

미생물을 활용한 옥수수병의 생물학적 방제

Biocontrol of Maize Diseases by Microorganisms

***Co-corresponding authors**

S. Y. Park

Tel: +82-61-750-5187

Fax: +82-61-750-5187

E-mail: spark@scnu.ac.kr

Y. Kim

Tel: +82-63-536-6712

Fax: +82-63-536-6003

E-mail: yangseon@cials.or.kr

ORCID

<http://orcid.org/0000-0003-1267-1111><http://orcid.org/0000-0002-8285-3407>김정애^{1,2} · 송정섭¹ · 정민혜³ · 박숙영^{3*}  · 김양선^{1*} ¹(재)농축산용미생물산업육성지원센터 기술지원팀, ²전북대학교 생리활성소재과학과, ³순천대학교 식물 의학과**Jung-Ae Kim^{1,2}, Jeong-Sup Song¹, Min-Hye Jeong³, Sook-Young Park^{3*} , and Yangseon Kim^{1*} **¹Department of Research and Development, Center for Industrialization of Agriculture and Livestock Microorganisms, Jeongeup 56212, Korea²Department of Bioactive Material Science, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea³Department of Plant Medicine, Suncheon National University, Suncheon, 57922, Korea

Zea mays, known as maize or corn, is a major staple crop and an important source of energy for humans and animals, thus ensuring global food security. Approximately 9.4% of the loss of total annual corn production is caused by pathogens including fungi, bacteria, and viruses, resulting in economic losses. Although the use of fungicides is one of the most common strategies to control corn diseases, the frequent use of fungicides causes various health problems in humans and animals. In order to overcome this problem, an eco-friendly control strategy has recently emerged as an alternative way. One such eco-friendly control strategy is the use of beneficial microorganisms in the control of plant pathogens. The beneficial microorganisms can control the plant pathogens in various ways, such as spatial competition with plant pathogens, inhibition of fungal or bacterial growth via the production of secondary metabolites or antibiotics, and direct attack to plant pathogens via enzyme activity. Here, we reviewed microorganisms as biocontrol agents against corn diseases.

Keywords: Biocontrol, Disease management, Maize disease, Microorganisms

Received November 8, 2022

Revised December 19, 2022

Accepted December 19, 2022

서론

옥수수는 인간 및 가축에 중요한 탄수화물, 지방, 단백질, 미네랄 등의 에너지 공급원으로 한 해 필요량에 대한 공급에 차질이 생길 경우 전 세계 식량 안보에 즉각적으로 영향을 미칠 수 있는 주요 식량작물이다(Golob 등, 2004; Seyi-Amole과 Onilude, 2021; Shahbandeh, 2020). 옥수수는 전 세계적으로 2020년 11억 1,641만톤이 생산되며, 병해충에 의한 생산량 하

락으로 인한 경제적 손실은 연간 9.4%에 이르는 것으로 보고되고 있다(Khosravi 등, 2007; Sitara와 Akhter, 2007). 또한, 병해충에 의해 감염된 옥수수는 수확량과 품질이 크게 하락한다(Marin 등, 1999). 옥수수를 기주로 하는 병원균의 일부는 2차 대사산물인 독소를 생산하여 인축에 치명적인 영향을 미치기 때문에 병해충 방제는 반드시 필요하다(Lerda 등, 2005; Voss 등, 2007).

옥수수에 대한 병해충 관리는 저항성 품종 적용과 화학적 방제가 일반적이다(Maloy, 2005; Ragsdale 등, 1991). 이 중 화학농약을 사용하는 화학적 방제는 손쉽고 빠르게 병을 방제할 수 있지만, 사용 후 작물과 토양에 잔류하여 환경과 수질에 악영향을 끼치며 또한 이를 섭취한 인축에도 영향을 미칠 수 있다

Research in Plant Disease

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.

(Berg 등, 2017; Budi 등, 2000). 이에 따른 법적 규제가 강화되고 있으며, 화학농약을 대체할 수 있는 다양한 방법들이 모색되고 있다. 이러한 방법 중 하나가 생물학적 방제로서 최근 친환경 농산물 수요 증가와 더불어 화학농약을 대신할 수 있는 대안으로 떠오르고 있다(Azcón-Aguilar와 Barea, 1997; Ons 등, 2020).

생물학적 방제의 정의는 이로온 영향을 미치는 미생물을 이용하여 식물 병원균이나 해충을 억제하는 방제법으로, 기주식물체 내에서 기생을 통한 공간 경쟁을 비롯 항생제, 영양분 등을 이용하여 병해충을 방제하는 것을 말한다(Heimpel과 Mills, 2017). 이러한 방법의 대표적인 방제로는 천연물이나 미생물을 이용하는 방법이 있으며, 최근에는 치료 목적 이외에 예방을 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다(Miedaner와 Juroszek, 2021).

이 중 미생물을 이용한 방제는 가장 일반적으로 사용되는 친환경 방제방법으로 식물병원균에 대한 영양 경쟁, 길항 관계 그리고 표적 병원균과의 직접적인 상호작용 없이 저항성을 유도하는 등의 다양한 작용 방식이 적용된다(Bais 등, 2004; Glick, 1995; Pal 등, 2006; Schafer과 Kegley, 2002; Sturz와 Christie, 2003). 생물학적 제제로 사용되는 길항미생물은 cellulase, chitinase, pectinase, protease, lysozyme 등의 여러가지 세포벽 분해효소를 분비하는 것으로 알려져 있다(Compant 등, 2005; Shoda, 2002). 이러한 효소는 곰팡이의 세포벽에 구멍을 내거나 가수분해하여 병원균의 균사 기능을 손상시켜 병원균의 성장을 저해하는 것으로 알려져 있다(Compant 등, 2005; Shoda, 2002). 또한 유용 미생물이 생산하는 2차 대사산물이 식물 병원균에 대해 항균작용을 하거나, 식물의 저항성 관련 유전자를 유도하는 경우도 보고되었다(Pertot 등, 2015). 어떤 경우는 유용 미생물이 작물의 근권에 있는 다른 미생물들과 상호작용하여 해당 작물의 생산성과 품질을 높이는 경우도 보고되어, 작물재배와 농생태계를 안정시키는 데 유용 미생물이 기여할 수 있을 것이라는 기대가 높아지고 있다(Pertot 등, 2015).

본 리뷰에서는 주요 식량작물인 옥수수에 발생하는 대표적인 병을 중심으로 미생물을 이용한 생물학적 방제 연구에 대한 정보를 제공하고자 한다. 옥수수에 발생하는 주요병으로는 줄기/이삭/뿌리썩음병(stock/ear/root rot), 깨씨무늬병(southern corn leaf blight), 잎마름병(northern leaf blight), 옥수수 감부기병(smoot), 노균병(downy mildew), 세균성잎줄무늬병(bacterial leaf streak), 시들음병(late wilt) 등이 있으며 유용 미생물을 활용한 친환경 방제를 위한 연구가 보고되었다. 이 리뷰에서 미생물을 이용한 주요병에 방제능을 Table 1에 정리하였으며, 이를 중심으로 살펴보고자 한다.

