species Complex Causing Head Blight of Barley and Wheat in Jeolla Province

Jiseon Baek¹, Ju-Young Nah¹, Mi-Jeong Lee¹, Su-Bin Lim¹, Jung-Hye Choi¹, Ja Yeong Jang¹, Theresa Lee¹, Hyo-Won Choi², and Jeomsoon Kim^{1*}

¹Microbial Safety Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

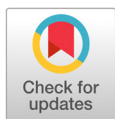
²Crop Protection Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: kimjs33@korea.kr

ABSTRACT

Fusarium head blight is an important disease of small grains. It is mainly caused by members of the *Fusarium graminearum* species complex (FGSC). Barley and wheat growers spray fungicides, especially demethylation-inhibitor fungicides, to suppress the disease. The objective of this study was to examine the changes in the sensitivity of the FGSC population to the triazole fungicide, propiconazole. A total of 124 and 350 isolates of FGSC were obtained from barley and wheat in Jeolla Province during 2010-2016 and 2020-2021, respectively. The species identity and trichothecene chemotypes of the FGSC isolates were determined based on polymerase chain reaction assays targeting translation elongation factor 1-alpha and *TRI12* genes, respectively. Sensitivity to propiconazole was determined based on the effective concentration that reduced 50% of the mycelial growth (EC_{50}) using the agar dilution method. Of all isolates, *F. asiaticum* with the nivalenol chemotype was the most common (83.9% in 2010-2016 and 96.0% in 2020-2021), followed by *F. asiaticum* with the 3-acetyl deoxynivalenol chemotype (12.1% in 2010-2016 and 2.9% in 2020-2021). The EC_{50} values of the isolates collected in 2010-2016 and 2020-2021 ranged from 0.0180 to 11.0166 $\mu\text{g}/\text{mL}$ and 1.3104 to 17.9587 $\mu\text{g}/\text{mL}$, respectively. The mean EC_{50} value of the isolates increased from 3.8648 $\mu\text{g}/\text{mL}$ in 2010-2016 to 5.9635 $\mu\text{g}/\text{mL}$ in 2020-2021. The baseline resistance to propiconazole was determined to be 7 $\mu\text{g}/\text{mL}$, based on the EC_{50} value of isolates collected in 2010-2016, and the ratio of resistant isolates increased from 9.7% in 2010-2016 to 28.6% in 2020-2021.

Keywords: Barley, Fungicide sensitivity, *Fusarium* head blight, Propiconazole, Wheat



OPEN ACCESS

pISSN : 0253-651X
eISSN : 2383-5249

Kor. J. Mycol. 2022 December, 50(4): 281-289
<https://doi.org/10.4489/KJM.20220030>

Received: October 19, 2022

Revised: November 23, 2022

Accepted: November 25, 2022

© 2022 THE KOREAN SOCIETY OF MYCOLOGY.



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.

서론

맥류의 붉은곰팡이병은 *Fusarium graminearum* species complex에 속하는 균들에 의해 발생되며 이들은 주로 개화기에 침입, 낱알을 찌그러들게 하여 품질과 수량을 떨어뜨리고, 종종 데옥시니발레놀(deoxynivalenol, DON), 니발레놀(nivalenol, NIV)과 이들의 아세틸 유도체 및 제랄레논(zearalenone)과 같은 독소를 생성하여 식품과 사료의 안전성을 위협한다[1].

