



충북과 충남 오이 재배지에서 채집한 오이흰가루병균 집단 의 살균제 저항성 검정

민순홍 · 김흥태*

충북대학교 농업생명환경대학 식물외과

Testing for the Fungicide Resistance of Cucumber Powdery Mildew Populations Collected from Cucumber Cultivation Areas in Chungbuk and Chungnam

Sunhong Min, Heung Tae Kim*

Department of Plant Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received on October 30, 2023. Revised on November 27, 2023. Accepted on November 30, 2023)

Abstract Fungicide resistance test to pathogen populations of powdery mildew collected from 6 regions in Chungbuk and Chungnam was conducted on the cotyledons of cucumber seedlings grown in a greenhouse in 2020. The pathogen populations of powdery mildew in the 6 regions were thought to be highly resistant to most fungicides except for protective fungicides. Boscalid and penthiopyrad, as succinate dehydrogenase inhibiting fungicides (SDHI fungicides) belonging to the fungicide group C2, showed a control efficacy of less than 70% on each pathogen population collected in all regions. Fluxapyroxad showed more than 70% of control value against pathogen populations collected from Bunpyeong, Jincheon, and Byeongcheon – field 2, while its control value against them from Osong, Byeongcheon – field 1, and Ipjang was very low. Fluopyram showed control value of 63.2% and 54.2% against them in Bunpyeong and Byeongcheon – field 2, respectively, and a good efficacy of over 70% in the other regions. Pyraclostrobin, a strobilurin fungicide included into C3 group, showed little control value. Among the fungicides that inhibit ergosterol biosynthesis belonging to G1 group, the control values of difenoconazole and tetraconazole were very low, while prochloraz showed excellent control values ranging from 66.7% to 100% to each population in five fields. Among protective fungicides, as sulfur, iminocadine tris-albesilate and propineb, had excellent control values to them in most regions. Therefore, preventive treatment with protective fungicides should be recommended to control cucumber powdery mildew. In addition, in order to increase the control efficiency and manage fungicide resistance, it is believed that a fungicide treatment system based on protective fungicide should be established and used.

Key words Cucumber powdery mildew, *Podosphaera xantii*, Fungicide resistance, Protective fungicide

서 론

오이는 전국적으로 3,836 ha에서 재배하고 있으며, 생산량은 28만 톤을 상회한다(KOSIS, 2023). 시설 재배 기술은 1987년부터 도입되기 시작하여, 1990년 이후 시설 재배지의 면적이 노지 재배지 면적을 상회하기 시작하였으며, 2022년

에는 3,063 ha로 전체 면적의 79.8%를 차지하고 있다. 생산량 역시 오이 전체 생산량인 28만 톤 중 89.3%에 해당하는 25만 톤이 시설 재배에서 생산되고 있는 것을 보면, 지금의 오이 재배의 대부분은 시설 하우스에서 재배하고 있다고 봐도 과언이 아니다. 국내에서는 오이에 17종의 곰팡이와 세균에 의한 병이 알려져 있으며(KSPP, 2023), 이 중에서 흰가루병은 전 세계적으로 오이 생산량을 감소시키는 중요한 병으로 알려져 있다(Cohen et al., 2004; McCreight, 2006;

*Corresponding author
E-mail: htkim@cbnu.ac.kr

Křístková et al., 2009). 이런 오이 흰가루병의 중요한 방제 방법은 살균제를 사용하는 방법이다(McGrath, 2001; Lebeda et al., 2010; Vielba-Fernández et al., 2020). 특히 흰가루병과 같이 잎의 앞면뿐만 아니라 뒷면에도 병이 발생하는 식물병을 방제하기 위해서는 살균제가 침투이행성 또는 침달성의 특성을 지녀야 방제의 효과를 높일 수 있다(McGrath, 2001). 그런데 침투이행성나 침달성과 같은 특징을 지니는 살균제는 살균제 저항성이 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있을 뿐만 아니라, 오이 흰가루병을 일으키는 *Podosphaera xanthii* 자체가 살균제 저항성이 발생할 위험도가 높은 병원균으로 알려져 있다. 또한 시설 재배지가 위주인 국내에서는 오이 흰가루병이 연중 발생하는 병이기 때문에, 방제를 위해서 처리하는 살균제의 횟수가 많은 병으로 알려져 있다(Kim et al., 2008). 국내에서도 경기 지역의 오이흰가루병균에 대한 살균제 저항성 정도를 검정하였을 때, benzimidazole계통인 carbendazim과 strobilurin계통인 azoxystrobin에서 저항성 발현 정도가 매우 심한 것으로 나타났다(Kim et al., 2008). Triazole계인 difenoconazole에 대해서 평택 분리주는 중도 저항성균으로, 오산 분리주는 저항성균으로 검정되었으며, 살균제의 계통은 다르지만 동일한 작용기작을 갖는 fenarimol에 대해서는 평택, 오산, 용인 지역의 분리주가 감수성 내지는 중도 저항성균으로 검정되었고, 오산의 분리주는 저항성균으로 규명되었다.

국내에서 오이 흰가루병을 방제하기 위한 살균제 등록을 보면 1980년대 초반 polyoxin B가 등록되어 사용되기 시작하였고, 1986년에 triazole계 살균제인 bitertanol이 등록되면서 2000년 이전까지 주요 살균제 그룹으로 사용되어왔다(Pesticide Safety Information System, 2023). 그 후 2001년에 아미노산과 단백질 합성을 저해하는 것으로 알려진 mepanipyrim과 pyrimethanil이 등록되었고, strobilurin계에

속하는 pyraclostrobin, kresoxim-methyl, trifloxystrobin 등이 2002년과 2003년에, 병원균의 탈수소효소 활성을 저해하는 살균제(succinate dehydrogenase inhibitor, SDHI)인 boscalid가 2003년에 단제 또는 혼합제로 등록되면서 다양한 작용기작의 살균제들이 사용되기 시작하였다. 2011년에는 penthiopyrad와 fluopyram 등이 등록되면서 새로운 화학구조를 가진 탈수소효소 저해 살균제들이 등록되면서 현재에 이르고 있다.

그런데 최근 오이를 재배하는 시설 재배지 현장에서 살균제의 효과가 과거와는 다르게 감소하면서, 흰가루병에 대한 방제가 문제가 되고 있다는 의견들이 속출하고 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 작용기작 그룹에 속하는 살균제를 선발하여, 충북과 충남의 오이 시설재배 하우스에서 채집한 오이흰가루병균 집단에 대한 방제 효과를 온실에서 오이 떡잎을 사용하여 검정하였다.

재료 및 방법

병원균 채집

흰가루병균은 충남과 충북의 오이 재배 시설하우스 6곳에서 채집하였다(Fig. 1). 각 지역의 시설하우스에서 흰가루병이 발생한 오이 잎을 채집하여 실험에 사용하였다.