옥수수 깨씨무늬병(Southern Corn Leaf Blight), 잎마름병(Northern Leaf Blight), 잎집무늬마름병(Sheath Blight)

옥수수 깨씨무늬병, 잎마름병, 잎집무늬마름병의 원인 병원균은 각각 *Cochlioborus heterostrophus* (무성세대, *Bipolaris maydis*), *Setosphaeria turcica* (무성세대, *Exserohilum turcicum*), *Thanatephorus cucumeris* (무성세대, *Rhizoctonia solani*)로 옥수수에 피해를 주는 경제적으로 중요한 곰팡이 병원균들이다(Pechanova와 Pechan, 2015). 본 리뷰에서는 이 병들을 방제하기 위해 개발 및 적용된 미생물을 중심으로 기술하고자 한다.

Bacillus spp. Sartori 등(2017)은 옥수수 잎마름병(*E. turcicum*)에 대한 미생물 방제효과를 연구 보고하였다. 잎마름병에 대한 길항미생물인 *Bacillus* spp.와 *Pantoea* spp.를 옥수수의 잎으로부터 분리하여 재배 포장에 적용하였다. 옥수수의 3가지 발달 단계별(생육기[blister stage], 유숙기[milk stage], 호숙기[dough stage])로 미생물 2종류(*Bacillus* spp.와 *Pantoea* spp.)를 처리하여 잎마름병의 병발생률을 측정하였다. 그 결과, *Bacillus* spp.를 1×10^7 cfu/ml로 엽면 살포했을 때 처리이후 40일 동안(생육기에서 호숙기까지) 무처리구에 비해 옥수수 잎마름병이 50% 감소하였다. 그러나 *Pantoea* spp.는 효과가 나타나지 않았다. 저자들은 잎마름병과 더불어 녹병(*Puccinia sorghi*)에서도 동일하게 적용하였으나 통계학적으로 유의한 수준의 병 발병률의 감소효과를 관찰하지 못했다.

옥수수의 잎에서 분리한 엽권 미생물들이 직접적으로 옥수수 잎마름병의 병원균의 성장을 감소시키는 효과도 보고되었다(Sartori 등, 2015). 이 보고에서는 기후변화로 인한 가뭄 발생 시 미생물과 옥수수 잎마름병을 일으키는 병원균에 대한 길항작용을 조사하여 환경스트레스에 대한 효과 확인 및 이러한 스트레스에 대한 대비를 위한 연구를 수행하던 중에 옥수수의 잎에서 분리한 미생물이 옥수수 잎마름병균(*S. turcica*)의 성장을 억제하는 효과를 발견하였다. 가뭄 조건을 조성하기 위해 수분을 다르게 함유한 배지에 병원균을 접종하여 *Bacillus* spp.의 길항작용을 조사하였다. 미생물의 처리는 병원균의 지수기(lag phase)를 지연하는 효과를 보였으며, 수분함량이 -1.38 Mpa 배지에서는 27%, 수분함량이 -4.19 Mpa 배지에서는 43%의 병원균 억제 효과가 나타났다(Sartori 등, 2015).

Muis와 Quimio (2006)의 연구보고에 따르면 옥수수 종자를 미생물 *B. subtilis* BR23로 종자 코팅한 뒤 발아율을 평가하고 유묘 성장을 확인하였다. 대조약제로 옥수수 종자소독제로 사용되는 캡탄을 사용하였다. 그 결과 종자소독제 캡탄은 14.4%

Table 1. List of microbial biocontrol agents against corn diseases

Disease		Microorganism	Reference
Northern leaf blight	<i>Exserohilum turcicum</i>	<i>Bacillus</i> spp.	Sartori et al. (2015)
		<i>Bacillus</i> spp.	Sartori et al. (2017)
Northern leaf blight and sheath blight	<i>Exserohilum turcicum</i> , <i>Rhizoctonia solani</i>	<i>Bacillus subtilis</i> BR23	Muis and Quimio (2006)
Southern corn leaf blight	<i>Cochlioborus heterostrophus</i>	<i>Bacillus subtilis</i> TM4	Djaenuddin et al. (2020)
		<i>Bacillus subtilis</i>	Djaenuddin et al. (2021)
Southern corn leaf blight	<i>Cochlioborus heterostrophus</i>	<i>Chaetomium globosum</i>	Piyaboon (2022)
Southern corn leaf blight	<i>Cochlioborus heterostrophus</i>	<i>Trichoderma atroviride</i> SG3403	Wang et al. (2015)
		<i>Trichoderma atroviride</i> SG3403 and <i>Trichoderma harzianum</i> SH2303	Kutawa et al. (2021)
		<i>Trichoderma harzianum</i>	Chandra Nayaka et al. (2010)
Southern corn leaf blight	<i>Cochlioborus heterostrophus</i>	<i>Xenorhabdus budapestensis</i> C72	Li et al. (2021)
Sheath blight	<i>Rhizoctonia solani</i>	<i>PaeniBacillus polymyxa</i> SF05	Chen et al. (2022)
Stalk, ear and root rot	<i>Fusarium graminearum</i> , <i>Fusarium verticillioides</i>	<i>Bacillus megaterium</i> B5	Figueroa-López et al. (2016)
		<i>Bacillus cereus</i> B25	
		<i>Bacillus</i> sp. B3	
		<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Chandra Nayaka et al. (2009)
		<i>Streptomyces</i> sp. DAUFPE 11470	Bressan and Figueiredo (2007)
		<i>Streptomyces</i> sp. DAUFPE 14632	
		<i>Trichoderma harzianum</i>	Saravanakumar et al. (2017)
Downy mildew	<i>Peronosclerospora maydis</i>	<i>Bacillus subtilis</i> G1	Sireesha and Velazhahan (2015)
		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> B2	
		<i>BreviBacillus brevis</i> 57	
		<i>Pseudomonas fluorescens</i> Pf1	
Bacterial leaf streak	<i>Xanthomonas vasicola</i> pv. <i>vasculorum</i>	<i>Bacillus pumilus</i> R1990	Bathke et al. (2022)
		<i>B. subtilis</i> 6051	
Late wilt disease	<i>Harpophora maydis</i>	<i>Trichoderma</i> spp.	Degani and Dor (2021)

의 병원균 억제효과를 보인 반면, 미생물 *B. subtilis* BR23 처리 시 27.0%의 병원균 억제효과를 보여 옥수수 잎마름병에 대한 미생물 *B. subtilis* BR32의 상업화 가능성 제시하였다(Muis와 Quimio, 2006).

