



ORIGINAL ARTICLES

다병해 모델 기반 후보 미생물의 방제효능 평가 및
범용 미생물제제 개발을 위한 우수 균주 선발한건영¹ · 오영아² · 이동률² · 강창순² · 이용복¹ · 곽연식^{1*}¹경상국립대학교 생명과학연구원, ²남해화학㈜Selection of Microbial Strains to Develop Broad-Spectrum
Biocontrol Formulations to Treat Plant DiseasesGun Young Han¹, Young A Oh², Dong Ryul Lee², Changsoon Kang², Yong Bok Lee¹, and Youn-Sig Kwak^{1*}¹Research Institute Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea 52828²R&D Center, Namhae Chemical Corp., Yeosu, Korea 59618

(Received on January 5, 2026. Revised on February 6, 2026. Accepted on February 7, 2026)

Abstract There is a growing need to reduce the reliance on chemical pesticides by developing microbial products that can be widely applied with reproducible efficacy to treat multiple plant diseases. The objective of our study was to screen candidate microbial antagonists for different plant diseases and identify widely effective candidates to develop a broad-spectrum biocontrol formulation. We assessed seven candidate strains against five representative pathosystems: tomato Fusarium wilt, pepper damping-off, pepper Phytophthora seedling blight, pepper anthracnose, and rice sheath blight. In tomato Fusarium wilt, strain H1 displayed the strongest suppression with the disease index (DI) ≤ 1 . H2 and R7 provided moderate control (DI 1.2 and 3, respectively), while H3, H4, R5, and R6 were ineffective against tomato Fusarium wilt. In pepper damping-off, treatment effects in early infection stages were highly variable as H1, R5, and R6 exhibited low mean DI (≤ 1) that did not achieve statistical significance. Treatment effects varied widely in pepper seedling blight, with R5 showing reduced disease tendency. H1, H2, and R7 completely prevented the symptoms of pepper anthracnose, while H1, R5, and R7 markedly reduced rice sheath blight severity. Overall, H1 emerged as the most promising broad-spectrum candidate. Further research should focus on application optimization, mechanistic validation (rhizosphere colonization and induced resistance), and robustness verification across diverse pathogen isolates and growth conditions.

Key words: Antagonistic microbial strains, Biological control, Broad-spectrum efficacy, Microbial biopesticide

서 론

작물 생산에서 병해는 수량과 품질을 동시에 저하시켜 경제적 손실을 유발하는 핵심 제한요인이다. 특히 진균성 병원균과 난균류, 그리고 수확물(과실) 병원균은 재배 환경에서의 생존력과 전염 효율이 높아, 화학적 방제에 의존하더라도 병 발생을 억제하기 어렵고 재발 위험이 크다. *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*에 의한 토마토 시들

음병(Fusarium wilt)은 대표적인 토양전염성 관다발병으로, 병원균의 토양 내 잔존, 증식 및 기주 침입 이후 도관부 정착을 통해 장기간 피해를 유발하는 난방제 병해로 알려져 있다(Fravel et al., 2003; Alabouvette et al., 2009). 이러한 특성 때문에 단일 약제 또는 단기 처치만으로는 병원균 밀도 저감과 발병 억제를 안정적으로 달성하기 어렵고, 윤작, 태양열 소독, 토양개량 등 다양한 관리 전략을 병행하더라도 발병 억제의 재현성 확보에는 한계가 존재한다(Alabouvette et al., 2009).

고추 재배에서 문제되는 역병균(*Phytophthora capsici*)은 종자 발아 단계에서 모잘록병을 유발할 뿐 아니라, 유묘기

*Corresponding author
E-mail: kwak@gnu.ac.kr

이후에는 뿌리, 관부 및 지상부 위조 증상의 역병으로 급격한 피해를 야기한다. *P. capsici*는 다양한 기주 범위를 갖고 토양 및 물을 매개로 전염이 용이하며, 환경 조건(수분, 온도)과 병원균의 밀도에 따라 발병 편차가 큰 병원체로 보고되어 방제전략 수립과 관리가 특히 어렵다(Granke et al., 2012). 한편 고추 탄저병은 *Colletotrichum* 속의 복합적 종(species complex) 구성과 병원성 분화가 다양하여, 병원균 종/계통에 따른 작물의 감수성 차이가 방제 성패에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다(Than et al., 2008; Mongkolporn and Taylor, 2018). *Rhizoctonia solani*에 의해 발생하는 벼 잎집무늬마름병(Sheath blight)은 전 세계적으로 중요한 벼 병해 중 하나로, 저항성 품종의 제한과 환경 의존적 발병 특성으로 인해 지속가능한 방제기술의 우선순위가 높게 요구되고 있다(Singh et al., 2019). 이와 같은 병해는 공통적으로 (i) 토양 또는 재배환경에서의 생존과 전염력이 높고, (ii) 병원체의 유전적 다양성 또는 생리적 가변성이 크며, (iii) 재배 환경 조건에 따라 발병도가 크게 달라지는 특성을 갖는다. 따라서 화학농약 중심의 방제체계는 약제 저항성 문제, 잔류, 환경 부담, 처리 시기 및 횟수 증가에 따른 비용 상승 등 현실적 제약에 직면할 수 있다. 이를 보완하는 대안 기술로 미생물 기반의 생물학적 방제(biological control)에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다(Hansel et al., 2024). 그러나 미생물 방제의 가장 큰 병목은 효능의 변동성이다. 동일 균주라도 접종밀도, 온도, 습도, 토양 미생물 군집, 식물 생육단계, 처리 방법(종자 처리, 관주, 엽면 살포) 등에 의해 방제 효율이 크게 달라질 수 있으며, 이 때문에 온실에서의 유효성이 곧바로 현장 성능으로 연결되지 않는 사례가 반복적으로 보고되었다(Yu et al., 2017). 특히 다병해 대응 범용 제제를 목표로 할 경우, 특정 병원체에 대한 최대 효능보다 다양한 병원체와 조건에서의 안정적 최소 효능과 재현성이 선발 기준으로 더 중요해진다(Yu et al., 2017). 이러한 맥락에서, 서로 다른 병원체 생태(토양 전염성, 관다발 병원균, 난균류, 과실 병해, 엽초부 병해)를 대표하는 병해 모델을 동시에 적용한 다중 스크리닝은 범용 후보 미생물의 선발에 유리한 접근이 될 수 있다.