우리나라에서 붉은곰팡이병은 보리, 밀 뿐 아니라 벼와 귀리 등에도 발생하며, 우점하는 원인균은 DON을 주로 생성하는 *F. graminearum*보다 NIV를 생성하는 *F. asiaticum*인 것으로 보고되었다[2-4]. 농촌진흥청에 따르면 맥류 붉은곰팡이병의 발병률은 2002년 54.7%, 2012년 8.2%, 2016년 6.7%, 2018년 16.2%, 2021년 7.0%로 조사되었고, 특히 출수기부터 등숙기까지의 연속된 강우가 피해를 유발하는 것으로 나타났다. 전세계적으로 붉은곰팡이병의 방제에는 비기주작물과의 윤작, 저항성 품종의 재배 및 등록된 살균제 살포 등의 종합적 방법이 권장되어 왔다[5]. 그러나 국내 맥류 주산지에서는 대부분 기주작물인 맥류와 벼를 윤작하고 있으며, 저항성이 높은 품종이 없어 약제 방제에 의존하고 있는 실정이다. 현재 등록된 방제 약제로는 보리에 hexaconazole 입상수화제 등 8종이, 밀에는 fludioxonil 액상수화제 등 4종이 있으나, 실제 맥류 재배 농가에서는 보리와 밀에 함께 등록되어 있는 captan 수화제와 difenoconazole·propiconazole 유제를 주로 사용하고 있다. 이 중 propiconazole은 thiophanate-methyl 또는 tebuconazole과도 합제로 보리의 붉은곰팡이병에 등록되어 있다. Propiconazole과 같은 triazole계 탈메틸화 저해제(demethylation inhibitor, DMI)는 곰팡이의 세포벽 합성에 중요한 역할을 하는 에르고스테롤의 전구체인 라노스테롤의 14-C 탈메틸화를 저해하며, 광범위한 곰팡이에 효과적이다[6]. 그러나 최근에는 몇 가지 triazole계 저항성 병원균이 보고되면서 방제에 어려움을 겪고 있는데 prochloraz에 대한 벼 키다리병균(*Fusarium fujikuroi*)의 저항성이 국내외에서 보고되었으며[7-10], propiconazole에 대해서도 복숭아와 자두의 잣빛무늬병균(*Monilinia fructicola*)과 잔디의 동전마름병균(*Claviceps* sp.) 등이 지속적인 노출에 의해 감수성이 낮아졌다는 보고가 있다[11-13].

붉은곰팡이병균의 triazole계 살균제 저항성은 2000년대 후반 중국에서 tebuconazole과 prochloraz[14], 독일에서 propiconazole[15] 저항성 균이 보고된 바 있고, tebuconazole에 적응된 붉은곰팡이병 균주가 azole계에 특이적 교차 저항성을 보였다는 보고가 있다[16]. 또한 미국에서도 triazole계 살균제가 밀에 광범위하게 사용된 2000년 이후에 분리된 균주가 1981-1999년 균주보다 metconazole과 tebuconazole에 대한 감수성이 절반으로 감소하였다는 보고[17]와 2014년 tebuconazole 감수성이 저하된 균주가 보고된 바 있다[18].

붉은곰팡이병균의 살균제 저항성은 방제 효과의 저하로 인한 수량감소뿐만 아니라 곰팡이독소의 생성으로 인해 안전성도 떨어뜨리므로 맥류 붉은곰팡이병균 집단의 감수성 변화를 모니터링하는 것이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 국내 맥류 재배면적의 80% 이상을 차지하는 전남 북 지역에서 2010-2016년과 2020-2021년에 분리한 붉은곰팡이병균을 동정하고 독소화학형을 분석하였으며, 방제 약제로 많이 사용되는 propiconazole에 대한 감수성 정도를 조사하여 연도별 저항성 변이를 분석하고, 저항성 기준을 설정하였다.

재료 및 방법

붉은곰팡이병균의 분리, 동정 및 독소화학형 분석

전남북 지역의 보리와 밀에서 2010년부터 2016년까지 분리하여 보존 중인 124개 균주와 2020년과 2021년에 분리한 350개 균주를 대상으로 실험을 수행하였다. 5월 하순경 지역별 맥류 포장에서 무작위로 이삭을 수집하였으며, 낱알을 분리하여 1% 차아염소산나트륨으로 표면소독하고 멸균수로 2회 행군 다음 감자한천배지(potato dextrose agar, PDA)에 치상하여 25°C에서 5일간 배양하였다. 자라난 균총을 카네이션잎배지(carnation leaf agar)에 옮겨 배양하여 포자를 형성시킨 후 단포자를 분리하였고, 20% glycerol 용액으로 포자현탁액을 만들어 -80°C에 보관하며 실험에 사용하였다. 종 동정과 B type trichothecene 독소화학형은 TEF (translation elongation factor 1- α)와 *TRI2* 유전자를 각각 이용하여 결정하였다[19].