Djaenuddin 등(2020)은 옥수수 근권에서 분리한 *Bacillus subtilis* TM4 미생물의 옥수수 깨씨무늬병 방제제의 가능성을 조사 보고하였다. 미생물 *B. subtilis* TM4를 종자처리 및 엽면 살포한 후 병진전곡선(area under the disease developmental

curve [AUDDC])을 계산하여 비교하였다. 그 결과 종자에 미생물 *B. subtilis* TM4를 처리할 경우 무처리구 대비 낮은 병진전곡선 값을 보여 *B. subtilis* TM4가 옥수수 깨씨무늬병을 억제하는 효과가 있다고 보고하였다(Djaenuddin 등, 2020). 또한 종자처리 후 3주 간격으로 *B. subtilis* TM4를 옥수수 엽면 살포시 미생물 효과가 더 높아지는 것을 확인하였다. 실제 옥수수 재배 포장에 *B. subtilis* TM4 제형을 3 g/l의 농도로 분무 처리할 경우, 옥수수 깨씨무늬병이 21.5% 감소되는 효과를 확인하여 포장

적용 가능성을 제시하였다(Djaenuddin 등, 2020).

화학농약과 미생물의 혼합사용을 통한 병방제 효과를 알아보는 연구도 Djaenuddin 등(2021)에 의해 진행되었다. Djaenuddin 등(2021)은 합성 살균제로 알려진 difenoconazole, propineb, fluopicolide를 기본으로 하여 Tribas라고 불리는 *B. subtilis*를 혼합하여 재배 포장에 처리하였다. 그 결과 생물학적 방제제를 혼합하지 않은 처리구의 병 발생률이 72%인데 반해 생물학적 방제제와 합성 살균제를 혼합하여 적용했을 경우 병 발생률이 최대 27%까지 낮아졌다고 보고하였다(Djaenuddin 등, 2021). 이 결과는 합성 살균제와 미생물제제의 상호보완성을 증명한 결과로 합성 살균제의 사용을 줄일 수 있는 가능성을 제시하였다.

Chaetomium spp. Pyaboon (2022)은 온실 내에서 길항 미생물인 *Chaetomium globosum*을 처리한 뒤 옥수수 깨씨무늬병균(*C. heterostrophus*)을 접종하여 병 발생을 조사하였다. 깨씨무늬병 병피해도는 *C. globosum*의 처리 농도에 따라 유의적으로 줄어들었다. 예를 들어, 1×10^6 spores/ml를 처리했을 때 병피해도는 26–50%인데 반해, 10배 높은 농도인 1×10^7 spores/ml로 처리했을 때 125%였으며, 100배 높은 농도인 1×10^9 spores/ml로 처리했을 때 0.9%의 병피해도를 나타내 옥수수 깨씨무늬병에 대한 미생물 방제제로 *C. globosum*을 이용할 것을 제안하였다(Piyaboon, 2022).

Paenibacillus spp. Chen 등(2022)은 옥수수 잎에서 분리한 엽권 미생물 *Paenibacillus polymyxa* SF05의 옥수수 잎집무늬마름병에 대한 미생물 방제제로 이용 가능성을 제시하였다. *P. polymyxa* SF05는 옥수수 잎집무늬마름병을 포함한 식물병원성 곰팡이에 대하여 57.1–80.0%의 높은 저해율을 보였다. 특히 옥수수 잎집무늬마름병에 대한 재배 포장에서 발병률은 무처리구에서 59.4%인데 반해, 미생물 *P. polymyxa* SF05 처리구에서 37.4%로 발병률이 크게 감소하였다. 화학살균제를 처리한 재배 포장에서 발병률이 32.2%임을 고려했을 때 *P. polymyxa* SF05의 옥수수 잎집무늬마름병 방제효과가 화학살균제와 대등한 수준임을 확인하였다.

이러한 길항효과는 *P. polymyxa* SF05가 생산하는 cellulase 및 chitinase와 같은 효소활성을 통해 병원성 곰팡이의 세포벽을 분해할 뿐만 아니라, *ZmPR1a*, OPR1 및 OPR7과 같은 옥수수의 저항성 유전자의 발현에도 기여한다고 보고하였다. 또한 *P. polymyxa* SF05의 유전체 분석을 통해 생물막(biofilm) 형성 관련 유전자, 세포벽 분해 효소(cellulase, chitinase, peptidoglycan degradation), 이차대사산물 포함한 생합성 유전자 클러

스터(nostamide A, aurantinin, bacitracin, bogorol A, brevicedine, fusaricidin B, lipopolysaccharide, marthiapeptide A, octapeptin C4, paenibacillin, paenibacterin, paenicidin A, paenicidin B, panilan, paenilipoheptin, paeninodin, polymyxin, polymyxin B, siphonazole, S-layer glycan, turamamide, tridecaptin), 휘발성 유기 화합물 생합성 유전자를 보유하고 있음을 확인하였다(Chen 등, 2022).

Trichoderma spp. Wang 등(2015)은 *Trichoderma atroviride* SG3403이 옥수수 깨씨무늬병을 일으키는 병원균(*C. heterostrophus*)의 균사 성장을 억제하여 온실조건에서 식물에 처리하였을 때 70% 방제효과를 나타낸다고 보고하였다. 옥수수 묘 앞에 *T. atroviride* SG3403 포자 현탁액을 뿌릴 경우 생물 방제 효과를 조사한 결과 지속효과가 30일 동안 유지하는 것으로 나타났다. 재배 포장에서 옥수수의 이삭으로부터 수염이 나오는 성장 초기 단계부터 후기 성숙 단계까지 40%의 병 방제효과를 유지하여 깨씨무늬병을 장기간 지속적으로 방제할 수 있음을 보고하였다. 또한 옥수수의 방어기작과 관련된 효소들인 phenylalanine ammonia lyase, superoxide dismutase, catalase의 발현율과 효소활성 측정치를 비교했을 때, 옥수수 깨씨무늬병만 처리한 것보다 높은 발현을 보여 *T. atroviride* SG3403이 옥수수의 방어기작을 증진시켜 병 발생 억제 효과를 나타내는 것이라고 보고하였다(Wang 등, 2015).