국내에서도 미생물 제제의 동시 방제 또는 다병해 적용 가능성을 뒷받침하는 연구가 보고되어 왔다. 예를 들어 *Bacillus subtilis* 기반 균주가 고추 역병과 탄저병을 동시 억제할 수 있다는 결과가 제시되었고(Lee et al., 2011), *B. amyloliquefaciens*와 식물추출물 혼합 제형이 토마토 시들음병, 고추 탄저병, 벼 잎집무늬마름병 등 다수 병해에 대한 실험실 수준의 동시 방제 가능성을 보고한 바 있다(Kang et al., 2019). 이러한 선행 연구들은 단일 작물-단일 병해를 넘어, 농가 현장에서 동시에 문제되는 병해군을 포괄적으로 다루는 미생물 제제 개발 전략의 타당성을 시사한다.

본 연구는 토마토 시들음병, 고추 모잘록병, 고추 역병, 고추 탄저병, 벼 잎집무늬마름병 등 서로 다른 병원체군과

감염 생태를 대표하는 다섯 병해 모델을 대상으로, 후보 미생물 균주들의 방제 효능을 동일한 평가 체계에서 비교 및 검증하였다. 이를 통해 (i) 특정 병해에 대해 강력한 억제력을 보이는 후보뿐 아니라, (ii) 병해군 전반에 걸쳐 재현 가능한 방제 경향을 나타내는 범용 후보 미생물을 선발하고, (iii) 향후 제제화 및 현장 적용성 평가로 확장 가능한 기초 자료를 확보하고자 하였다. 본 연구는 다양한 식물병에 범용으로 적용 가능한 미생물 제제 개발을 위한 선발 및 검증 프레임 제시하고, 다병해 환경에서의 실용적 방제 미생물 후보를 도출하는 것을 목표로 한다.

재료 및 방법

평가 후보 미생물 균주

본 연구에서 다양한 식물병 억제력을 평가한 균주는 총 7가지로 선행 연구에서 균주의 능력을 미생물학적 측면에서 지식재산권이 확보되어 있는 균주들이다. 기업과의 비밀유지 계약에 의해 원 균주명을 공개하지 않으며 H1, H2, H3, H4, R5, R6, R7으로 명명하여 수행하였다. 각 균주의 분류 동정은 H1(*Streptomyces* sp.), H2(*Bacillus* sp.), H3(*Bacillus aryabhattai*), H4(*Bacillus* sp.), R5(*Bacillus velezensis*), R6(*Bacillus* sp.), R7(*Bacillus velezensis*)이며, 1/5 PDK(Potato Dextrose Petone: 2 g potato dextrose broth, 2 g peptone, 20 g agar per L) 또는 1/5 TSA(Tryptic Soy Agar: 6 g tryptic soy broth, 20 g agar per L)에서 배양하였다.

토마토 시들음병에 대한 방제 시험

토마토(품종: 더하드, 농우바이오) 씨앗을 원예용상토(상토2호, 부농)에 파종 후 본엽이 4장이 되었을 때 후보 미생물을 배양하여 1×10^6 cfu/ml 농도로 7일 간격으로 3회 토양에 처리하였다. 병원균(*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*)은 첫 번째 미생물 처리 3일 후 병원균 포자를 1×10^5 cfu/ml 농도로 처리하였다. 각 처리구당 7개의 식물체를 사용하였다. 처리 3주 후 발병도(disease index, DI) 값(Fig. 1A)에 따라 DI를 측정하고, 조사하여 비교하였다.

고추 모잘록병에 대한 방제 시험

미생물을 처리했을 때 고추 종자(품종 왕조, 농우바이오) 발아 및 초기 생육 단계에서 고추 모잘록병 방제 효과를 알아보기 위하여 고추 종자를 원예용 상토에 파종한 후 실험에 사용하였다. 후보 미생물을 배양하여 1×10^6 cfu/ml 농도로 멸균수에 희석하여 처리하고 2시간 후 고추역병균(*Phytophthora capsici*) 유주자를 1×10^5 zoospores/ml 농도로 처리한 후 식물생장상에 보관하였다. 각 처리구당 16개의 식물체를 사용하였다. 7일 후 후보 미생물을 1회 추가 처리하고 2일 후 고추의 발아 및 생육을 조사하였다(Fig. 2A).