오이 재배

진미백다다기 오이(KS종묘(주))를 50구 연결 포트에 원예용 상토(두배나(원예용 상토 2호), (주)농경)와 수도용 상토(황금나라(수도용 상토 1호), (주)서울바이오)를 혼합(v/v; 1/1)하여 넣고, 파종한 다음 온실에서 재배하였다. 일주일에 1회씩 0.1% 요소액(엔피코 요소 비료(N 성분 46%), (주)풍농)을 토양 관주 시비하였다. 실험에는 1엽기의 오이와 떡잎만 전

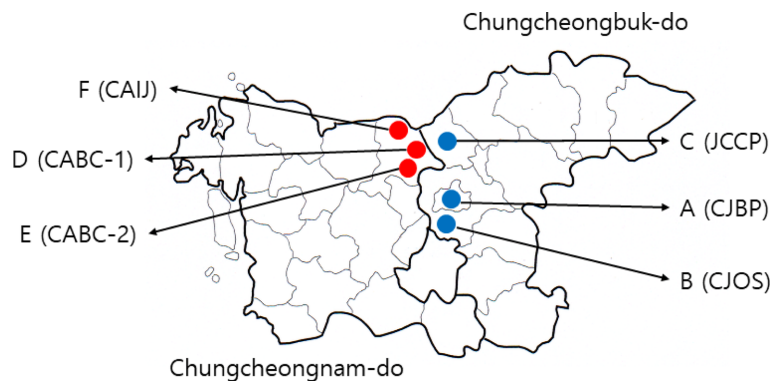


Fig. 1. Regions where cucumbers infected with cucumber powdery mildew were collected in Chungcheongbuk-do and Chungcheongnam-do. A; Bunpyeong-dong, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do (CJBP), B; Osong-eup, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do (CJOS), C; Chopyeong-myeon, Jincheon-eup, Jincheon-gun, Chungcheongbuk-do (JCCP), D; Byeongcheon-myeon field-1, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do (CABC-1), E; Byeongcheon-myeon field-2, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do (CABC-2), and F; Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do (CAIJ).

Table 1. Fungicides used in this experiment

| Fungicides | Mode of action | Active Ingradient (%) | Formulation | Dilution (fold) | Concentration (µg/ml) |
|-------------------------------|----------------|-----------------------|-------------|-----------------|-----------------------|
| boscalid | C2 (다2) | 49.3 | SC | 1,500 | 333.8 |
| isopyrazam | C2 (다2) | 12.57 | EC | 2,000 | 62.9 |
| penthiopyrad | C2 (다2) | 20.0 | EC | 4,000 | 50.0 |
| fluopyram | C2 (다2) | 40.0 | SC | 4,000 | 100.0 |
| fluxapyroxad | C2 (다2) | 15.3 | SC | 4,000 | 38.3 |
| pyraclostrobin | C3 (다3) | 11.0 | SC | 2,000 | 55.0 |
| difenoconazole | G1 (사1) | 10.0 | WG | 2,000 | 50.0 |
| tetraconazole | G1 (사1) | 12.5 | EW | 1,000 | 125.0 |
| prochloraz | G1 (사1) | 50.0 | WP | 2,000 | 250.0 |
| sulfur | M (카) | 35.5 | SC | 500 | 710.0 |
| DBEDC | M (카) | 20.0 | EC | 500 | 400.0 |
| Iminoctadine tri (albesilate) | M (카) | 30.0 | SC | 1,000 | 300.0 |
| *propineb | M (카) | 70.0 | WP | 500 | 1,400.0 |
| chlorothalonil | M (카) | 75.0 | WP | 600 | 1,166.7 |
| dithianon | M (카) | 75.0 | WP | 1,000 | 750.0 |
| metrafenone | B6 (나6) | 25.2 | SC | 2,000 | 126.0 |

개된 오이를 사용하여 살균제의 효과 비교에 사용하였다. 살균제 저항성 검정을 위해서는 떡잎만 전개된 오이를 사용하였다.

실험에 사용한 살균제과 처리 농도

실험에는 boscalid를 비롯한 5종의 다2군 살균제, 다3군에 속하는 pyraclostrobin, difenoconazole을 비롯한 3종의 사1군, sulfur를 비롯한 6종의 카군 살균제와 작용기작이 미분류 되어있는 metrafenone 등 총 16종의 살균제를 사용하여 흰가루병에 대한 방제 효과를 검증하면서, 각 지역의 흰가루병균 집단의 살균제 저항성 발현 여부를 조사하였다 (Table 1). 살균제의 처리 농도는 포장 처리 농도부터 1/5씩 희석하여 사용하였다.

오이 1엽과 떡잎에서 살균제의 효과 비교

온실에서 1엽기까지 재배한 오이와 떡잎만 전개된 오이를 사용하여 흰가루병에 대한 보호 살균제인 sulfur의 효과를 비교하였다. Sulfur는 710 µg/mL와 1/5로 희석한 145 µg/mL의 용액을 준비하여 1엽기 오이의 1엽과 자엽기 오이의 자엽에 충분히 묻도록 경엽 살포하고 온실에서 1일간 풍건하였다. 흰가루병균의 접종은 Huggenberge et al.(1984)의 방법을 사용하였다. 충북 청주시 오송읍(CJOS)의 오이 재배 하우스에서 흰가루병의 발생이 병반면적율로 25-50%인 잎을 채집하여 살균제 저항성 검정을 위한 실험의 접종원으로 사용하였다. 온실에서 재배한 오이 10주당 채집한 오이 잎 한 장에 형성된 포자를 멸균한 붓으로 고르게 털어서 접종

하였다. 접종한 오이는 습실처리하지 않고 온실(온도; 25 – 35°C)에서 보관하며 발병을 유도하였다. 병원균을 접종하고 10일 후에, 접종한 잎의 병 발생을 발병 지수로 조사하여, 발병도를 아래식을 사용하여 계산하였다. 살균제 처리 효과는 살균제 처리구의 발병도를 무처리구의 발병도와 비교하여 계산하였다.

$$\text{발병도 (\%)} = \frac{\sum (\text{발병엽수} \times \text{발병지수})}{4N} \times 100$$

- 0; 발병 무
- 1; 병반면적율 5% 미만
- 2; 병반면적율 5% 이상 – 25% 미만
- 3; 병반면적율 25% 이상 – 50% 미만
- 4; 병반면적율 50% 이상
- N; 조사엽수

오이 떡잎을 이용한 살균제 저항성 모니터링

살균제를 포장 사용 농도와 1/5과 1/25로 희석한 현탁액을 준비하였다. 떡잎이 완전히 전개된 오이 유묘에 준비한 살균제 현탁액을, 병원균을 접종하기 1일 전에 경엽 처리하고, 온실에서 하루 동안 풍건하였다. 살균제 처리 1일 후에 각 지역의 오이 시설하우스에서 채집해 온 병든 오이 잎에 형성된 포자를 위에서 설명한 방법과 동일하게 고르게 털어서 접종하였다. 병원균을 접종하고 10일 후에 병 발생 정도를 발병 지수를 사용하여 조사하였다.