Kutawa 등(2021)은 옥수수 깨씨무늬병 방제방법으로 저항성 품종 사용과 함께 *T. harzianum* SH2303, *T. atroviride* SG3403 등 병원균에 대해 생물학적 방제 활성을 지닌 미생물 사용을 이용할 것을 제안하였다(Kutawa 등, 2021). 흙에서 분리한 *T. harzianum* 균주들 중 옥수수 깨씨무늬병균에 대한 길항 효과를 확인하여 Th8을 선발하였다. *In vitro* 실험에서 옥수수 종자에 Th8 처리 후 분무살포를 실시하면 처리 품종 및 제형 성분과 상관없이 모두 병 방제율이 증가하였으나, 재배 포장 결과에서는 미생물을 종자처리 없이 분무살포 했을 때 병 방제율이 더 높았고, 모든 품종에서 53% 이상의 발병률이 감소하였다. 또한 *T. harzianum* Th8을 처리하면 곰팡이 독소인 fumonisin의 검출량이 합성 살균제인 carbendazim 처리군과 비교하여 53% 이상 감소함을 확인하였다. 이 결과는 생물학적 방제제로서 *T. harzianum* Th8의 이용 가능성을 증명하였다(Chandra Nayaka 등, 2010).

Xenorhabdus spp. Li 등(2021)은 곤충병원성 세균의 생물학적 방제 가능성을 보고하였다. 선충 공생 세균으로 알려진 *Xenorhabdus budapestensis* C72를 활용하여 옥수수 깨씨

무늬병(*C. heterostrophus*)에 대한 항균 활성을 조사하였다. *X. budapestensis* C72 배양 상등액을 40% 농도로 처리할 경우 온실에서는 59.15%, 재배 포장 적용에서는 77.96%의 깨씨무늬병 방제 효과를 보여 우수한 길항미생물로서의 가능성을 보고하여, 곤충병원성 세균의 생물학적 방제제로서 이용 가능성을 밝혔다. 또한 배양 상등액을 40%로 처리했을 때 옥수수의 병 저항성 관련 유전자 *NPR1*와 *PR1*의 발현량이 유의하게 상향 조절됨을 확인하였고 자스몬산/에틸렌 신호전달 경로 등이 관여하여 병저항성이 유도됨을 밝혔다(Li 등, 2021).

옥수수 줄기, 이삭 및 뿌리 썩음병 (Stalk, Ear, Root Rot)

옥수수 줄기, 이삭 및 뿌리 썩음병은 전 세계적으로 옥수수의 생산량에 상당한 손실을 가져오는 옥수수의 주요 병중 하나이다(Fandohan 등, 2003; Hernández-Rodríguez 등, 2008; Munkvold, 2003). *Fusarium verticillioides* (*F. moniliforme*)가 원인 곰팡이 병원균으로, *Fusarium*속은 옥수수에서 가장 널리 알려진 2차 대사산물을 생산하여 피해를 주는 곰팡이병으로 알려져 있다(Fandohan 등, 2003; Marasas, 1995; Munkvold, 2003; Stockmann-Juvala와 Savolainen, 2008). 다양한 부위에 발생하는 옥수수 썩음병은 옥수수의 수확 전후로 덩고 건조한 날씨에 흔히 발생하며, 포자의 전반에 의해 기주식물이 감염되기 때문에 환경조건이 병원균에 유리할 경우 기주 식물에 심각한 영향을 미친다(Blacutt 등, 2018). 특히 원인 병원성 곰팡이는 종자에 감염할 경우 2차 대사산물인 곰팡이 독소인 fumonisin을 생성하는데, 이 물질은 식도암을 일으키는 발암물질로 옥수수에 함유된 독소 양과 감염된 옥수수 기판 식품 및 사료가 농업에서 매우 중요하게 다뤄진다(Marasas, 1995; Stockmann-Juvala와 Savolainen, 2008).

Bacillus spp. Figueroa-López 등(2016)은 옥수수 이삭썩음병/밑둥썩음병균(*Fusarium verticillioides*)에 감염된 옥수수의 근권으로부터 미생물을 분리하여 옥수수 이삭썩음병균에 대한 길항효과 분석을 통해 42개의 세균을 확보하였다. 이 분리 미생물 중 항균력이 높은 14종을 선발하였으며, 선발된 미생물을 식물체에 처리하여 높은 옥수수 이삭썩음병(*F. verticillioides*)에 대해 세균 3종(*B. megaterium* B5, *B. cereus* B25, *Bacillus* sp. B35) 가장 우수한 길항력을 보였다. 온실내의 포트 실험에서 길항세균을 종자에 처리한 후 병원균을 처리했을 때, 무처리구의 경우 옥수수썩음병이 100%인데 반해 *B. cereus* B25를 종자 처리한 경우 뿌리 썩음은 40%, 줄기썩음은 20%로 발병률이

낮아져, *B. cereus* B25의 생물학적 방제제로서의 가능성을 확인하였다. 이들 균주는 다양한 효소(glucanase, protease, chitinases)를 생산할 뿐만 아니라, 식물생장 촉진 효과를 갖는 auxin과 siderophore도 생산한다는 사실을 밝혔다. 이 결과를 기반으로 저자들은 *B. cereus* B25가 옥수수 썩음병에 대한 방제제로도 사용 가능할 뿐만 아니라 식물의 생산을 촉진하는 생장 촉진 후보로도 제안하였다(Figueroa-López 등, 2016).

Pseudomonas fluorescens. Chandra Nayaka 등(2009)은 *Pseudomonas fluorescens*를 사용하여 옥수수 썩음병 및 독소 fumonisin 생산에 대한 효과 검증 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 *P. fluorescens*과 더불어 3가지 기질(옥수수 전분[*corn starch*], 밀기울[wheat bran], 활석[tarc] 분말)에 *P. fluorescens*를 정착시킨 제제들이 *F. verticillioides* 발생률, 종자 발아, 유묘 활력, 포장실험에서의 병원균 감염여부, 곡물 수확량 및 fumonisin 생산에 대한 길항 효과를 평가하였다. 그 결과 기질에 정착시키지 않은 *P. fluorescens* 세균 자체 처리에서 옥수수 종자에 처리하는 농약 carbendazim 처리에 비해 *F. verticillioides*의 발생을 줄이는 데 가장 효과적이었으며, 또한 종자 발아 및 유묘의 활력을 증가시켰다. 포장실험의 경우 종자처리 및 엽면살포 모두에서 *P. fluorescens*가 이삭썩음병을 효과적으로 줄였을 뿐만 아니라, 전체 곡물 수확량도 증가시키는 것으로 나타났다. 또한, 옥수수 수확물에서의 fumonisin 생산 수준을 감소시켜, *P. fluorescens*가 옥수수 썩음병을 방제하여 곡물의 수확량과 독소(fumonisin) 생산을 줄이는 데 기여한다고 보고하였다(Chandra Nayaka 등, 2009).

Streptomyces spp. Bressan과 Figueiredo (2007)는 *Streptomyces* 균주 DAUFPE11470과 DAUFPE14632 두 균주를 미생물 제제로 사용하여 옥수수 썩음병에 대한 병발생률을 온실에서 조사하였다. 병원균과 미생물을 각각의 농도별로 처리한 뒤 병발생률을 측정하였다. 그 결과 두 균주 모두 *F. verticillioides*에 의한 썩음병을 효과적으로 방제하는 것으로 나타났는데, 특히 두 미생물제제의 농도가 높아질수록 썩음병 발생률이 유의적으로 감소하는 결과를 보였다(Bressan과 Figueiredo, 2007).