맥류 붉은곰팡이병균의 propiconazole에 대한 억제반응 조사

Propiconazole (a.i. 25%, EC)에 대한 붉은곰팡이병균의 감수성 정도는 한천희석법을 이용하여 균사생장 억제 정도를 조사하여 비교하였다. 연도별 분리 균주를 PDA배지에 접종하여 25°C에서 5일간 배양한 후 활발히 자라는 균총의 선단부를 cork borer (직경 5 mm)로 절단하였다. 약제는 멸균수에 용해하여 PDA 배지에 최종 농도가 각각 500.0, 100.0, 20.0, 4.0, 0.8, 0.16 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 가 되도록 첨가하였고, 절단한 균총은 배지 중앙에 접종하였다. 균주당 각 농도별 2반복으로 하고 최소 2회 실험하였다. 접종한 plate를 25°C 암상태에서 5일동안 배양한 후 직경을 수직으로 2회 조사하고 접종원 크기를 뺀 다음 평균을 구하였다. 측정된 균총의 직경과 약제를 첨가하지 않은 PDA 배지에서의 균총 직경을 비교하여 균사생장 억제율(%), $[1 - (\text{약제 배지에서의 균총 직경} / \text{무처리 배지에서의 균총 직경})] \times 100$ 을 계산하였다. SigmaPlot version 12.3 (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA) 프로그램을 이용하여 균사생장을 50% 억제하는 농도인 Half maximal effective concentration (EC_{50}) 값을 계산하였고, 균사생장억제율과 EC_{50} 값을 기준으로 저항성 균주와 감수성 균주를 구분하였다.

결과 및 고찰

실험 균주의 동정 및 독소화학형

전남북 지역의 보리와 밀에서 분리한 균주들의 종 구성과 독소화학형은 Table 1과 같다. 2010년부터 2016년까지의 124개 균주 중에서는 니발레놀을 생성하는 *F. asiaticum* (*F. asiaticum*-NIV)이 83.9% (104개), 3-아세틸 데옥시니발레놀을 생성하는 *F. asiaticum* (*F. asiaticum*-3-ADON)이 12.1% (15개), 15-아세틸 데옥시니발레놀을 생성하는 *F. graminearum* (*F. graminearum*-15-ADON)이 3.2% (4개), 3-아세틸 데옥시니발레놀을 생성하는 *F. graminearum* (*F. graminearum*-3-ADON)이 0.8% (1개)로 나타났다. 2020년부터 2021년에 분리한 350개 균주 중에서는 *F. asiaticum*-NIV가 96.0% (336개), *F. asiaticum*-3-ADON이 2.9% (10개), *F. graminearum*-15-ADON이 0.8% (3개), *F.*

graminearum-3-ADON이 0.3%(1개)로 나타났다. 이는 2001년 전남북을 포함한 남부 지역 벼에서 분리한 붉은곰팡이병균의 97%가 *F. asiaticum*-NIV였다는 결과[20]와 유사하며, 이 등[2]도 2009년 국내 벼에서 분리된 253개 붉은곰팡이병균의 95%, 특히 전남북 지역 분리균의 98.9%가 *F. asiaticum*-NIV라고 하면서 이 균이 벼를 선호한다고 하였다. 이러한 경향은 밀과 벼가 윤작되는 중국 남부에서 밀 분리균의 97%가 *F. asiaticum*였으며[21], 일본의 밀과 보리에서 분리된 균주의 82.2%가 *F. asiaticum*이었고 그 중 약 70%가 NIV형이었다는 보고[22]와 같이 중국, 일본 등에서도 유사하다. Lee 등[3]은 *F. asiaticum*-NIV가 국내 벼, 보리, 밀 등의 곡류에 우점하며, *F. graminearum*에 비해 유성생식 능력은 떨어지나 벼에 대한 병원성이 더 강한데 이는 *F. asiaticum*-NIV가 맥류와 벼의 윤작체계에 적응한 결과로 보인다고 하였다. 본 연구에서 *F. asiaticum*-NIV가 절대다수로 종 및 독소화학형에 따른 propiconazole 감수성의 차이를 보기는 어려웠다. 향후 분리 지역 및 기주를 확대하여 이를 살펴보는 것이 필요할 것으로 생각된다.

Table 1. Species composition (%) of *Fusarium graminearum* species complex isolated from barley and wheat during 2010-2016 and 2020-2021, respectively.