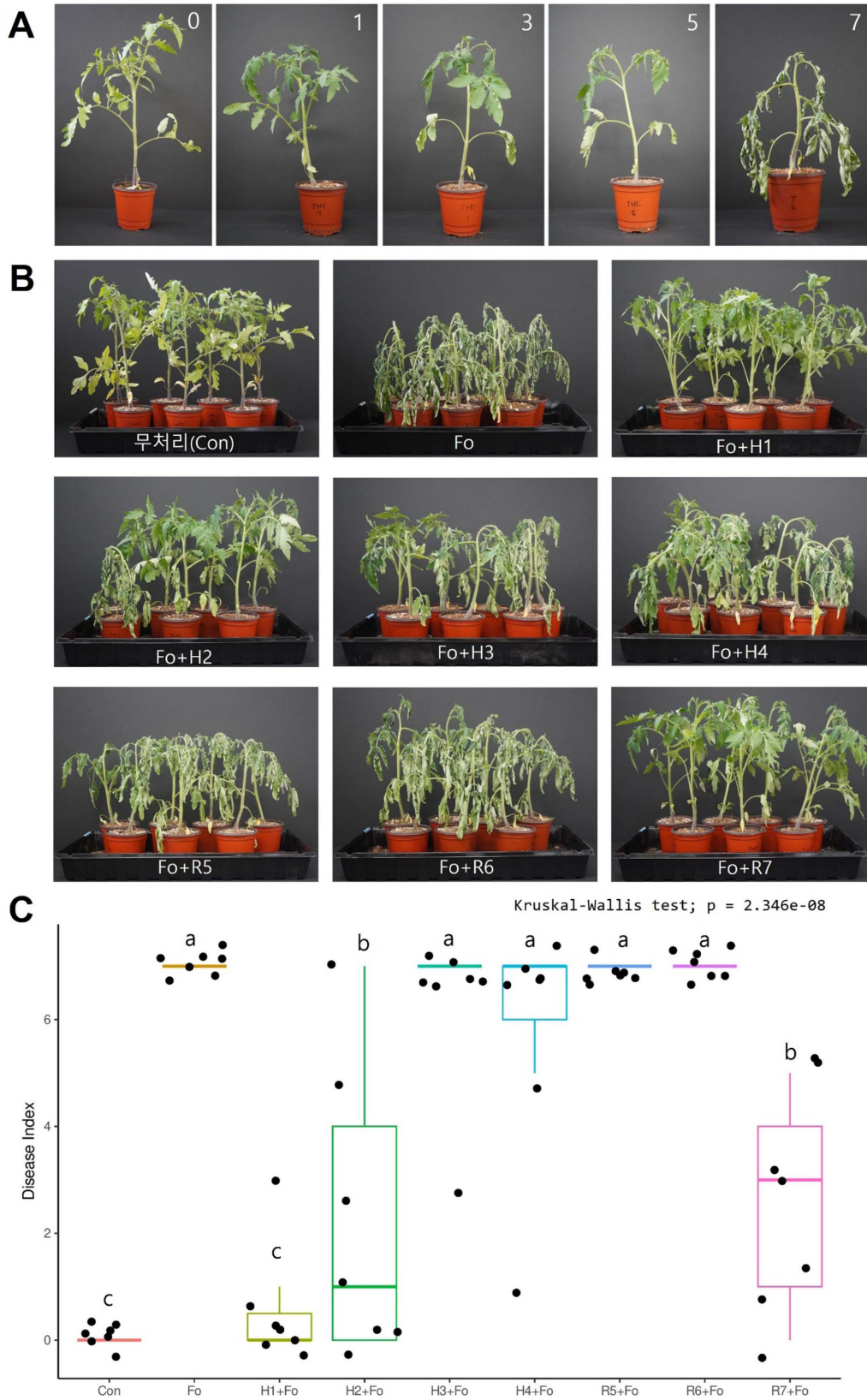


Fig. 1. Experimental scheme for evaluating candidate microorganisms against tomato *Fusarium* wilt in tomato cv. 'The Hard'. Candidate strains (1×10^6 cfu/mL) were soil-drenched three times at 7-day intervals. Three days after the first microbial application, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (1×10^5 cfu/mL) was inoculated. Disease index (DI) was assessed 3 weeks after pathogen inoculation ($n = 7$ plants per treatment). **A:** Disease index value, **B:** representative disease symptoms, **C:** Evaluation of disease.

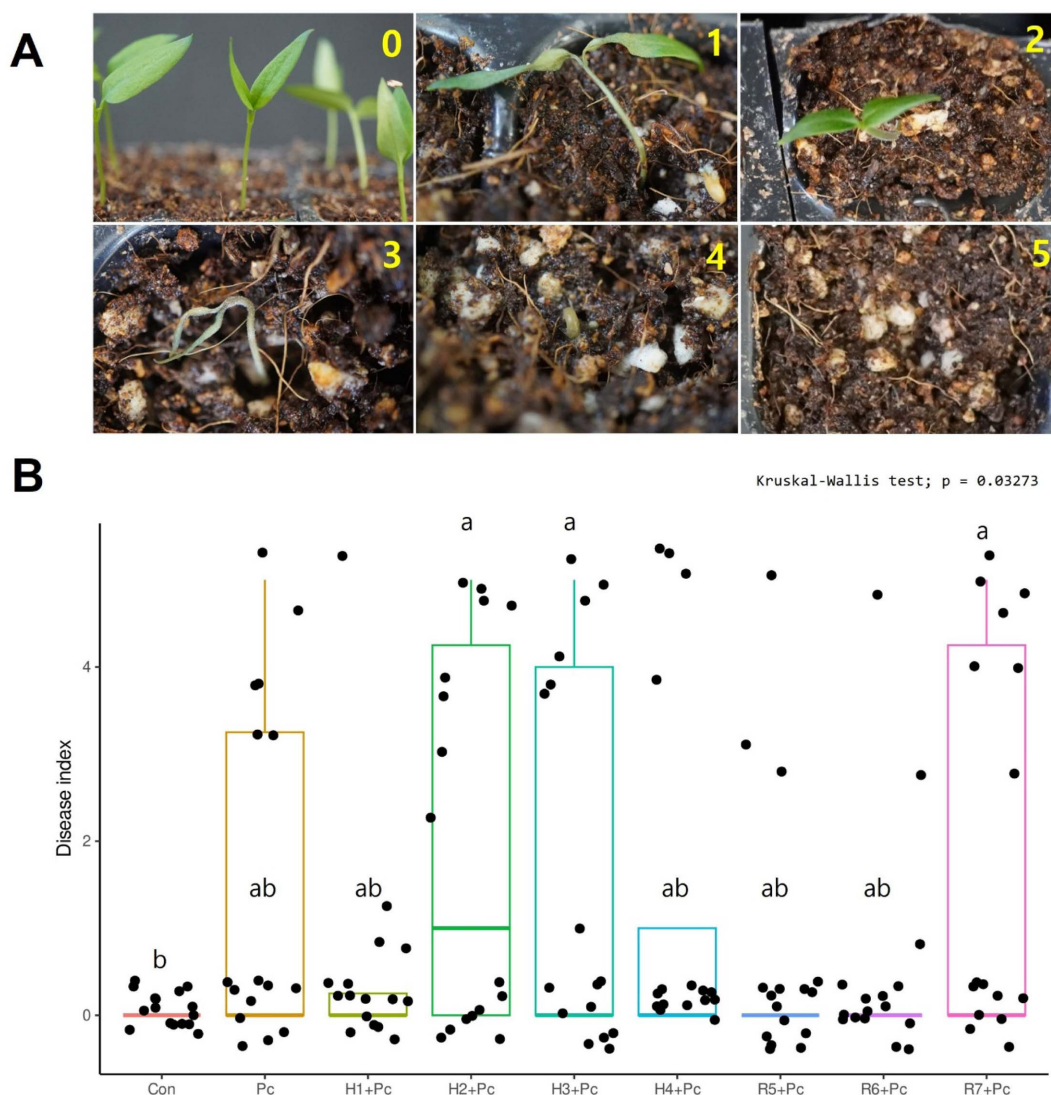


Fig. 2. Experimental scheme for assessing suppression of damping-off disease at the germination stage in pepper cv. 'Wangjo'. Candidate strains (1×10^6 cfu/mL) were applied to seeds/soil, and *Phytophthora capsici* (KACC 40481) zoospores (1×10^5 zoospores/mL) were inoculated 2 h later. A second microbial application was performed 7 days after inoculation, and germination and early seedling growth were evaluated 2 days later. **A:** disease index, **B:** Evaluation of disease index.