Trichoderma spp. Saravanakumar 등(2017)은 생물 방제제, 옥신 유사화합물, 2차 대사산물 등을 생산하는 이로운 미생물로 알려진 *Trichoderma* spp. (Chet and Inbar, 1994; Dang 등, 2010; Gruber 등, 2012; Harman 등, 2004; Hung 등, 2013; Lee 등, 2015, 2016; López-Mondéjar 등, 2011; Ruiz 등, 2007)를 옥수수 썩음병(*Fusarium stalk rot*) 방제 연구에 사용하였다.

이 연구에서는 *in vitro* 길항 분석을 통해 옥수수 썩음병에 대해 길항력을 보이는 총 100개의 *Trichoderma* 분리주를 스크리닝 한 뒤, 효소활성이 있는지의 여부를 검증하였다. 선별 균주들의 chitinase, protease, glucanase 및 cellulase 효과 검정 결과, 3가지 효소활성과 더불어 강한 cellulase 활성을 보인 *T. harzianum* CCTCC-RW0024 균주를 선발하였다. 이 *T. harzianum* CCTCC-RW0024 균주는 옥수수 줄기썩음병에 대해 86.66%에 이르는 방제가를 보였다.

또한 옥수수에 *T. harzianum* CCTCC-RW0024 처리 후 옥수수 근권 미생물 군집 변화를 pyrosequencing을 통해 분석하였는데, *Trichoderma* 균주의 접종 시 식물 성장촉진관련 *Acidobacteria*가 18.4% 증가하였고, 병원미생물 군집은 66% 감소되는 결과를 보고하였다. 이러한 식물 성장촉진과 관련된 휘발성 물질의 생산 여부를 살펴본 결과 우세한 휘발성 화합물로 9-amino-1,2,3,4-tetrahydro-H-[1]benzopyrano[3,4-]pyridin-5-one, 1-(4-fluorophenyl)-pyridazine-3,6(1H,2H)-dione, 4-cyclohexylbenzenamine, dehydroacetic acid, o-cyanobenzoic acid, eicosanoic acid, 2-oxo-pentanedioic acid, dimethyl ester, 1-(1H-pyrazol-4-yl)-3-octyne ethanone 물질이 검출되었으며, 이 중 9-amino-1,2,3,4-tetrahydro-H-[1]benzopyrano[3,4-b]pyridin-5-one은 *Fusarium* 병원성과 관련된 병원균의 전사 보조인자인 FgSWi6 단백질과 상호작용하여 병원균 억제에 기여할 수 있다고 보고하였다(Saravanakumar 등, 2017).

Castro del Ángel 등(2020)은 *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. longibrachiatum*을 포함하는 총 3가지 *Trichoderma* species를 3가지 방법(종자처리, 엽면살포, 종자처리-엽면살포)으로 적용하여 온실에서 실험을 수행하였다. 무처리구에서 79%의 병 발생률을 보인 반면, 종자에 처리했을 때 56%, 엽면살포했을 때 55%, 두 가지 처리를 병행하였을 때 49%의 발병률을 보였으며, 또한 병피해도도 감소하는 결과를 보였다. 이 방법 중 두가지 방법을 병행했을 때 가장 낮은 발병률과 병피해도를 보였으며 무처리구와 비교하면 3종의 *Trichoderma* 미생물 방제는 모두 유의미하게 발병률과 병피해도가 감소되었다. 특히 *T. harzianum*은 옥수수의 품종 2종(H-520, MESTIZO)과 잡종 품종 2종(CRI-OLLO, UAAAN-ISP-173) 모두에서 유의하게 병을 제어하였으며, 모든 처리에서 70% 이상의 효과를 보였다(Castro del Ángel 등, 2020).

옥수수 노균병(Downy Mildew)

*Peronosclerospora sorghi*에 의해 발생하는 노균병은 옥수수의 중요한 병 중 하나이다. 이 병은 현재 대부분 화학 살균제인

metalaxyl로 종자 처리하여 관리하고 있다(Anahosur와 Patil, 1980). 그러나 화학 살균제 사용으로 인한 환경 오염과 *P. sorghi* 개체군 내에서의 살균제 내성 발생에 대한 우려가 증가하고 있어 친환경 미생물제제의 연구개발이 필요하다(Isakeit와 Jaster, 2005).

Bacillus spp. 길항 미생물로 알려진 *B. subtilis* G1과 *B. amyloliquefaciens* B2 (Meena 등, 2001; Shifa 등, 2015)는 종자처리를 하여 온실에서 평가한 결과 옥수수의 발아율과 유묘 활력을 유의미하게 증가시키는 것으로 나타났다. *B. subtilis* G1을 처리했을 때 옥수수의 발아율과 유묘 활력 지수(발아율×유묘 길이)가 각각 9%, 31% 증가하였다. 또한 *B. subtilis* G1의 활석 기반 분말 제형은 종자에 10 g/kg의 비율로 온실 조건에 적용할 경우, 노균병 발병률이 54%까지 감소되는 우수한 효과를 보였다(Sireesha와 Velazhahan, 2015).

옥수수 세균성 잎줄무늬병(Bacterial Leaf Streak)

옥수수 세균성 잎줄무늬병은 2014년 북미지역 Nebraska에서 처음 관찰된 이후 현재까지 미국의 중서부 10개주 이상에 널리 퍼져 수확량 손실을 초래하고 있다. 원인 세균은 *Xanthomonas vasicola* pv. *vasculorum*로 이 병원균 감염으로 인해 옥수수 잎에 노란색 병변이 확장되고 합쳐져 잎 면적의 많은 부분으로 번지는 특징이 있다(Bathke 등, 2022). 현재 이 병에 감염될 경우 방제법이 개발되지 않았으며 윤작을 통해서 관리하고 있다(Bathke 등, 2022). 또한 병원균 감염으로 인한 수율 또는 품질 손실은 아직 보고되지 않아 더 많은 연구와 정보 수집이 필요하다.

Bacillus spp. Bathke 등(2022)은 옥수수 세균성 잎줄무늬병 방제를 위해 미생물인 *Bacillus pumilus* R190과 *B. subtilis* 6051을 옥수수 종자에 처리하고, 호숙기까지 온실에서 재배한 후 병원균을 접종하였다. 병원균의 접종은 잎 표면에 병원균의 현탁액을 도말하는 방법과 잎에 병원균 현탁액을 분무하는 방법을 사용했고, 접종 14일 후에 병반을 조사하였다. *B. pumilus* R190 종자처리는 무처리구에 비해 잎 표면에 도말 시 85%, 현탁액 분무 시 56%의 병피해도를 감소시켰다. *B. subtilis* 6051 종자처리는 무처리구에 비해 잎 표면에 도말 시 32%, 현탁액 분무 시 52%까지의 병피해도를 감소시켰다. 이러한 보고는 근권 세균이 엽면 세균병을 억제하는 효과를 처음으로 보고한 결과로, 현재까지 방제방법이 거의 없는 세균성 잎줄무늬병에 친환경적 미생물 방제방법을 제시한 보고이다(Bathke 등, 2022).