Year	Species (chemotype)				Total
	<i>F. asiaticum</i> (NIV)	<i>F. asiaticum</i> (3-ADON)	<i>F. graminearum</i> (15-ADON)	<i>F. graminearum</i> (3-ADON)	
2010-2016	83.9 (104) ^a	12.1 (15)	3.2 (4)	0.8 (1)	100.0 (124)
2020-2021	96.0 (336)	2.9 (10)	0.8 (3)	0.3 (1)	100.0 (350)

NIV: nivalenol; 3-ADON: 3-acetyl deoxynivalenol; 15-ADON: 15-acetyl deoxynivalenol.

^a Number of isolates in parentheses.

붉은곰팡이병균의 propiconazole에 대한 감수성

분리 균주를 대상으로 균사생장을 50% 억제하는 농도인 EC₅₀ 값을 구하여 그래프로 나타낸 결과 2020-2021년 분리 균주의 EC₅₀ 값의 범위가 2010-2016년 분리 균주에 비해 크게 넓어진 것을 볼 수 있었다(Fig. 1). 즉 2010-2016년 분리 균주의 최소값은 0.0180 µg/mL, 최대값은 11.0166 µg/mL인데 비해 2020-2021년 분리 균주의 경우 최소값이 1.3104 µg/mL, 최대값은 17.9587 µg/mL로 나타났다. 또한 2010-2016년 분리 균주의 평균 EC₅₀ 값은 3.8648 µg/mL인데 비해 2020-2021년 분리 균주는 5.9635 µg/mL였다. EC₅₀ 값의 범위별 분포도에서는 2010-2016년에는 3.0-4.0 µg/mL에 분포하는 균주 비율이 가장 높았으나 2020-2021년에는 1.0 µg/mL 이하의 균주가 없고 7.0 µg/mL보다 큰 균주 비율이 가장 높았다. 이러한 결과들로 볼 때 전남북 지역 붉은곰팡이병균의 propiconazole 저항성이 증가하고 있는 것으로 판단되었다(Fig. 2). 붉은곰팡이병균의 triazole계 저항성 정도에 대해서는 중국에서 2007-2008년 분리된 159개 균주 중 tebuconazole과 prochloraz에 대한 EC₅₀ 값이 각각 6.235 µg/mL와 4.575 µg/mL인 균주 등 3개가 저항성을 보였다고 하였다[14]. 반면 일본에서는 2012년까지 붉은곰팡이병균의 메트코나졸에 대한 저항성은 발견되지 않았다고 하였다[23]. Talas 등[15]은 독일에서 2008년 분리된 균주의 propiconazole에 대한 EC₅₀ 값의 범위가 5.4-62.2 µg/mL, 평균 EC₅₀ 값은 22.2 µg/mL라고 하였으며 이는 붉은곰팡이병에 대한 저항성이 약한 듀럼밀의 재배로 인한 잦은 약제 살포 때문이라고 하였다. 국내에도 붉은곰팡이병에 강한 저항성을 가진 품종이 없어 약제 살포 효과가 낮았을 것으로 생각되나 그로 인한 살포 횟수의 증가가 있었는지는 조사가 필요할 것으로 판단된다.

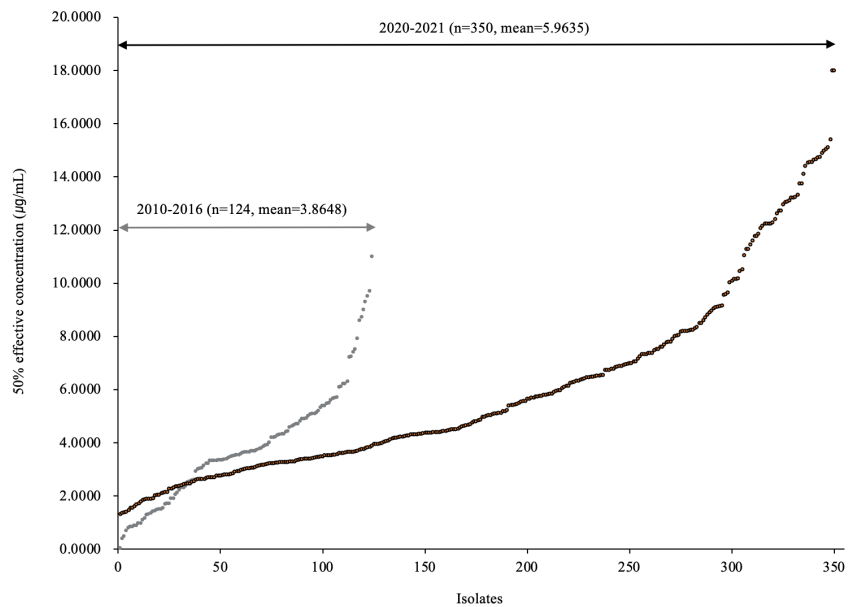


Fig. 1. Variation of 50% effective concentration (EC_{50}) values of *Fusarium graminearum* species complex isolated from barley and wheat in 2010-2016 and 2020-2021.