고추 역병에 대한 방제 시험

미생물의 고추 역병에 대한 방제효과를 알아보기 위하여 고추 종자를 파종하여 발아시킨 후 본엽이 2장 된 유묘를 지름 9 cm 플라스틱 pot에 옮겨 실험을 진행하였다. 후보 미생물은 배양 후 1×10^6 cfu/ml 농도로 멸균수에 희석하여 7일 간격으로 3회 토양에 처리하였다. 고추 역병원(*P. capsici*)은 V8(200 mL V8 juice, 2 g CaCO_3 , 20 g agar per L) 배지에 계대배양 한 후 27°C 항온기에 7일간 보관 후 고추역병원균이 자란 petri dish에 멸균수를 넣어 20°C, 24시간 빛 조건으로 설정한 항온기에 3일간 보관하였다. 현미경 상에서 유주자낭이 형성된 것을 확인하고 병원균 처리일에 4°C에 보관된 차가운 멸균수를 넣어 유주자낭에서 유주자를 유출시켜 1×10^5 zoospores/ml 농도로 처리하였다(Huitema et

al., 2011). 각 처리구당 9개의 식물체를 사용하였다. 발병도 (disease index, DI)는 0: 병징없음, 1: 25% 잎 황화, 3: 75% 잎 황화 및 탈락, 4: 전체 잎 황화 및 시들, 5: 줄기 마름 및 괴사를 기준으로 설정하였다. 병원균 처리 3주 후 발병도를 조사하여 비교하였다(Fig. 3A).

고추 탄저병에 대한 방제 시험

무균대 내에서 고추 열매를 70% 에탄올로 닦은 후 건조하고 멸균된 주사 바늘을 이용하여 상처를 내었다. 배양된 후보 미생물을 1×10^6 cfu/ml 농도로 멸균수에 희석하여 10 μL dotting 한 후 무균대 내에서 건조하였다. 투입된 후보 미생물이 건조된 후 탄저병원균(*Colletotrichum gloeosporioides*) 포자를 1×10^6 spores/ml 농도로 10 μL 접종하였다. 습도

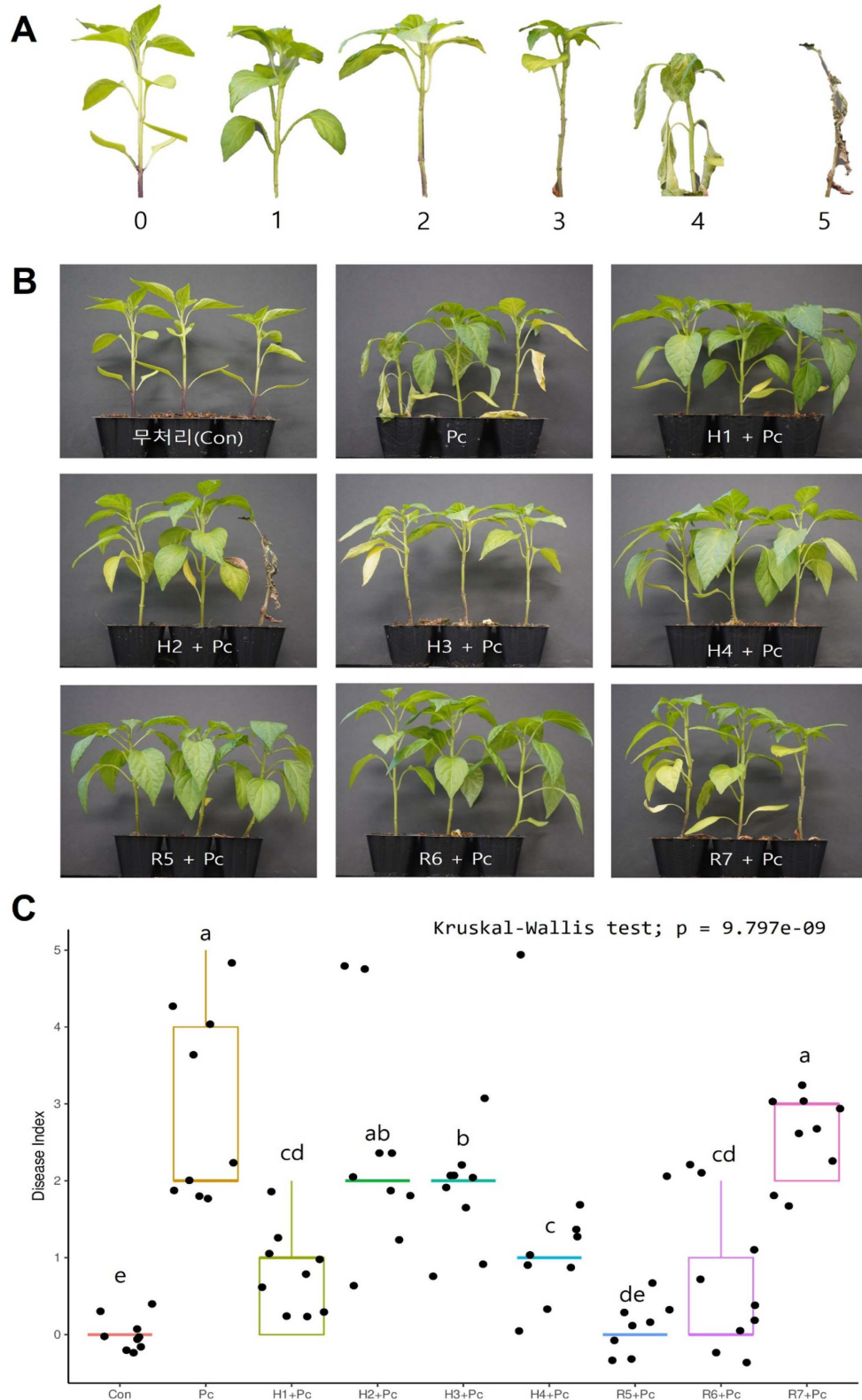


Fig. 3. Experimental scheme for evaluating candidate microorganisms against *Phytophthora* blight in pepper seedlings (two true-leaf stage). Candidate strains (1×10^6 cfu/mL) were soil-drenched three times at 7-day intervals. *P. capsici* (KACC 40481) zoospores were prepared and inoculated at 1×10^5 zoospores/mL. Disease index (DI) was recorded 3 weeks after pathogen inoculation. **A:** Disease index value, **B:** representative disease symptoms, **C:** Evaluation of disease occurrence.