옥수수 시들음병(Late Wilt Disease)

옥수수 시들음병은 토양 및 종자를 통해 시들음병(*Clavibacter nebraskensis*)이 매개 곰팡이(*Magnaportheopsis maydis*)에 의해 매개되어 발생하는 것으로 알려져 있는데, 이 그람 양성 세균 *C. nebraskensis*에 의해 유발된 시들음병은 곡물 수확량을 50% 이상 감소시킬 수 있다(Jackson 등, 2007; Jardine과 Clafin, 2016). 옥수수의 성장단계 중에서 옥수수의 이삭수염이 나오는 생장 초기 단계에서 성숙단계까지 발병하며 감염되면 빠른 시들음 증상으로 기주 조직의 현저한 생장 감소를 일으켜 생산성 및 경제적 손실을 야기한다(Osdaghi 등, 2022).

Trichoderma spp. Degani와 Dor (2021)은 해양과 토양에서 분리한 다양한 *Trichoderma* spp. 중 옥수수 시들음병에 대한 길항효과를 분석하여 *T. longibrachiatum* T7407과 *T. asperelloides* T203 두 종을 미생물 방제제로 선발하여 사용하였다. 미생물제제를 종자에 침지하여 병원균에 대한 길항 효과를 뿌리와 줄기 중량 등의 식물성장 매개 변수로 측정하고 개선효과를 확인하였다. 특히 옥수수 뿌리에서 병원균의 유전자 발현량을 quantitative real-time polymerase chain reaction으로 측정하여 옥수수 시들음병 병원균의 억제 효과를 관찰하였는데, 병원균만 감염된 대조구에 비해 *T. longibrachiatum* T7407은 5배, *T. asperelloides* T203은 1.9배의 병원균 DNA 존재를 감소시켰다(Degani와 Dor, 2021).

재배 포장 실험에서도 *T. longibrachiatum* T7407과 *T. asperelloides* T203을 옥수수 종자에 처리한 후 정식하였을 때 시들음병만 단독으로 처리한 대조구와 비교시 뿌리와 줄기 중량, 식물의 길이, 생장, 생산율 등이 효과적으로 개선되어, 건강한 식물 지수 비율이 병원균 감염식물의 경우 20%였으나, *T. longibrachiatum* T7407 처리 시 60%의 높은 건강 식물 지수 비율을 보였다(Degani와 Dor, 2021).

결 언

옥수수에 대한 식물병 방제는 일반적으로 화학농약으로 이루어지고 있다. 화학농약에 대한 전세계적 규제 강화와 친환경 농산물의 수요 증가 등의 사회적 요구에 따라 생물학적 방제가 화학농약의 대체제로 주목받고 있다. 미생물을 활용한 식물병 방제는 현재 생물학적 방제의 대표적인 방법이며 화학농약보다 안전한 방법으로 생각되고 있다. 하지만 화학농약보다 더 방제 효과가 좋은 미생물 농약을 확보하는 데 어려움이 있으며, 실제 적용시 방제 효과가 화학농약보다도 느리게 나타나기 때

문에, 다양한 접근을 통한 연구개발이 시급한 실정이다.

본 리뷰에서 다루었던 옥수수의 주요 병에 대한 미생물제제로 활용된 미생물로는 *Bacillus* spp., *Trichoderma* spp., *PaeniBacillus* spp., *Pseudomonas* spp. 등이 보고되었는데, 제품화 및 산업적 생산을 위해서는 *In vitro* 실험 결과와 더불어 안정된 포장 시험 결과 확보가 중요할 것이다. 또한 미생물농약의 지속성을 위한 제형 연구와 적용 방법에 대한 다양한 개발도 요구된다. 최근 농업 분야에서 드론 방제가 많이 이루어지면서 제제의 형태적인 변화도 일어나고 있는데, 드론 방제에도 적합한 미생물 농약에 대한 연구도 이루어져야 할 것이다. 길항미생물의 제형화를 위한 다양한 첨가 성분 연구와 합성 화학제에 길항미생물을 혼합 방제하는 방법은 확장형으로 보고되고 있는데, 안전성에 대한 충분한 분석과 연구가 필요 할 것이다. 안전하고 건강한 먹거리를 위한 생물학적 방제제로서의 미생물에 대한 확장성 있는 개발과 농업 현장 적용에 관한 지속적인 관심과 연구가 요구된다.

Conflicts of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgments

This work was supported by a grant from the Rural Development Administration (PJ0152782022).

References

- Anahosur, K. H. and Patil, S. H. 1980. Chemical control of sorghum downy mildew in India. *Plant Dis.* 64: 1004-1006.
- Azcón-Aguilar, C. and Barea, J. M. 1997. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens: an overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza* 6: 457-464.
- Bais, H. P., Park, S.-W., Weir, T. L., Callaway, R. M. and Vivanco, J. M. 2004. How plants communicate using the underground information superhighway. *Trends Plant Sci.* 9: 26-32.
- Bathke, K. J., Jochum, C. C. and Yuen, G. Y. 2022. Biological control of bacterial leaf streak of corn using systemic resistance-inducing *Bacillus* strains. *Crop Prot.* 155: 105932.
- Berg, G., Köberl, M., Rybakova, D., Müller, H., Grosh, R. and Smalla, K. 2017. Plant microbial diversity is suggested as the key to future biocontrol and health trends. *FEMS Microbiol. Ecol.* 95: fix050.
- Blacutt, A. A., Gold, S. E., Voss, K. A., Gao, M. and Glenn, A. E. 2018. *Fusarium verticillioides*: advancements in understanding the toxicity, virulence, and niche adaptations of a model mycotoxi-