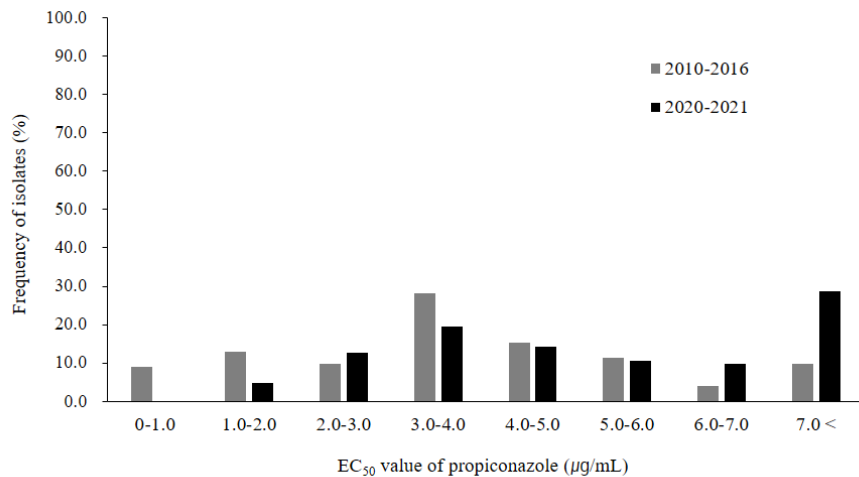


Fig. 2. Frequency distribution of 50% effective concentration (EC_{50}) values of *Fusarium graminearum* species complex isolated from barley and wheat in 2010-2016 and 2020-2021.

분리 균주의 propiconazole에 대한 저항성 기준을 설정하기 위하여 2010년부터 2016년에 분리한 균주의 균사생장 억제율을 그래프로 나타낸 결과 12개 균주가 저항성으로 그룹화되었으며, 이들의 EC_{50} 값의 범위는 7.2282-11.0166 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 로 조사되었다(Fig. 3). 또한 이 균주들은 약 7 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 의 propiconazole 농도에서 균사생장 억제율이 50% 이하로 나타나 이 농도를 저항성 기준으로 하는 것이 타당한 것으로 생각되었다. 이를 기준으로 했을 때 2010-2016년 분리 균주 중 저항성의 비율은 9.7%였으나 2020-2021년 분리 균주 중에서는 28.6%로 3배 가까이 증가하였다(Fig. 4). 지역별

로 보면 전북과 전남 지역 모두 2010-2016년보다 2020-2021년에 저항성 균주 비율이 3배 정도 증가하여 유사한 경향이였다(Table 2). 지역 간에는 전북지역 분리 균주의 저항성 비율이 2010-2016년 6.5%와 2020-2021년 17.7%로 전남지역의 3.2%와 10.9%에 비해 높았으나, 평균 EC₅₀ 값은 큰 차이가 없어 이는 조사된 균주 수에 차이가 있었기 때문으로 생각되며 향후 더 많은 균주에 대해 조사할 필요가 있을 것으로 보인다.

Table 2. Frequency and mean EC₅₀ value of resistant isolates to propiconazole according to provinces.

Province	Frequency of resistant isolates (%)		Mean of EC ₅₀ value of resistant isolates (µg/mL)	
	2010-2016	2020-2021	2010-2016	2020-2021
Jeonbuk	6.5	17.7	8.7125 (0.4115~11.0166) ^a	10.3772 (1.3467~15.0421)
Jeonnam	3.2	10.9	8.3321 (0.0180~9.7698)	11.0699 (1.3104~17.9857)

EC₅₀: effective concentration that reduced 50% of the mycelial growth.

^a Range of EC₅₀ value in parentheses.