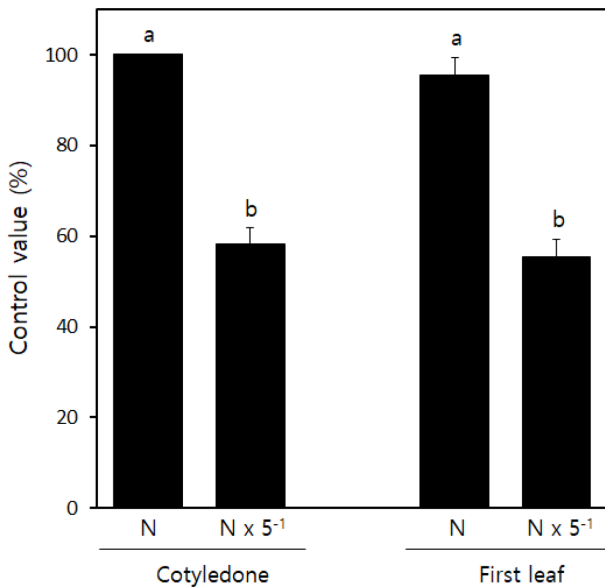


Fig. 2. The control effect of sulfur on the cotyledons and the first leaf of cucumber against cucumber powdery mildew. The inoculum used in this study was conidia formed on the diseased leaves of cucumbers collected from cucumber cultivation polyvinyl greenhouse at Osong of Cheongju. Suspension of sulfur (a.i. 35.5%, SC) was prepared at the recommended dilution fold (N), and 1/5 dilution of the recommended dilution fold ($N \times 5^{-1}$) used in the field, which was treated on cotyledones and 1st leaf of cucumber, respectively.

통계 처리

통계분석은 SPSS 프로그램 (Version 24.0; SPSS Inc., Chicago, USA)을 이용하였으며, 처리 평균간 비교를 위하여 Duncan's multiple range test ($P = 0.05$)를 실시하였다.

결과 및 고찰

오이 1엽과 자엽에서 살균제 효과 검정

포장 사용 농도인 $710 \mu\text{g/mL}$ 의 sulfur는 오이의 떡잎과 1엽에서 흰가루병을 100%와 95.5% 방제하였다(Fig. 2). Sulfur를 $145 \mu\text{g/mL}$ 로 조절하여 처리하였을 때, 떡잎과 1엽에서 흰가루병에 대한 방제 효과는 58.4%와 55.5%로 나타났으며, 통계적인 유의성은 없었다. 보호 살균제인 sulfur의 경우 떡잎과 1엽에서 흰가루병에 대한 방제 효과에 차이가 없었기 때문에 살균제의 효과 검정을 오이의 떡잎에서 실시하기로 하였다. 그런데 접종원으로 사용한 흰가루병균은 단포자 분리를 통해서 얻은 순수배양체가 아니고, 충북 청주시 오송읍의 오이 재배 하우스에서 채집한 흰가루병균의 집단이라고 보는 것이 타당하다. 본 연구의 나머지 실험에서도 각 지역의 시설재배 하우스에서 채집한 병든 잎 위의 병원균을 그대로 털어서 접종하였기 때문에, 각 지역의 병원균 집단에 대한 살균제의 방제 효과를 검정하였다.

세포 호흡을 저해하는 살균제의 오이흰가루병균 집단에 대한 방제 효과

병원균의 숙신산 탈수소효소의 활성을 저해하여 세포 호흡을 억제하는 다2군에 속하는 4종의 살균제(SDHI 살균제)를 선발하여, 6지역의 오이흰가루병균 집단에 대한 병 방제 효과를 검정하였다(Table 2). 청주 분평 지역(CJBP)의 병원균 집단에 대한 방제 효과를 보면 fluxapyroxad가 84.2%의 효과를 보였을 뿐 다른 모든 살균제의 방제 효과는 70% 이하로 저조하였다. 청주 오송 지역(CJOS) 병원균 집단에 대해서는 fluopyram만 흰가루병을 81.8% 방제하였고, 나머지 살균제의 효과는 40% 미만으로 매우 저조하였다. 진천 초평 지역(JCCP)의 병원균 집단에 대해서는 fluopyram과 fluxapyroxad가 70.8%와 75.0%의 효과를 보였을 뿐이었다. 천안 병천 지역은 CABC-1과 CABC-2의 두 곳의 포장에서 병원균을 채집하였는데, 동일한 지역의 포장인데도 불구하고 처리한 살균제의 방제효과는 다르게 나타났다. CABC-1 지역의 병원균 집단에 대해서는 fluopyram이 75.0%의 효과를 보였고, CABC-2의 병원균 집단에 대해서는 fluxapyroxad가 75.0%의 효과를 나타내었을 뿐이었다. 천안 입장 지역(CAIJ)의 병원균 집단에 대해서는 기존 희석배수로 처리한 fluopyram만 87.5%의 효과를 보였고, 나머지 모든 살균제의 처리구에서는 70% 이하의 효과를 보였다. 이처럼 병원균의 탈수소효소 활성을 저해하는 나2군에 속하는 4종의 살균제 중에서 fluopyram만이 6지역의 병원균 집단에 대해서 대체적으로 효과를 보였다. 국내에서 SDHI 살균제 중에서 가장 먼저 등록되어 사용되었던 boscalid는 CABC-2 포장에서 62.5%의 효과를 보였을 뿐, 나머지 지역에서는 25.0% 이하로 매우 저조하였다.