유지를 위하여 밀폐용기 바닥에 멸균수에 적신 페이퍼 타월을 깔고 펄트리 디쉬를 올린 후 접종한 고추를 치상 하였다. 각 처리구당 12개의 식물체를 사용하였다. 밀폐용기를 닫고 25°C 항온기에 7일간 보관 후 병반이 나타나면 밀폐용기를 연 상태로 3일간 보관한 후 평가를 진행하였다.

벼 잎집무늬마름병에 대한 방제 시험

벼(품종 일품) 잎집무늬마름병에 대한 방제 효과를 알아보기 위하여 모판에서 유묘상태로 성장한 벼를 지름 15cm pot에 수도용 상토를 담아 옮겨 심은 후 실험을 진행하였다. 후보 미생물은 배양 후 1×10^6 cfu/ml 농도로 멸균수에 희석하여 7일 간격으로 3회 처리하였다. 벼잎집무늬마름병균(*Rhizoctonia solani*)은 1/5 PDA 배지에 계대배양 한 후 27°C 항온기에 3일간 보관 후 작은 조각으로 잘라 멸균된 종자에 접종한 후 접종원을 제조하여 실험에 사용하였다. 각 처리구당 7개의 식물체를 사용하였다.

식물병 방제효능 통계 처리

각 식물병의 방제 결과 값은 Kruskal-Wallis Rank Sum Test로 유의성 분석을 진행하였으며, 처리간의 차이를 확인하기 위해 Conover Test 분석을 통해 처리구간의 유의한 차이를 그룹으로 표시하였다. R program(version 4.0.3)의 ggplot2 package를 사용하여 분석 및 시각화를 수행하였다.

결과 및 고찰

토마토 시들음병에 대한 선발

후보 미생물의 토마토 시들음병 방제 효과를 확인한 결과 H1 처리구에서 발병도, 발병심각도가 가장 낮게 확인되어 토마토 시들음병의 방제효과는 H1 군주가 가장 높은 것으로 확인되었다. 병원균 단독처리시 DI 값이 6을 상회하였으나, 병원균과 같이 H1군주가 처리된 토마토에서는 DI 값이 1 이하로 강력한 시들음병 발생 억제 효과를 보였다. H2와 R7의 경우 토마토 시들음병 DI 값이 각각 1.2와 3으로 조사되어 시들음병에 적절한 방제 효과를 나타내었다. 반면 H3, H4, R5, R6 군주 처리구에서는 병원균 단독 처리구와 동일한 발병도가 확인되어 방제효과가 확인되지 않았다(Fig. 1B and 1C). 병원균 단독 처리에서 DI가 6을 상회한 반면 H1 동시 처리에서 DI가 1 이하로 감소한 결과는, 토양 전염성 시들음병에서 방제 미생물의 근권 정착과 항생, 경쟁, 유도저항성(ISR) 등이 효과적으로 작동했을 가능성을 시사한다(Fravel et al., 2003; Larkin and Fravel, 1998).

고추 모잘록병에 대한 평가

모잘록병의 DI 값을 기준으로(Fig. 2A), 후보 미생물 처리에 의한 고추 발아 초기 단계에 모잘록병 방제 효과를

조사한 결과 H1, R5, R6 군주 처리구에서 DI 평균이 1 이하로 낮게 확인되었으나 통계상 유의미한 방제 효과를 확인 할 수 없었다(Fig. 2B). 발아 초기 단계에서 H1, R5, R6 처리구의 DI 평균이 1 이하로 낮았음에도 유의성이 확보되지 않은 것은, *Phytophthora capsici* 기반 모잘록병의 피해가 온도, 습도, 발아 속도에 매우 민감하여 시험 변동성이 커질 수 있다는 점을 시사한다(Sang et al., 2008). 따라서 종자 처리(코팅/침지)와 관주/뿌리침지 등 처리 방식 및 처리 시점을 최적화하고, 초기 스크리닝 단계에서는 반복수 확대와 함께 식물 발달 단계 선발 전략을 적용하는 것이 통계적 검정력 확보에 중요함을 나타낸다(Sang et al., 2008; Segarra et al., 2013).

고추 역병에 대한 선발

후보 미생물의 고추 유묘에 대한 역병 방제효과를 DI값을 기준으로(Fig. 3A), 평가한 결과 R5 군주 처리구에서 발병도가 낮게 확인되었다. R5군주의 경우 고추 유묘기 역병에 대한 DI가 무처리구와 유사한 수준(DI>1)을 나타내었다. 고추 유묘기 역병 방제에 대한 효과는 후보 미생물 처리별로 매우 다양한 효과를 보였다(Fig. 3B and 3C). 유묘기 시험에서 처리구별 효과가 크게 달랐던 점은, *P. capsici* 방제에서 길항 미생물의 효과가 군주-환경 상호작용과 근권 집락화 안정성에 의해 좌우되며 동일 병원균이라도 조건에 따라 방제 편차가 커질 수 있음을 시사한다(Segarra et al., 2013). 또한 일부 미생물은 병원균 억제뿐 아니라 식물 방어유전자 발현 등 방어반응 유도와 연동되어 효능이 나타날 수 있으므로, R5처럼 경향성만 보인 후보는 정착밀도/방어반응 지표를 포함한 기작 기반 평가를 병행하는 것이 선발의 신뢰도를 높일 수 있다(Santos et al., 2023).