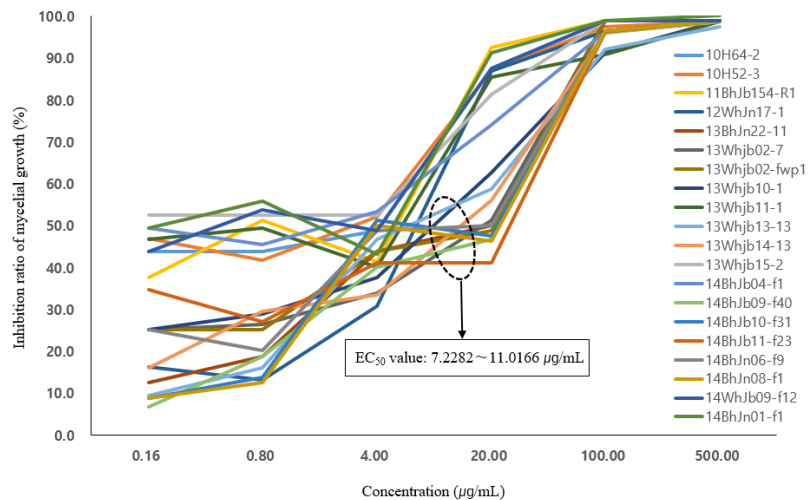


Fig. 3. Baseline of fungicide response resistant to propiconazole on isolates of *Fusarium graminearum* species complex during 2010-2016 in Jeolla province.

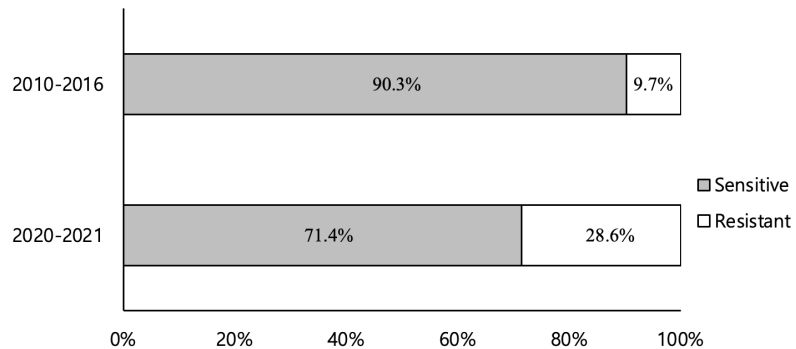


Fig. 4. Percentage of sensitivity and resistance to propiconazole in isolates collected from Jeolla province in 2010-2016 and 2020-2021. Fungicide response was decided with a baseline level of resistance.

Propiconazole은 difenoconazole과 합제로 맥류 붉은곰팡이병에 2010년 등록되었으나 벼 잎집무늬마름병에는 2002년, 이삭누룩병에는 2007년에 등록되었다. 또한 thiophanate-methyl과 합제로 보리 붉은곰팡이병에 2017년 등록되었으나 벼의 잎도열병과 깨씨무늬병 및 잎집무늬마름병에는 2010년, 이삭누룩병에는 2011년에 등록되었다. 이와 같이 propiconazole 합제가 2010년, 2017년에 맥류에 등록되었기 때문에 그 이전에는 사용되지 않았을 것으로 보이지만, 우리나라 대부분의 맥류 재배지는 벼와 이모작을 하고 있어 동일한 재배 포장에서 벼를 대상으로 사용되었을 것으로 추정되며, 해당 지역의 맥류 붉은곰팡이병균의 저항성 발현에 영향을 주었을 것으로 판단된다. Becher 등[16]은 동일 계통 살균제의 지속적인 사용으로 인해 붉은곰팡이병균의 감수성이 줄어들었다고 하였다. 박 등[24]은 2012년 김제와 익산 지역의 밀 재배포장에서 약제들의 붉은곰팡이병 방제효과를 조사한 결과 difenoconazole-propiconazole 유제가 90% 이상의 방제가를 보였다고 하였는데, 이는 그 당시에는 저항성 균의 분포가 높지 않았기 때문으로 추정된다. 그러나 본 연구에서 저항성 균의 분포가 증가한 것으로 판단되기 때문에 propiconazole 합제로 등록된 살균제에 대한 맥류 재배포장에서의 방제효과도 조사할 필요가 있다.