Boscalid는 전 세계적으로 오이흰가루병균인 *Podosphaera xanthii*에 대한 저항성이 최초로 보고된 살균제이다. McGrath와 Wyenandt (2017)는 2009년 New Jersey의 호박 포장에서 boscalid의 방제 효과가 감소하는 흰가루병균 *Podosphaera xanthii*을 보고하였다. Keinath et al. (2018)에 의하면, 오이 떡잎 검정에서 포장에서 채집한 *P. xanthii*는 boscalid의 $682 \mu\text{g/mL}$ 처리구에서 무처리구와 통계적으로 유의성이 없는 높은 발병율을 보였다고 한다. 일본에서는 엽 절편법을 사용하여 2008년과 2009년에 이바라기현의 오이 포장에서 채집한 흰가루병균 34개 집단의 MIC를 조사한 결과, 모두 $50 \mu\text{g/mL}$ 이상이었으며, 20개 집단은 $500 \mu\text{g/mL}$ 의 처리구에서도 자라는 높은 저항성을 보였다(Miyamoto et al., 2010). 반면에 감수성 대조 균주로 사용한 균주는 $5 \mu\text{g/mL}$ 의 boscalid 처리구에서 생장이 완전히 억제되었다. Boscalid 저항성인 흰가루병균은 동일한 작용기작을 갖는 penthiopyrad에 대해서는 교차 저항성 관계를 보였지만, fluopyram과는 교차 저항성 관계를 보이지 않았다(Ishii et al., 2011). 본 실험의 결과에서도 흰가루병균을 채집한 6 지역의 균주 집단에

Table 2. Control value (%) of fungicides inhibiting cellular respiration of the pathogen against cucumber powdery mildew

| Fungicide | Dilution fold | Regions ^{a)} | | | | | |
|----------------|-----------------|-----------------------|------|------|--------|--------|------|
| | | CJBP | CJOS | JCCP | CABC-1 | CABC-2 | CAIJ |
| Boscalid | N ^{b)} | 15. ^{c)} | 18.2 | 0.0 | 25.0 | 62.5 | 0.0 |
| | N/5 | 0.0 | 27.3 | 4.2 | 0.0 | 20.8 | 0.0 |
| | N/25 | 26.3 | 18.2 | 0.0 | 0.0 | 16.7 | 0.0 |
| Penthiopyrad | N | 63.2 | 18.2 | 4.2 | 50.0 | 12.5 | 41.7 |
| | N/5 | 10.6 | 18.2 | 0.0 | 12.5 | 8.3 | 8.3 |
| | N/25 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Fluxapyroxad | N | 84.2 | 18.2 | 75.0 | 25.0 | 75.0 | 0.0 |
| | N/5 | 57.9 | 9.1 | 50.0 | 8.3 | 66.7 | 0.0 |
| | N/25 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 54.2 | 0.0 |
| Fluopyram | N | 63.2 | 81.8 | 70.8 | 75.0 | 54.2 | 87.5 |
| | N/5 | 5.3 | 0.0 | 8.3 | 54.2 | 16.7 | 50.0 |
| | N/25 | 0.0 | 36.4 | 16.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Pyraclostrobin | N | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 12.5 | 25.0 | 8.3 |
| | N/5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | N/25 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

^{a)} Diseased cucumber leaves with powdery mildew were collected in cucumber cultivation greenhouses in six regions. Six regions was as follows. CJBP; Bunpyeong in Cheongju, CJOS; Osong in Cheongju, JCCP; Chopyeong in Jincheon, CABC-1; Byeongcheon 1 in Cheonan, CABC-2; Byeongcheon 2 in Cheonan, and CAIJ; Ipjang in Cheonan.

^{b)} N is the dilution fold of each fungicide recommended for treatment to control powdery mildew in cucumber fields. All fungicides were treated on cucumber cotyledons one day before inoculation with pathogens, and cucumbers treated with fungicides were air-dried in a greenhouse for one day. Pathogens were inoculated by evenly shaking off the spores formed on the collected diseased cucumber leaves.

^{c)} The numbers represent the control value (%) and were calculated using the formula below.

Control value (%) = (1 - (disease severity (%) in fungicide treatment/disease severity (%) in treatment without fungicide) × 100

대해서 penthiopyrad는 boscalid처럼 낮은 효과를 보이지는 않았지만, 모든 집단에서 63.2% 이하의 저조한 효과를 보였다. 하지만 penthiopyrad와 같이 pyrazole-4-carboxamide계 에 속하는 fluxapyroxad는 CJBP, JCCP, CABC-2 지역의 병원균 집단에 대해서는 84.2, 75.0, 75.0%의 효과를 보였다. 포도의 흰가루병에서도 boscalid 저항성균은 30과 100 µg/mL의 boscalid 처리구에서도 생장이 가능하였지만, fluxapyroxad와 fluopyram을 처리함으로써 방제가 가능하였다 (Cherrad et al., 2017). 이런 결과와 같이 본 실험에서도 boscalid에 대해서 저항성인 포장 균주 집단은 penthiopyrad와 교차 저항성 관계가 성립되는 것 같이 보였지만, penthiopyrad와 동일한 계열에 속하는 fluxapyroxad에는 교차 저항성 관계가 낮은 것으로 판단되었다. 하지만 SDHI 살균제간의 교차 저항성 관계가 잿빛곰팡이병균에서는 흰가루병균과 다르게 나타났다. 미국 플로리다의 딸기에서 분리한 잿빛곰팡이병 중 boscalid에 저항성인 균주는 fluopyram과 상관관계가 인정되지 않았지만, penthiopyrad와 fluxapyroxad에 대해서는 높은 상관관계가 인정되었다(Amiri, et al., 2014). 이런 결과는 SDHI 살균제 그룹에 속하는 각각의 살균제가 작용기작이 동일하다고 할지라도 살균제의 화학 구조와 대상 병원균에 따라서 저항성 반응이 다르게 나타날 수 있음을 보여주고 있다(Ishii et al., 2011; Sierotzki and

Scalliet, 2013). 따라서 SDHI 살균제 그룹에서는 검정 결과에서 저항성이 발생한 살균제가 규명되더라도, 다른 SDHI 살균제의 사용이 가능할 수도 있기 때문에, 오이 흰가루병 방제를 위한 사용 가능한 살균제 선별이 신중하여야 한다.

Strobilurin계 살균제는 미토콘드리아 내막에 있는 cytochrome bc1 효소 복합체의 기능을 억제하여 전자의 이동을 방해함으로써 ATP의 합성을 억제하는 살균제로 알려져 있다(Bartlett et al., 2002). 국내에서는 2002년에 kresoxim-methyl과 pyraclostrobin이 2003년에 trifloxystrobin, 그리고 azoxystrobin은 2004년에 합제로 등록되어 사용되었다 (Pesticide Safety Information System, 2023). 그런데 2005년과 2006년에 경기 지역에서 오이흰가루병균을 채집하여 azoxystrobin의 효과를 검정한 결과, 팽택, 오산, 용인, 화성 등지의 흰가루병균에 대해서 1,000 µg/mL 처리구에서조차 병 방제 효과가 거의 나타나지 않았다(Kim et al., 2008). 본 실험에서 사용한 pyraclostrobin 역시 6개 지역의 시설 재배지에서 채집한 흰가루병균 집단에 대한 방제 효과는 거의 없었다(Table 2). Kim et al. (2008)의 결과와 본 실험 결과를 보면, 국내에서 오이 흰가루병 방제를 위한 strobilurin계 살균제의 사용은 적합하지 않을 것으로 판단되며, 사용 전에 병원균에 대한 저항성 검정이 반드시 필요할 것으로 생각한다.