고추 탄저병에 대한 선발

고추 열매에서 후보 미생물의 탄저병 방제 효과를 알아본 결과 H1, H2, R7 군주 처리구에서 높은 방제 효과를 확인하였으며, H3, R5, R6 군주 처리구에서도 통계적으로 유의미한 방제 효과를 확인하였다(Fig. 4A and 4B). H1, H2, 그리고 R7의 경우 탄저병의 발병(DI>0.2)이 생성되지 않았다. 반면 H4는 병원균 처리구와 같은 수준의 탄저병이 발생하였고, H3와 R5 군주 처리구에서는 20%-50%(평균값 기준)으로 탄저병이 발병하였다. H1, H2, R7에서 병반이 형성되지 않은 결과는, 일부 길항 세균이 생산하는 cyclic lipopeptide(iturin/fengycin/surfactin 등)와 같은 강력한 항진균 대사산물이 *Colletotrichum spp.*를 효과적으로 억제할 수 있다는 선행 연구와 일치한다(Kim et al., 2010; Ashwini and Srividya, 2014). 다만 고추 탄저병은 여러 *Colletotrichum* 종(복합체)에 의해 유발되어 병원균 종/계통에 따라 방제 반응이 달라질 수 있으므로, H1, H2, R7의 "무발병" 결과는 다양한 탄저병 군주 패널에서 범용적으로 재현되는지 추가

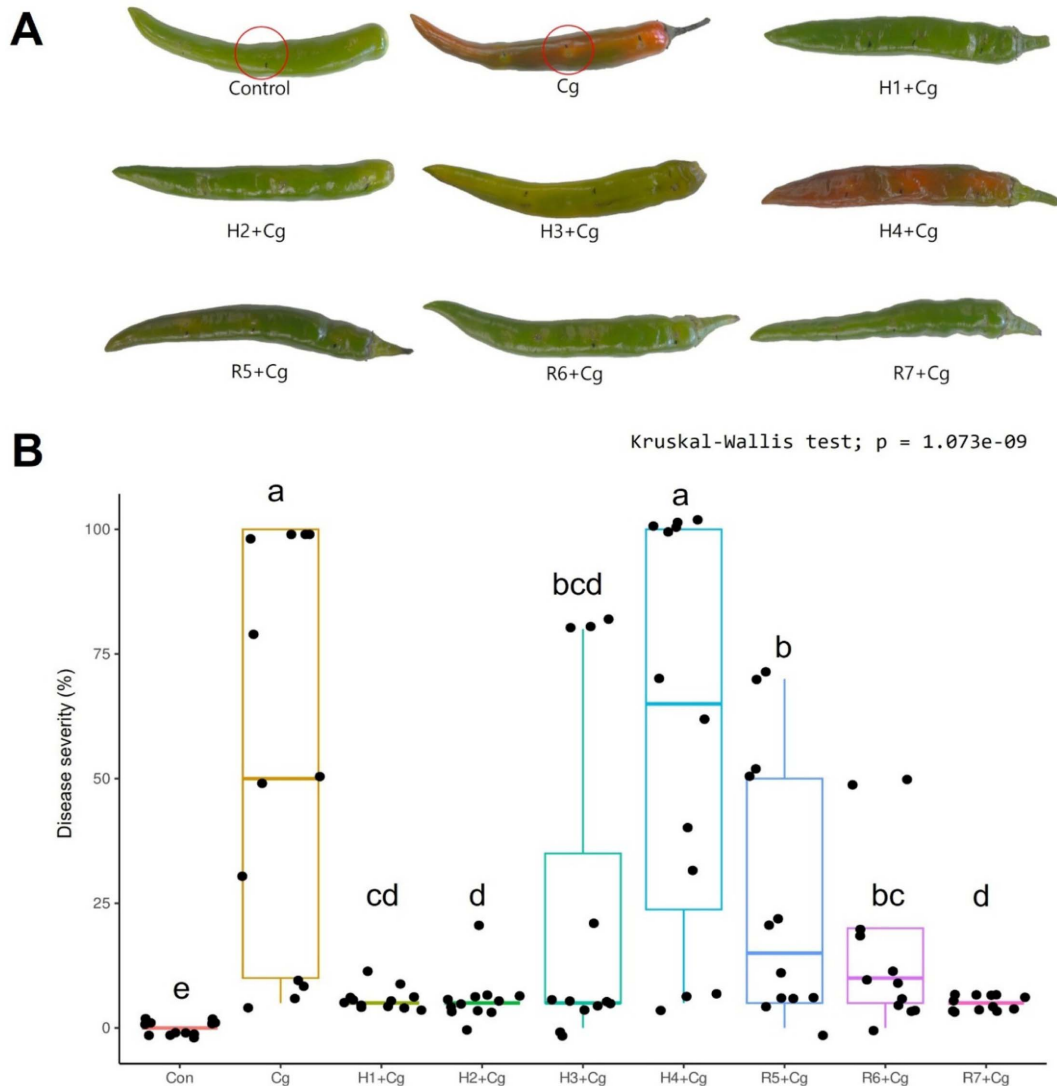


Fig. 4. Experimental scheme for evaluating biocontrol efficacy against pepper anthracnose on fruits. Fruits were surface-disinfested with 70% ethanol, air-dried, and wound-inoculated. Candidate strains (1×10^6 cfu/mL; 10 μ L) were spot-applied to wounds and dried under aseptic conditions, followed by inoculation with *Colletotrichum gloeosporioides* (KACC 40690) conidia (1×10^6 spores/mL; 10 μ L). Inoculated fruits were incubated at 25°C under high humidity and lesion development was evaluated. **A:** representative disease symptoms, **B:** Evaluation of disease occurrence.

검정이 필요하다(Mongkolporn and Taylor, 2018). 또한 국내에서도 *Bacillus subtilis* 기반 균주가 고추 역병과 탄저병에 대해 높은 방제력을 보인 사례가 보고되어, 본 연구의 유효 후보(H1·H2·R7 등)는 제제화/현장 적용성 평가로 확장될 실용적 가치가 있다(Lee et al., 2011).

벼 잎집무늬마름병에 대한 평가

벼의 유묘에서 후보 미생물의 잎집무늬마름병 방제 효과를 알아본 결과 H1, R5, R7 균주 처리구에서 높은 방제 효과를 확인하였다. 병원균 단독처리구에서 발병도가 약 40%로 조사되었으며, H1, R5, R7 처리구에서는 각각 약 19%, 12%,

13%로 조사되었다. 흥미롭게도 H2와 H3 처리구에서는 오히려 잎집무늬마름병의 발병이 증가하는 것으로 조사되었다(Fig. 5A and 5B). 병원균 단독 대비 H1, R5, R7 처리에서 발병도가 유의하게 낮아진 결과는, 잎집무늬마름병에서 길항 미생물의 항생작용, 세포벽 분해효소, 근권/엽초부 정착 등이 병 억제에 기여할 수 있다는 보고들과 일치한다(Singh et al., 2019; Yu et al., 2017; Nagarajkumar et al., 2004). 반대로 H2, H3 처리에서 발병이 증가한 현상은 후보 미생물의 안정적 방제력이 항상 보장되지 않으며, 현장 적용을 위해서는 안정성(stability)과 재현성을 핵심 선발 기준으로 삼아야 함을 시사한다(Yu et al., 2017).