본 연구는 국내 붉은곰팡이병균의 살균제 저항성에 대한 첫번째 보고이다. 비록 조사 연도나 분리 지역이 적은 한계가 있으나 분리시기가 다른 균주들 간의 살균제 저항성의 차이를 볼 수 있었다. 국내 보리나 밀에 등록된 살균제인 difenoconazole, tebuconazole, hexaconazole, metconazole 또한 같은 DMI 계통으로 병원균의 triazole에 대한 노출이 많아 이들 약제에 대한 감수성 변화 및 교차저항성 등도 살펴볼 필요가 있다. 특히 우리나라 벼-맥류 형태의 이모작을 고려할 때, 동일 계통의 약제에 지속적으로 노출될 수 있는 조건이므로 국내 붉은곰팡이병 등록 약제의 저항성 모니터링을 지속적으로 수행하고, 다른 활성 기작을 갖는 약제를 선발하는 등 약제 저항성에 대한 효과적인 관리방안 마련을 위한 노력을 병행하여야 할 것이다.

적요

붉은곰팡이병은 곡류의 중요한 병이며 *Fusarium graminearum* species complex (FGSC)에 속하는 균들에 의해 발생한다. 맥류 재배 농가들은 이 병을 방제하기 위해 탈메틸화 억제제인 triazole계 살균제를 살포한다. 본 연구는 FGSC 집단에서 triazole계 살균제인 propiconazole에 대한 감수성의 변화를 조사하기 위해 수행되었다. 2010-2016년과 2020-2021년 동안 전남북의 보리와 밀에서 124개와 350개의 FGSC 균주를 각각 분리하였다. 균주들의 종 동정 및 트리코테센 독소화학형은 각각 translation elongation factor 1-alpha 및 *TRI12* 유전자를 표적으로 하는 PCR 분석을 기반으로 결정되었다. propiconazole에 대한 민감도는 한천 희석법을 사용하여 균사체 성장을 50% 감소시키는 유효 농도(EC_{50})를 기준으로 결정되었다. 모든 균주에서 nivalenol 독소화학형의 *F. asiaticum*이 가장 많았으며(2010-2016년 83.9%, 2020-2021년 96.0%), 3-acetyl deoxynivalenol 독소화학형의 *F. asiaticum* (2010-2016년 12.1%, 2020-2021년 2.9%)이 그 다음이었다. 2010-2016년과 2020-2021년에 수집된 균주의 EC_{50} 값은 각각 0.0180-11.0166 $\mu\text{g/mL}$ 및 1.3104-17.9587 $\mu\text{g/mL}$ 범위였으며, 평균 EC_{50} 값은 2010-2016년 3.8648 $\mu\text{g/mL}$ 에서 2020-2021년 5.9635 $\mu\text{g/mL}$ 로 증가했다. 2010-2016년 균주의 EC_{50} 값을 바탕으로 7.0 $\mu\text{g/mL}$ 을 저항성 기준으로 정하였고, 저항성 균주의 수는 2010-2016년 9.7%에서 2020-2021년 28.6%로 증가한 것으로 나타났다.

CONFLICT OF INTERESTS

No conflict of interest was reported by the author(s).

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out with the support of Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ014895), National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

REFERENCES

1. O'Donnell K, Kistler HC, Tacke BK, Casper HH. Gene genealogies reveal global phylogeographic structure and reproductive isolation among lineages of *Fusarium graminearum*, the fungus causing wheat scab. *Proc Natl Acad Sci USA* 2000;97:7905-10.
2. Lee SH, Lee J, Nam YJ, Lee S, Ryu JG, Lee T. Population structure of *Fusarium graminearum* from maize and rice in 2009 in Korea. *Plant Pathol J* 2010;26:321-7.
3. Jang JY, Baek SG, Choi JH, Kim S, Kim J, Kim DW, Yun SH, Lee T. Characterization of nivalenol-producing *Fusarium asiaticum* that causes cereal head blight in Korea. *Plant Pathol J* 2019;35:543-52.
4. Choi JH, Nah JY, Jin HS, Lim SB, Paek JS, Lee MJ, Jang JY, Lee T, Hong SK, Kim J. Identification and chemotype profiling of *Fusarium* species in Korean oat. *Res Plant Dis* 2019;25:1-7.
5. Wegulo SN, Baenziger PS, Nopsa JH, Bockus WW, Hallen-Adams H. Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley. *Crop Prot* 2015;73:100-7.
6. FRAC Code List ©*2022. Fungicide Resistance Action Committee [Internet]. Brussels: CropLife International; 2022. [cited 2022 Oct 14]. Available from: https://www.frac.info/docs/default-source/publications/frac-code-list/frac-code-list-2022--final.pdf?sfvrsn=b6024e9a_2.
7. 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.
8. 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.
9. Choi HW, Lee YH, Hong SK, Lee YK, Nam YJ, Lee JG, Han SH. Monitoring for the resistance to prochloraz of *Fusarium* species causing bakanae disease in Korea. *Kor J Mycol* 2015;43:112-7.
10. 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.
11. Schnabel G, Bryson PK, Bridges WC, Brannen PM. Reduced sensitivity in *Monilinia fructicola* to propiconazole in Georgia and implications for disease management. *Plant Dis* 2004;88:1000-4.
12. Zehr EI, Luszcz LA, Olien WC, Newall WC, Toler JE. Reduced sensitivity in *Monilinia fructicola* to propiconazole following prolonged exposure in peach orchards. *Plant Dis*