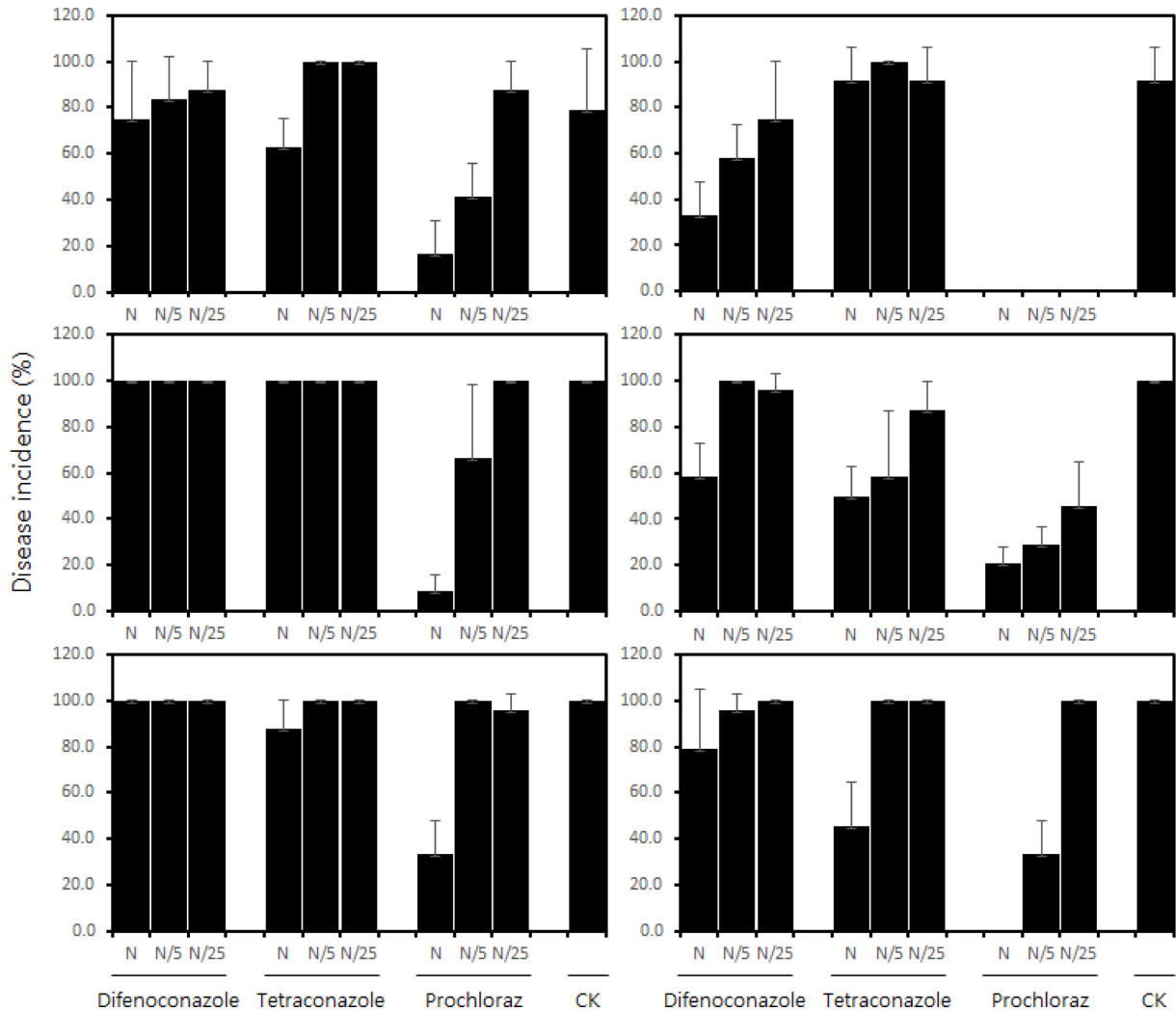


Fig. 3. Disease incidence (%) of each powdery mildew pathogen population at cotyledons of cucumber treated with fungicides inhibiting ergosterol biosynthesis. Diseased cucumber leaves were collected from cucumber cultivation greenhouses in 6 regions, and spores formed on the lesion were used as an inoculum. The areas where diseased cucumbers were collected are as follows; A; Bunpyeong in Cheongju (CJBP), B; Osong in Cheongju (CJOS), C; Chopyeong in Jincheon (JCCP), D; Byeoncheon 1 in Cheonan (CABC-1), E; Byeoncheon 2 in Cheonan (CABC-2), Ipjang in Cheonan (CAIJ).

에르고스테롤 생합성 저해 살균제의 오이흰가루병균 집단에 대한 방제 효과

실험한 6곳의 포장에서 채집한 병원균 집단에 대해서 포장 희석배수로 처리한 difenoconazole 처리구의 효과는 저조하였다. Difenoconazole 처리구에 CJBP, JCCP, CABC-2 포장의 병원균 집단을 접종한 오이 떡잎에서는 흰가루병이 75.0%, 100%, 100% 발생하였다(Fig. 3). CJOS, CABC-1, CAIJ 포장의 병원균 집단을 접종하였을 때는 흰가루병이 33.3%, 58.3%, 79.2% 발생하여, 방제효과가 63.6%, 41.7%, 20.8%로 나타났다. Tetraconazole 역시 포장에서 사용하는 희석배수로 처리하였을 때, CJOS, JCCP, CABC-2 포장의 병원균 집단의 병 발생을 전혀 억제하지 못하고, CJBP, CABC-1, CAIJ 포장의 병원균 집단에 대해서만 21.1%, 50.0%, 54.2%의 방제 효과를 보였다.