- genic pathogen of maize. *Phytopathology* 108: 312-326.
- Bressan, W. and Figueiredo, J. E. F. 2007. Efficacy and dose-response relationship in biocontrol of *Fusarium* disease in maize by *Streptomyces* spp. *Eur. J. Plant Pathol.* 120: 311-316.
- Budi, S. W., van Tuinen, D., Arnould, C., Dumans-Gaudot, E., Gianinazzi-Pearson, V. and Gianinazzi, S. 2000. Hydrolytic enzyme activity of *PaeniBacillus* sp. strain B2 and effects of the antagonistic bacterium on cell integrity of two soil-borne pathogenic fungi. *Appl. Soil Ecol.* 15: 191-199.
- Castro del Ángel, E., Sánchez Arizpe, A., Galindo Cepeda, M. E. and Vázquez Badillo, M. E. 2020. Biological control of ear rot on maize genotypes with *Trichoderma* species. *Rev. Bio. Cienc.* 7: e965.
- Chandra Nayaka, C., Uday Shankar, A. C., Reddy, M. S., Niranjana, S. R., Prakash, H. S., Shetty, H. S. et al. 2009. Control of *Fusarium verticillioides*, cause of ear rot of maize, by *Pseudomonas fluorescens*. *Pest. Manag. Sci.* 65: 769-775.
- Chandra Nayaka, S., Niranjana, S. R., Uday Shankar, A. C., Niranjan Raj, S., Reddy, M. S., Prakash, H. S. et al. 2010. Seed biopriming with novel strain of *Trichoderma harzianum* for the control of toxigenic *Fusarium verticillioides* and *fumonisin* in maize. *Arch. Phytopathol. Plant Prot.* 43: 264-282.
- Chen, B., Han, H., Hou, J., Bao, F., Tan, H., Lou, X. et al. 2022. Control of maize sheath blight and elicit induced systemic resistance using *PaeniBacillus polymyxa* strain SF05. *Microorganisms* 10: 1318.
- Chet, I. & Inbar, J. 1994. Biological control of fungal pathogens. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 48: 37-43.
- Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C. and Barka, E. A. 2005. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 4951-4959.
- Dang, L., Li, G., Yang, Z., Luo, S., Zheng, X. and Zhang, K. 2010. Chemical constituents from the endophytic fungus *Trichoderma ovalisporum* isolated from *Panax notoginseng*. *Ann. Microbiol.* 60: 317-320.
- Degani, O. and Dor, S. 2021. *Trichoderma* biological control to protect sensitive maize hybrids against late wilt disease in the field. *J. Fungi* 7: 315.
- Djaenuddin, N., Sebayang, A., Nonci, N. and Muis, A. 2021. Compatibility of biocontrol agent formulas and synthetic fungicides in controlling maydis leaf blight on corn caused by *Bipolaris maydis*. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 911: 012062.
- Djaenuddin, N., Suriani and Muis, A. 2020. Effectiveness of *Bacillus subtilis* TM4 biopesticide formulation as biocontrol agent against maydis leaf blight disease on corn. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 484: 012096.
- Fandohan, P., Hell, K., Marasas, W. F. O. and Wingfield, M. J. 2003. Infection of maize by *Fusarium* species and contamination with fumonisin in Africa. *Afr. J. Biotechnol.* 2: 570-579.
- Figuerola-López, A. M., Cordero-Ramírez, J. D., Martínez-Álvarez, J. C., López-Meyer, M., Lizárraga-Sánchez, G. J., Félix-Gastélum, R. et al. 2016. Rhizospheric bacteria of maize with potential for biocontrol of *Fusarium verticillioides*. *Springerplus* 5: 330.
- Glick, B. R. 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Can. J. Microbiol.* 41: 109-117.
- Golob, P., Kutukwa, N., Devereau, A., Bartosik, R. E. and Rodríguez, J. C. 2004. Maize. In: Crop Post-harvest: Science and Technology. Vol. 2. Durables, eds. by R. Hodges and G. Farrell, pp. 26-59. Blackwell Publishing Ltd., Ames, IA, USA.
- Gruber, S., Omann, M., Rodríguez, C. E., Radebner, T. and Zeilinger, S. 2012. Generation of *Trichoderma atroviride* mutants with constitutively activated G protein signaling by using genetic in resistance as selection marker. *BMC Res. Notes* 5: 641.
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I. and Lorito, M. 2004. *Trichoderma* species: opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nat. Rev. Microbiol.* 2: 43-56.
- Heimpel, G. E. and Mills, N. J. 2017. Biological Control: Ecology and Applications. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 386 pp.
- Hernández-Rodríguez, A., Heydrich-Pérez, M., Acebo-Guerrero, Y., Velázquez-del Valle, M. G. and Hernández-Lauzardo, A. N. 2008. Antagonistic activity of Cuban native rhizobacteria against *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenb. in maize (*Zea mays* L.). *Appl. Soil. Ecol.* 39: 180-186.
- Hung, R., Lee, S. & Bennett, J. W. 2013. *Arabidopsis thaliana* as a model system for testing the effects of *Trichoderma* volatile organic compounds. *Fungal Ecol.* 6: 19-26.
- Isakeit, T. and Jaster, J. 2005. Texas has a new pathotype of *Peronosclerospora sorghi*, the cause of sorghum downy mildew. *Plant Dis.* 89: 529.
- Jackson, T. A., Harveson, R. M. and Vidaver, A. K. 2007. Reemergence of Goss's wilt and blight of corn to the central high plains. *Plant Health Prog.* Online publication. <https://doi.org/10.1094/PHP-2007-0919-0>.
- Jardine, D. J., and Clafflin, L. E. 2016. Goss's bacterial wilt and leaf blight. In: Compendium of Corn Diseases, eds. by G. P. Munkvold and D. G. White, 4th ed., p. 165. APS Press, St. Paul, MN, USA.
- Khosravi, A. R., Mansouri, M., Bahonar, A. R. and Shokri, H. 2007. Mycoflora of maize harvested from Iran and imported maize. *Pak. J. Biol. Sci.* 10: 4432-4437.
- Kutawa, A. B., Ahmad, K., Ali, A., Hussein, M. Z., Wahab, M. A. A. and Sijam, K. 2021. State of the art on southern corn leaf blight disease incited by *Cochliobolus heterostrophus*: detection, pathogenic variability and novel control measures. *Bulg. J. Agric. Sci.* 27: 147-155.
- Lee, S., Hung, R., Yap, M. and Bennett, J. W. 2015. Age matters: the effects of volatile organic compounds emitted by *Trichoderma atroviride* on plant growth. *Arch. Microbiol.* 197: 723-727.
- Lee, S., Yap, M., Behringer, G., Hung, R. and Bennett, J. W. 2016. Volatile organic compounds emitted by *Trichoderma* species mediate plant growth. *Fungal Biol. Biotechnol.* 3: 7.
- Lerda, P., Blaggi, M. B., Peralta, N., Ychari, S., Vazquez, M. and Bosio, G. 2005. *Fumonisin* in foods from Cordoba (Argentina), presence and genotoxicity. *Food Chem. Toxicol.* 43: 691-698.