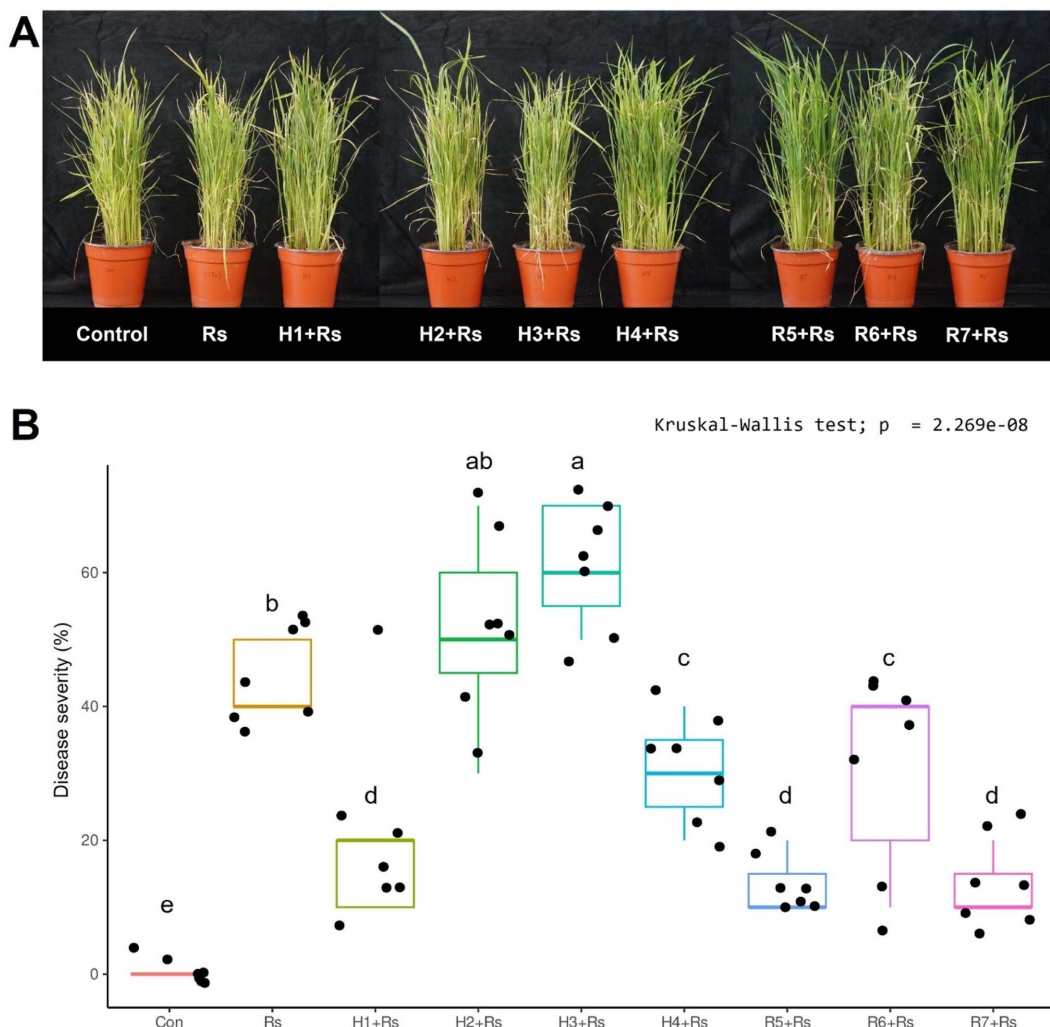


Fig. 5. Experimental scheme for evaluating candidate microorganisms against rice sheath blight in rice cv. ‘Ilpum’. Candidate strains (1×10^6 cfu/mL) were applied three times at 7-day intervals. *Rhizoctonia solani* (KACC 40101) inoculum was prepared by culturing the pathogen on 1/5-strength PDA, cutting mycelial plugs, and colonizing sterilized seeds. Disease development was assessed after pathogen inoculation and compared among treatments. **A:** plant phenotypes, **B:** Evaluation of disease occurrence.

감사의 글

이 연구는 2026년도 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었습니다.

Author Information and Contributions

Gun Young Han: Gyeongsang National University, Researcher, ORCID [http:// orcid.org/0009-0005-7511-6336](http://orcid.org/0009-0005-7511-6336).

Young A Oh: Namhae Chemical Corp., General Manager

Dong Ryul Lee: Namhae Chemical Corp., Researcher

Changsoon Kang: Namhae Chemical Corp., Director

Yong Bok Lee: Gyeongsang National University, Professor

Youn-Sig Kwak: Gyeongsang National University, Professor, ORCID [http:// orcid.org/0000-0003-2139-1808](http://orcid.org/0000-0003-2139-1808).

Research design: Kwak Y, Kang C, Investigation: Han GY, Oh YA, Lee DR, Data analysis: Han GY, Lee YB, Writing: Kwak Y, Kang C.

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

Alabouvette C, Olivain C, Migheli Q, 2009. Microbiological control of soil-borne phytopathogenic fungi with special emphasis on wilt-inducing *Fusarium oxysporum*. New