에르고스테롤 생합성을 저해하는 살균제에 대한 저항성 발현은 1982년 네델란드와 이스라엘에서 분리한 오이흰가루병균에서 처음 보고되었다(Schepers, 1983). *Sphaerotheca fuliginea* D-17 균주와 Isr-1 균주는 triforine에 대해서 6.0 µg/mL이었던 감수성 균주의 EC₅₀값보다 크게 증가하여 600 µg/mL 이상을 보였다. 에르고스테롤 생합성 저해 살균제에 대한 오이흰가루병균의 저항성은 호주, 미국, 일본, 스페인 등지에서 계속적으로 보고되었고, 포장에서 살균제의 효과도 감소하기 시작하였다(O'Brien et al., 1988; Ohtsuka et al., 1988; López-Ruiz et al., 2010). 국내에서도 경기 지역의 시설 재배지에서 2005년과 2006년에 채집한 흰가루병균에 대한 difenoconazole의 저항성 검정을 실시한 결과, 대부분의 병원균이 중도 저항성을 보였으며, 오산과 평택의 일부 균주는 300 µg/mL의 처리구에서도 자라는 고도 저항성

균주들이 발견되었다(Kim et al., 2008). 본 실험에서 difenoconazole과 tetraconazole의 방제 효과는 CJOS, CABC-1, CAIJ 포장의 병원균에 대해서만 50 - 63.6%의 효과를 보였을 뿐, 나머지 포장의 병원균에 대해서는 매우 낮은 효과를 보여 저항성 발현 정도가 심할 것으로 예상되었다. 하지만 작용기작이 에르고스테롤 생합성 저해로 동일한 prochloraz의 흰가루병 방제 효과는 두 살균제와 다르게 양호하였다. CJOS 포장을 제외한 나머지 CJB, JCCP, CABC-1, CABC-2, CAIJ 포장의 병원균 집단의 오이에서 발병율은 16.7%, 8.3%, 20.8%, 33.3%, 0.0%로, 무처리구 대비 병 방제 효과가 79.0%, 91.7%, 79.2%, 66.7%, 100%로 양호하게 나타났다. Prochloraz가 작용기작이 같은 difenoconazole과 tetraconazole에 대해서 낮은 효과를 보인 병원균 집단에 대해서 양호한 효과를 보이는 것은 교차 저항성이 낮기 때문이라고 생각한다. 오이흰가루병균에 대한 triadimenol, myclobutanil, fenarimol의 교차 저항성을 조사한 결과에서도 triadimenol과 myclobutanil 간에는 높은 교차 저항성 관계가 있었음에도 불구하고, fenarimol과 triadimenol 또는 myclobutanil 간에는 교차 저항성 관계가 없었다. 이런 결과는 살균제의 구조에 유사성이 매우 떨어질 뿐만 아니라, 저항성 발현 기작도 다를 것이라고 예측하였다(López-Ruiz et al., 2010). 그런데 triadimenol 저항성균의 44.4 - 73% 정도가 fenarimol

에 대해서 저항성으로 나타나는 것을 보면, 살균제의 고농도 처리나, 과도한 사용 횟수 등에 의해서 교차 저항성을 보이는 병원균이 출현했을 것으로 판단하였다. 본 연구의 결과에서 보는 것과 같이 충북과 충남의 6지역에서는 prochloraz가 difenoconazole과 tetraconazole과 같이 낮은 방제 효과를 보이지 않고, 여전히 양호한 효과를 보이고 있는 것을 보면, 동일한 작용기작을 가지고 있지만 화학적인 구조의 유사성이 없는 살균제 간에는 교차 저항성 관계가 성립되지 않고, 여전히 흰가루병의 방제에 효율적으로 사용될 수 있음을 보여주고 있었다.

보호 살균제의 오이흰가루병균 집단에 대한 방제 효과

Sulfur는 JCCP의 병원균 집단에 대해서만 방제 효과가 58.3%로 낮았고, CJB, 병원균 집단에 대해서는 79.0%, 그리고 나머지 4개 지역의 병원균 집단에 대해서는 90% 이상의 우수한 효과를 보였다(Table 3).

특히 CABC-2와 CAIJ의 병원균에 대해서는 기존의 희석 배수를 1/5로 희석하여 경엽 살포한 처리구에서조차 83.3%의 효과를 보였다. Iminoctadine tris-albesilate도 CJOS과 JCCP의 병원균 집단에 대해서 72.7%와 79.2%의 효과를 보였고 나머지 모든 지역의 병원균 집단에 대해서는 84.2~100.0%의 효과를 보였다. 특히 1/5로 희석하여 처리하여도

Table 3. Control value (%) of protective fungicides against cucumber powdery mildew

| Fungicides | Dilution fold | Regions ^{a)} | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | | CJB | CJOS | JCCP | CABC-1 | CABC-2 | CAIJ |
| Sulfur | N ^{b)} | 79.0 | 100.0 | 58.3 | 91.7 | 100.0 | 100.0 |
| | 1/5 N | 0.0 | 72.7 | 0.0 | 66.7 | 83.3 | 83.3 |
| | 1/25 N | 21.1 | 36.4 | 0.0 | 16.7 | 8.3 | 4.2 |
| DBEDC | N | 79.0 | 27.3 | 41.7 | 4.2 | 45.8 | 16.7 |
| | 1/5 N | 0.0 | 18.2 | 4.2 | 4.2 | 8.3 | 4.2 |
| | 1/25 N | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Iminoctadine tris-albesilate | N | 84.2 | 72.7 | 79.2 | 95.8 | 95.8 | 100.0 |
| | 1/5 N | 68.4 | 72.7 | 0.0 | 75.0 | 70.8 | 37.5 |
| | 1/25 N | 57.9 | 0.0 | 4.2 | 70.8 | 58.3 | 0.0 |
| Propineb | N | 94.7 | - | 100.0 | 75.0 | 91.7 | 70.8 |
| | 1/5 N | 5.3 | - | 25.0 | 41.7 | 29.2 | 8.3 |
| | 1/25 N | 0.0 | - | 0.0 | 4.2 | 8.3 | 0.0 |
| Chlorothalonil | N | 10.6 | - | 33.3 | 33.3 | 29.2 | 0.0 |
| | 1/5 N | 0.0 | - | 0.0 | 4.2 | 12.5 | 0.0 |
| | 1/25 N | 31.6 | - | 0.0 | 8.3 | 8.3 | 0.0 |
| Dithianon | N | 0.0 | - | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.2 |
| | 1/5 N | 0.0 | - | 0.0 | 8.3 | 0.0 | 4.2 |
| | 1/25 N | 0.0 | - | 0.0 | 0.0 | 8.3 | 8.3 |

^{a)} The abbreviations for the region are as follows. CJB, Bunpyeong of Cheongju, CJOS, Osong of Cheongju, JCCP, Chopyeong of Jincheon, CABC-1; Byeongcheon 1 of Cheonan, CABC-2; Byeongcheon 2 of Cheonan, CAIJ, Ipyeong of Cheonan.

^{b)} N is the dilution fold of each fungicide treated in the cucumber field.