- Li, B., Kong, L., Qiu, D., Francis, F. and Wang, S. 2021. Biocontrol potential and mode of action of entomopathogenic bacteria *Xenorhabdus budapestensis* C72 against *Bipolaris maydis*. *Biol. Control* 158: 104605.
- López-Mondéjar, R., Ros, M. and Pascual, J. A. 2011. Mycoparasitism-related genes expression of *Trichoderma harzianum* isolates to evaluate their efficacy as biological control agent. *Biol. Control* 56: 59-66.
- Maloy, O. C. 2005. Plant disease management. *Plant Health Instr.* Online publication. <https://doi.org/10.1094/PHI-I-2005-0202-01>.
- Marasas, W. F. 1995. *Fumonisin*s: their implications for human and animal health. *Nat. Toxins* 3: 193-198.
- Marin, S., Homedes, V., Sanchis, V., Ramos, A. J. and Magan, N. 1999. Impact of *Fusarium moniliforme* and *F. proliferatum* colonisation of maize on calorific losses and fumonisin production under different environmental conditions. *J. Stored Prod. Res.* 35: 15-26.
- Meena, B., Marimuthu, T., Vidyasekaran, P. and Velazhahan, R. 2001. Biological control of root rot of groundnut with antagonistic *Pseudomonas fluorescens* strains. *J. Plant Dis. Prot.* 108: 369-381.
- Miedaner, T. and Juroszek, P. 2021. Global warming and increasing maize cultivation demand comprehensive efforts in disease and insect resistance breeding in north-western Europe. *Plant Pathol.* 70: 1032-1046.
- Muis, A. and Quimio, A. J. 2006. Biological control of banded leaf and sheath blight disease (*Rhizoctonia solani* Kuhn) in corn with formulated *Bacillus subtilis* BR23. *Indones. J. Agric. Sci.* 7: 1-7.
- Munkvold, G. P. 2003. Epidemiology of *Fusarium* diseases and their mycotoxins in maize ears. *Eur. J. Plant Pathol.* 109: 705-713.
- Ons, L., Bylemans, D., Thevissen, K. and Cammue, B. P. A. 2020. Combining biocontrol agents with chemical fungicides for integrated plant fungal disease control. *Microorganisms* 8: 1930.
- Osdaghi, E., Robertson, A. E., Jackson-Ziems, T. A., Abachi, H., Li, X. and Harveson, R. M. 2022. *Clavibacter nebraskensis* causing Goss's wilt of maize: five decades of detaining the enemy in the new world. *Mol. Plant Pathol.* Online publication. <https://doi.org/10.1111/mpp.13268>.
- Pal, K. K. and Gardener, B. M. 2006. Biological control of plant pathogens. *Plant Health Instr.* Online publication. <https://doi.org/10.1094/PHI-A-2006-1117-02>.
- Pechanova, O. and Pechan, T. 2015. Maize-pathogen interactions: an ongoing combat from a proteomics perspective. *Int. J. Mol. Sci.* 16: 28429-28448.
- Pertot, I., Alabouvette, A., Hinarejos, E. and Franca, S. 2015. The Use of Microbial Biocontrol Agents against Soil-Borne Diseases. *Epi-Agri, Agriculture & Innovation*, Brussels, Belgium. 11 pp.
- Piyaboon, O. 2022. Efficacy of *Chaetomium globosum* as biological control agents for controlling leaf blight of corn. *NU. Int. J. Sci.* 19: 1-8.
- Ragsdale, N. N., Hylín, J. W., Sisler, H. D., Witt, J. M. and Alford, H. 1991. Health and environmental factors associated with agricultural use of fungicides. USDA/States National Pesticide Impact Assessment Program Fungicide Assessment Project 117. URL <http://cipm.ncsu.edu/piappud/> [8 November 2022].
- Ruiz, N., Wielgosz-Collin, G., Poirier, L., Grovel, O., Petit, K. E., Mohamed-Benkada, M. et al. 2007. New Trichobranchins, 11-residue peptaibols from a marine strain of *Trichoderma longibrachiatum*. *Peptides* 28: 1351-1358.
- Saravanakumar, K., Li, Y., Yu, C., Wang, Q.-Q., Wang, M., Sun, J. et al. 2017. Effect of *Trichoderma harzianum* on maize rhizosphere microbiome and biocontrol of *Fusarium* stalk rot. *Sci. Rep.* 7: 1771.
- Sartori, M., Nesci, A., Formento, Á. and Etcheverry, M. 2015. Selection of potential biological control of *Exserohilum turcicum* with epiphytic microorganisms from maize. *Rev. Argent. Microbiol.* 47: 62-71.
- Sartori, M., Nesci, A., Montemarani, A., Barros, G., García, J. and Etcheverry, M. 2017. Preliminary evaluation of biocontrol agents against maize pathogens *Exserohilum turcicum* and *Puccinia sorgh* in field assays. *Agric. Sci.* 8: 1003-1013.
- Schafer, K. S. and Kegley, S. E. 2002. Persistent toxic chemicals in the US food supply. *J. Epidemiol. Community Health* 56: 813-817.
- Seyi-Amole, D. O. and Onilude, A. A. 2021. Microbiological control: a new age of maize production. In: *Cereal Grains*, ed. by A. K. Goyal. Intech Open, London, UK.
- Shahbandeh, M. 2020. Corn: statistics & Facts. URL http://www.statista.com/#dossierSummary_chapter4/ [8 November 2022].
- Shifa, H., Gopalakrishnan, C. and Velazhahan, R. 2015. Efficacy of *Bacillus subtilis* G-1 in suppression of stem rot caused by *Sclerotium rolfsii* and growth promotion of groundnut. *Int. J. Agric. Environ. Biotechnol.* 8: 111-118.
- Shoda, M. 2002. Bacterial control of plant diseases. *J. Biosci. Bioeng.* 89: 515-521.
- Sireesha, Y. and Velazhahan, R. 2015. Biological control of downy mildew of maize caused by *Peronosclerospora sorghi* under environmentally controlled conditions. *J. Appl. Nat. Sci.* 8: 279-283.
- Sitara, U. and Akhter, S. 2007. Efficacy of fungicides, sodium hypochlorite and neem seed powder to control seed borne pathogens of maize. *Pak. J. Bot.* 39:285-292.
- Stockmann-Juvala, H. and Savolainen, K. 2008. A review of the toxic effects and mechanisms of action of fumonisin B1. *Hum. Exp. Toxicol.* 27: 799-809.
- Sturz, A. and Christie, B. R. 2003. Beneficial microbial allelopathies in the root zone: the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil Tillage Res.* 72: 107-123.
- Voss, K. A., Smith, G. W. and Haschek, W. M. 2007. *Fumonisin*s: toxicokinetics mechanism of action and toxicity. *Anim. Feed Sci. Technol.* 137: 299-325.
- Wang, M., Ma, J., Fan, L., Fu, K., Yu, C., Gao, J. et al. 2015. Biological control of southern corn leaf blight by *Trichoderma atroviride* SG3403. *Biocontrol Sci. Technol.* 25: 1133-1146.