- 1999;83:913-6.
13. Bishop P, Sorochan J, Ownley BH, Samples TJ, Windham AS, Windham MT, Trigliano RN. Resistance of *Sclerotinia homoeocarpa* to iprodione, propiconazole, and thiophanate-methyl in Tennessee and Northern Mississippi. *Crop Sci* 2008;48:1615-20.
 14. Yin Y, Liu X, Li B, Ma Z. Characterization of sterol demethylation inhibitor-resistant isolates of *Fusarium asiaticum* and *F. graminearum* collected from wheat in China. *Phytopathology* 2009;99:487-97.
 15. Talas F, McDonald BA. Significant variation in sensitivity to a DMI fungicide in field population of *Fusarium graminearum*. *Plant Pathol* 2015;64:664-70.
 16. Becher R, Hettwer U, Karlovsky P, Deising HB, Wirsel SGR. Adaptation of *Fusarium graminearum* to tebuconazole yielded descendants diverging for levels of fitness, fungicide resistance, virulence, and mycotoxin production. *Phytopathology* 2010;100:444-53.
 17. Anderson NR, Freije AN, Bergstrom GC, Bradley CA, Cowger CC, Faske T, Hollier C, Kleczewski N, Padgett GB, Paul P. Sensitivity of *Fusarium graminearum* to metconazole and tebuconazole fungicide before and after widespread use in wheat in the United States. *Plant Health Progress* 2020;21:85-90.
 18. Spolti P, Del Ponte EM, Dong Y, Cummings JA, Bergstrom GC. Triazole sensitivity in a contemporary population of *Fusarium graminearum* from New York wheat and competitiveness of a tebuconazole-resistant isolate. *Plant Dis* 2014 98:607-13.
 19. Starkey DE, Ward TJ, Aoki T, Gale LR, Kistler HC, Geiser DM, Suga H, Toth B, Varga J, O'Donnell K. Global molecular surveillance reveals novel *Fusarium* head blight species and trichothecene toxin diversity. *Fungal Genet Biol* 2007;44:1191-204.
 20. Lee J, Chang IY, Kim H, Yun SH, Leslie JF, Lee YW. Genetic diversity and fitness of *Fusarium graminearum* populations from rice in Korea. *Appl Environ Microbiol* 2009;75:3289-95.
 21. Zhang H, van der Lee T, Waalwijk C, Chen W, Xu J, Xu J, Zhang Y, Feng J. Population analysis of the *Fusarium graminearum* species complex from wheat in China show a shift to more aggressive isolates. *PLoS ONE* 2012;7:e31722.
 22. Suga H, Karugia GW, Ward T, Gale LR, Tomimura K, Nakajima T, Miyasaka A, Koizumi S, Kageyama K, Hyakumachi M. Molecular characterization of the *Fusarium graminearum* species complex in Japan. *Phytopathology* 2008;98:159-66.
 23. Hirooka T, Ishii H. Chemical control of plant diseases. *J Gen Plant Pathol* 2013;79:390-401.
 24. Park JM, Shin Sh, Kang CS, Kim KH, Cho KM, Choi JS, Kim HM, Park JC. Fungicide effects *in vitro* and in field trials on *Fusarium* head blight of wheat. *Res Plant Dis* 2012;18:194-200.