CJBP를 비롯한 CJOS, CABC-1, CABC-2 등 4개 지역의 병원균 집단에 대해서 68.4%에서 75.0% 사이의 방제 효과를 보였다. 하지만 DBEDC는 CJBP 포장의 병원균에만 79.0%의 효과를 보였을 뿐, 다른 지역의 병원균 집단에 대해서는 방제 효과가 저조하였다. 본 실험에 사용한 6종의 보호 살균제 중에서 propineb, chlorothalonil, dithianon은 오이 흰가루병의 방제용 살균제로 등록되어 있지 않다. 하지만, 흰가루병균에 대해서 특이적인 작용점을 갖는 치료 살균제의 방제 효과가 너무 낮아서, 효과가 양호한 보호 살균제를 선발하고자 본 실험에 사용하였다. Chlorothalonil과 dithianon은 오이 흰가루병에 대한 방제 효과가 전혀 없었다. Propineb는 실험을 수행하지 않은 CJOS 포장의 병원균 집단을 제외한 나머지 5개 지역의 병원균 집단에 대해서 70.8 - 100%의 우수한 효과를 보였다. 하지만 1/5로 희석하여 처리할 경우에는 방제 효과가 50% 이하로 감소하였다.

본 실험의 결과 예방적으로 처리하는 보호 살균제는 작용점이 특이한 호흡 저해 살균제와 에르고스테롤 생합성 저해 살균제에 비해서 흰가루병에 대한 방제 효과가 우수하였다. 하지만 동일한 보호 살균제이지만 흰가루병에 대한 방제 효과가 나타나지 않는 살균제도 있기 때문에 살균제 선발 시에 주의를 기울여야 한다. 또한 포장 희석 배수로 처리한 처리구에서 병 방제 효과가 우수하더라도 대부분의 살균제가 1/5로 희석하여 처리한 경우, 효과가 큰 폭으로 감소하는 경향이 있기 때문에, 추천하는 포장 사용 농도를 준용하여 처리하는 것이 중요하다.

Metrafenone의 방제 효과

최근 세포골격 단백질에 작용하는 것으로 알려진 metrafenone은 포장 사용 농도인 126 µg/mL로 처리하였을 때, 천안 병천 지역의 두 포장(CABC-1과 CABC-2)에서만 각각 79.2%와 66.7%의 효과를 보였고, 나머지 포장의 병원균 집단에 대해서는 전혀 병 방제 효과가 나타나지 않았다(Fig. 4). 하지만 CABC-1과 CABC-2 포장의 병원균 집단에 대해서는 25.2와 5.04 µg/mL로 희석하여 처리하였음에도 불구하고 75.0과 70.8%, 그리고 66.7과 66.7%의 효과가 유지되었다.

Metrafenone은 세포골격을 이루는 액틴이나 미오신의 기능을 억제하는 매우 특이적인 살균제로서 흰가루병의 방제에 사용 되어왔다. 하지만 2009년과 2010년에 이탈리아의 밀과 포도 흰가루병에서 각각 저항성 발현되었다(Kunova et al., 2016). 충북과 충남의 6개 지역에서도 채집한 흰가루병균 집단에 대해서 2지역에 대해서는 방제 효과를 얻을 수 있었지만, 나머지 지역에서는 전혀 효과가 없었기 때문에, 특정 지역에 국한하여 사용이 가능할 것으로 생각하였다.

본 연구의 결과에 의하면 충북과 충남의 오이 재배 지역에서 보호 살균제를 제외한 대부분의 살균제에 대한 흰가루

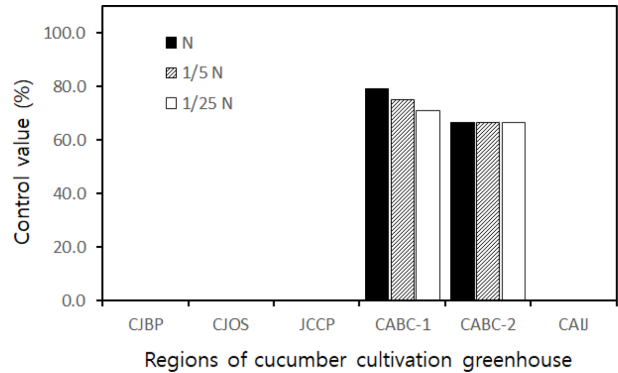


Fig. 4. Control effect of metrafenone on each pathogen population of powdery mildew at each region. The abbreviations for the region are as follows. CJBP; Bunpyeong of Cheongju, CJOS; Osong of Cheongju, JCCP; Chopyeong of Jincheon, CABC-1; Byeongcheon 1 of Cheonan, CABC-2; Byeongcheon 2 of Cheonan, CAI; Ipyang of Cheonan.

병균의 저항성 발현이 매우 심각한 상태이었다. 특히 특이적인 작용점을 갖는 치료 살균제의 효과가 매우 저조한 것을 보면, 중요한 그룹의 살균제에 대한 저항성 발현이 매우 높은 것으로 보인다. 하지만 보호 살균제의 효과가 여전히 지속되고 있기 때문에, 시설 재배지에서 오이 흰가루병의 방제는 보호 살균제 위주로 실시되어야 할 것으로 생각한다.

감사의 글

이 논문(연구실적물)은 2022학년도 충북대학교 연구년제 지원에 의하여 연구되었습니다.

Author Information and Contributions

Heung Tae Kim, Department of Plant Medicine, College of Agriculture, Life and Environment Science, Chungbuk National University, Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7132-0587>

Sunhong Min, Department of Plant Medicine, College of Agriculture, Life and Environment Science, Chungbuk National University, PhD. student