- Phytol. 184(3):529-544.
- Ashwini N, Srividya S, 2014. Potentiality of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent for management of anthracnose disease of chilli caused by *Colletotrichum gloeosporioides* OGC1. 3 Biotech 4(2):127-136.
- Fravel D, Olivain C, Alabouvette C, 2003. *Fusarium oxysporum* and its biocontrol. New Phytol. 157(3):493-502.
- Granke LL, Quesada-Ocampo LM, Lamour KH, Hausbeck MK, 2012. Advances in Research on *Phytophthora capsici* on vegetable crops in the United States. Plant Dis. 96(11): 1588-1600.
- Hansel J, Saville AC, Ristaino JB, 2024. Evaluation of a formulation of *Bacillus subtilis* for control of Phytophthora blight of bell pepper. Plant Dis. 108(4):1014-1024.
- Huitema E, Smoker M, Kamoun S. 2011. A straightforward protocol for electro-transformation of *Phytophthora capsica* zoospore. John M. McDowell (ed.), Plant Immunity: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology, vol. 712, Springer Science.
- Kang BR, Kim SA, Park JS, Kim YC, 2019. Effect of simultaneous control of the formulations of *Bacillus amyloliquefaciens* PPL and plant extract against plant disease (Tomato Fusarium wilt, Pepper anthracnose, Rice sheath blight) and sucking pest (Two-spotted spider mite, Green peach aphid) in laboratory. Korean J. Pestic. Sci. 23(2):102-110. (In Korean)
- Kim PI, Ryu J, Kim YH, Chi YT, 2010. Production of biosurfactant lipopeptides iturin A, fengycin, and surfactin A from *Bacillus subtilis* CMB32 for control of *Colletotrichum gloeosporioides*. J. Microbiol. Biotechnol. 20(1):138-145.
- Kwon JJ, Lee JB, Kim BS, Lee EH, Kang KM, et al., 2014. Biological control of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) in red pepper by *Bacillus* sp. CS-52. Korean J. Microbiol. 50(3):201-209. (In Korean)
- Larkin RP, Fravel DR, 1998. Efficacy of various fungal and bacterial biocontrol organisms for control of Fusarium wilt of tomato. Plant Dis. 82(9):1022-1028.
- Lee GW, Kim MJ, Park JS, Chae JC, Lee KJ, et al., 2011. Biological control of Phytophthora blight and anthracnose disease in red-pepper using *Bacillus subtilis* S54. Res. Plant Dis. 17(1):86-89. (In Korean)
- Mongkolporn O, Taylor PWJ, 2018. Chili anthracnose: *Colletotrichum* taxonomy and pathogenicity. Plant Pathol. 67(6):1255-1263.
- Nagarajkumar M, Bhaskaran R, Velazhahan R, 2004. Involvement of secondary metabolites and extracellular lytic enzymes produced by *Pseudomonas fluorescens* in inhibition of *Rhizoctonia solani*, the rice sheath blight pathogen. Microbiol. Res. 159(1):73-81.
- Nagórska K, Bikowski M, Obuchowski M, 2007. Multicellular behaviour and production of a wide variety of toxic substances support usage of *Bacillus subtilis* as a powerful biocontrol agent. Acta Biochim. Pol. 54(3):495-508.
- Sang MK, Chun SC, Kim KD, 2008. Biological control of Phytophthora blight of pepper by antagonistic rhizobacteria selected from a sequential screening procedure. Biol. Control 46(3):424-433.
- Santos M, Diáñez F, Sánchez-Montesinos B, Huertas V, Moreno-Gavira A, et al., 2023. Biocontrol of diseases caused by *Phytophthora capsici* and *P. parasitica* in pepper plants. J. Fungi 9(3):360.
- Segarra G, Avilés M, Casanova E, Borrero C, Trillas I, 2013. Effectiveness of biological control of *Phytophthora capsici* in pepper by *Trichoderma asperellum* strain T34. Phytopathol. Mediterr. 52(1):77-83.
- Singh P, Mazumdar P, Harikrishna JA, Babu S, 2019. Sheath blight of rice: a review and identification of priorities for future research. Planta 250(5):1387-1407.
- Than PP, Prihastuti H, Phoulivong S, Taylor PWJ, Hyde KD, 2008. Chilli anthracnose disease caused by *Colletotrichum* species. J. Zhejiang Univ. Sci. B 9(10):764-778.
- Yu YY, Wang J, Zhu ML, Wei Z, Li HY, 2017. An improved strategy for stable biocontrol agents selecting to control rice sheath blight caused by *Rhizoctonia solani*. Microbiol. Res. 203:1-9.

다병해 모델 기반 후보 미생물의 방제효능 평가 및 범용 미생물제제 개발을 위한 우수 균주 선발

한건영¹ · 오영아² · 이동률² · 강창순² · 이용복¹ · 곽연식^{1*}

¹경상국립대학교 생명과학연구원, ²남해화학㈜

요 약 화학농약 의존을 낮추면서 여러 병해에 범용 적용 가능한 미생물 제제 개발을 위해 다병해 조건에서 재현성 있는 후보 선발이 요구된다. 본 연구는 서로 다른 병원체군 및 감염 생태를 대표하는 병해 모델에서 후보 미생물의 방제 효능을 통합적으로 검증하여 범용 후보를 선발하고자 하였다. 7종의 후보 미생물을 이용해 토마토 시들음병, 고추 모잘록병, 고추 유묘 역병, 고추 탄저병, 벼 잎집무늬마름병에 대한 방제효과를 비교 평가하였다. 토마토 시들음병에서는 H1 처리구가 발병도와 발병심각도를 가장 효과적으로 억제하여 병원균 단독 처리(DI>6) 대비 H1 동시 처리에서 DI가 1 이하로 감소하였다. 고추 모잘록병은 H1, R5, R6에서 DI가 낮았으나 유의성은 확보되지 않았다. 고추 유묘 역병은 처리구별 변동이 컸으며 R5에서 발병 경감이 관찰되었다. 고추 탄저병은 H1, H2, R7에서 무발병을 확인하였고, 벼 잎집무늬마름병은 H1, R5, R7에서 발병이 감소하였다. 결론적으로, H1은 토마토 시들음병과 벼 잎집무늬마름병에서 일관되게 우수한 억제 효과를 보였고, 고추 탄저병에서도 무발병 수준의 방제력을 나타내어 다병해 범용 후보로서 잠재성이 가장 높았다. H2와 R7은 탄저병에서 매우 우수한 효과를 보인 반면, 토마토 시들음병과 벼 잎집무늬마름병에서의 효능은 제한적이거나 조건 의존적일 가능성이 제시되었다. 또한 난균류 기반 고추 역병성 피해(발아기 및 유묘기)에서는 처리구별 변동성이 커 효능의 안정성이 핵심 선발 기준임을 확인하였다. 향후에는 H1을 중심으로 처리 시점·방법(종자 처리/관주/엽면) 최적화, 근권 정착성 및 유도저항성 관련 지표 평가, 그리고 다양한 병원균 균주·재배 조건에서의 재현성 검증을 수행함으로써 제제화 및 현장 적용 가능성을 구체화할 필요가 있다.

핵심어: 생물학적 방제, 미생물 제제, 다병해 범용성, 길항 미생물