Establishment of experimental plan and methodology proposal, Heung Tae Kim

Experimental participation, Sunhong Min

Writing, Heung Tae Kim

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature cited

- Amiri A, Heath SM, Peres NA, 2014. Resistance to fluopyram, fluxapyroxad, and penthiopyrad in *Botrytis cinerea* from strawberry. *Plant Dis.* 98(4):532-539.
- Bartlett DW, Clough JM, Godwin JR, Hall AA, Hamer M, et al., 2002. The strobilurin fungicides. *Pest Manag. Sci.* 58(7): 649-662.
- Cherrad S, Hernandez C, Vacher S, Steva H, 2017. First Detection of boscalid-resistant strains of *Erysiphe necator* in French vineyards: biological and molecular characterization. pp. 211-216. In: Deising HB, Fraaije B, Mehl A, Oerke EC, Sierotzki H, Stammler G (Eds). *Modern fungicides and antifungal compounds* (volume 8). Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany.
- Cohen R, Burger Y, Katzir N, 2004. Monitoring physiological races of *Podosphaera xanthii* (syn. *Sphaerotheca fuliginea*), the causal agent of powdery mildew in cucurbits: factors affecting race identification and the importance for research and commerce. *Phytoparasitica* 32(2):174-183.
- Huggenberge, F, Collins, MA, Skylakaki, G, 1984. Decreased sensitivity of *Sphaerotheca fuliginea* to fenarimol and other ergosterol-biosynthesis inhibitors. *Crop Prot.* 3(2):137-149.
- Ishii H, Miyamoto T, Ushio S, Kakishima M, 2011. Lack of cross-resistance to a novel succinate dehydrogenase inhibitor, fluopyram, in highly boscalid-resistant isolates of *Corynespora cassiicola* and *Podosphaera xanthii*. *Pest. Manag. Sci.* 67(4):474-482.
- Keinath AP, Rennberger G, Kousik CS, 2018. First report of resistance to boscalid in *Podosphaera xanthii*, cucurbit powdery mildew, in South Carolina. *Plant Health Prog.* 19(3):220-221.
- Kim JY, Hong SS, Lim JW, Park KY, Kim HG, 2008. Screening of fungicide resistance of cucumber powdery mildew pathogen, *Sphaerotheca fusca* in Gyeonggi Province. *Res. Plant Dis.* 14(2):95-101.
- Korean Society of Plant Pathology, 2023. List of plant disease in Korea, 2023. <https://genebank.rda.go.kr/recentPlntDissInfoList.do> (Accessed Oct. 10. 2023).
- Korean Statistical Information Service, 2023. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0027&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=K1_19&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIn dex.do (Accessed Oct. 10. 2023).
- Křístková E, Lebeda A, Sedláková B, 2009. Species spectra, distribution and host range of cucurbit powdery mildews in the Czech Republic, and in some other European and Middle Eastern countries. *Phytoparasitica*, 37(4):337-350.
- Kunova A, Pizzatti C, Bonaldi M, Cortesi P, 2016. Metrafenone resistance in a population of *Erysiphe necator* in northern Italy. *Pest Manag. Sci.* 72(2):398-404.
- López-Ruiz FJ, Pérez-García A, Fernández-Ortuño D, Romero D, García E, et al., 2010. Sensitivities to DMI fungicides in populations of *Podosphaera fusca* in south central Spain. *Pest Manag. Sci.* 66(7):801-808.
- McCreight DJ, 2006. Melon-powdery mildew interactions reveal variation in melon cultivars and *Podosphaera xanthii* races 1 and 2. *J. Amer. Soc. Hortic. Sci.*, 131(1):59-65.
- McGrath MT, 2001. Fungicide resistance in cucurbit powdery mildew: experiences and challenges. *Plant Dis.* 85(3):236-245.
- McGrath MT, Wyenandt CA, 2017. First detection of boscalid resistance in *Podosphaera xanthii* in the United States associated with failure to control cucurbit powdery mildew in New York and New Jersey in 2009. *Plant Health Prog.* 18(2):93.
- Miyamoto T, Ishii H, Tomita Y, 2010. Occurrence of boscalid resistance in cucumber powdery mildew in Japan and molecular characterization of the iron-sulfur protein of succinate dehydrogenase of the causal fungus. *J. Gen. Plant Pathol.* 76(4):261-267.
- O'Brien RG, Vawdrey LL, Glass RJ, 1988. Fungicide resistance in cucurbit powdery mildew (*Sphaerotheca fuliginea*) and its effect on field control. *Aust. J. Exp. Agric.* 28(3):417-423.
- Ohtsuka N, Sou K, Amano T, Ojima M, Nakazawa Y, et al., 1988. Decreased sensitivity of cucumber powdery mildew (*Sphaerotheca fuliginea*) to ergosterol biosynthesis inhibitors. *Jpn. J. Phytopathol.* 54(5):629-632.
- Pesticide Safety Information System, 2023. <https://psis.rda.go.kr/psis/agc/res/agchmRegistStusLst.ps?menuId=PS00263> (Accessed Oct. 10. 2023).
- Schepers HTAM, 1983. Decreased sensitivity of *Sphaerotheca fuliginea* to fungicides which inhibit ergosterol biosynthesis. *Neth. J. Plant Pathol.* 89(1):185-187.
- Sierotzki H, Scalliet G, 2013. A review of current knowledge of resistance aspects for the next-generation succinate dehydrogenase inhibitor fungicides. *Phytopathology* 103(9):880-887.
- Vielba-Fernández, A, Polonio A, Ruiz-Jiménez L, de Vicente A, Pérez-García A, et al., 2020. Fungicide resistance in powdery mildew fungi. *Microorganisms* 8(9):1431 DOI 10.3390/microorganisms8091431.

충북과 충남 오이 재배지에서 채집한 오이흰가루병균 집단의 살균제 저항성 검정

민순홍 · 김흥태*

충북대학교 농업생명환경대학 식물의학과

요 약 충북과 충남의 시설 재배지 6곳에서 채집한 오이흰가루병균에 대한 살균제 저항성 검정을 온실에서 재배한 오이 유묘의 떡잎에서 실시하였다. 살균제 그룹 다2군에 속하는 숙신산탈수소효소 활성 저해 살균제(SDHI fungicide)인 boscalid와 penthiopyrad는 6지역에서 채집한 모든 흰가루병균에 대해서 70% 미만의 방제 효과를 보였다. Fluxapyroxad는 CJPB, JCCP, CABC-2 지역의 흰가루병균에 대해서는 70% 이상의 효과를 보인 반면에, CIOS, CABC-1, CAIJ 지역의 병원균에 대한 방제 효과는 매우 저조하였다. Fluopyram은 CJPB와 CABC-2 지역의 흰가루병균에 대해서 각각 63.2%와 54.2%의 효과를 보였고 나머지 포장의 병원균에 대해서는 70% 이상의 양호한 효과를 보였다. 다3군에 속하는 strobilurin계 살균제인 pyraclostrobin의 효과는 거의 나타나지 않았다. 사1군에 속하는 에르고스테롤 생합성 저해 살균제 중에서 difenoconazole과 tetraconazole의 방제 효과는 매우 저조하였으며, prochloraz는 5개 포장의 병원균에 대해서 66.7%에서 100% 사이의 우수한 효과를 보였다. 보호 살균제 중에서는 sulfur, iminoctadine, propineb 등이 대부분 지역의 병원균에 대해서 방제 효과가 우수하였다. 본 연구에서 보는 것과 같이 숙신산탈수소 효소의 활성 저해 살균제(다2군)인 boscalid, penthiopyrad, fluxapyroxad, strobilurin계 살균제(다3군)인 pyraclostrobin, ergosterol 생합성 저해 살균제(사1군)인 difenoconazole, tetraconazole에 대한 오이흰가루병균의 저항성 정도는 심각하였다. 하지만 sulfur, iminoctadine tris-albesilate, propineb 등의 흰가루병균에 대한 방제 효과는 여전히 우수하였다. 따라서 오이 재배지에서 흰가루병을 방제하기 위해서는 보호 살균제 중심의 처리 체계를 도입해야 할 것으로 생각한다.

색인어 오이 흰가루병, *Podosphaera xantii*, 살균제 저항성, 보호 살균제