



# 기후 변화와 영양 스트레스 관점에서 본 벼 깨씨무늬병(*Bipolaris oryzae*)의 재출현

## Re-Emergence of Rice Brown Spot Disease Caused by *Bipolaris oryzae*: Interaction between Climate Variability and Nutritional Stress

### \*Corresponding author

Tel: +82-61-750-5187

Fax: +82-61-750-5187

E-mail: spark@scnu.ac.kr

ORCID

<https://orcid.org/0000-0001-7258-6977><https://orcid.org/0000-0003-1267-1111>정현정<sup>1</sup> · 박숙영<sup>2,3\*</sup> <sup>1</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 기초식량작물부 작물환경과, <sup>2</sup>순천대학교 식물의학과,<sup>3</sup>순천대학교 IT-Bio 융합시스템(BK21 plus) 협동과정Hyunjung Chung<sup>1</sup> and Sook-Young Park<sup>2,3\*</sup> <sup>1</sup>Crop Environment Research Division, National Institute of Crop and Food Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea<sup>2</sup>Department of Plant Medicine, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea<sup>3</sup>Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System (BK21 plus), Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

Rice brown spot, caused by *Bipolaris oryzae* (syn. *Helminthosporium oryzae*; sexual stage *Cochliobolus miyabeanus*), has re-emerged as a major threat to rice production in Asia, particularly under climate-induced environmental instability. Long recognized as a stress-associated disease, brown spot is tightly regulated by interactions among temperature, humidity, rainfall, leaf wetness duration, and host nutritional status. Recent shifts in seasonal rainfall patterns, rising nighttime temperatures, and increasingly frequent periods of high humidity have created microclimatic conditions that strongly favor pathogen infection, lesion expansion, and sporulation. In parallel, chronic nutrient imbalances in intensively cultivated paddy soils—especially suboptimal availability of nitrogen, phosphorus, potassium, silicon, and key micronutrients—enhance host susceptibility and accelerate foliar senescence, thus creating a physiological niche highly conducive to *B. oryzae*. In 2025, unusually severe brown spot epidemics were reported across the southern rice-growing regions of Korea, coinciding with extreme rainfall events, prolonged overcast conditions, high relative humidity, and clear evidence of nutrient depletion in long-term rice systems. This mini-review synthesizes current advances in our understanding of pathogen biology, climate drivers, and nutritional ecology, places Korea's recent outbreaks in a global context of brown spot re-emergence, and discusses plausible mechanisms linking climate and nutrient stress to disease epidemics. Finally, we argue for integrative climate-nutrient-pathogen frameworks and climate-smart nutrient management as central components of future brown spot mitigation strategies.

**Keywords:** *Bipolaris oryzae*, Brown spot disease, Climate change, Microclimate, Nutrient balance

Received December 9, 2025

Revised December 14, 2025

Accepted December 15, 2025

## 서론

벼(*Oryza sativa* L.)는 전 세계의 식량 안보에 중요한 식량 작물로, 아시아-아프리카 인구의 절반 이상의 주요 영양 공급

Research in Plant Disease

eISSN 2233-9191

[www.online-rpd.org](http://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.

원이다(Mohidem 등, 2022; Nguyen, 2002; Rezvi 등, 2022). Food and Agriculture Organization (2023)에 따르면 전 세계 벼 생산량은 연간 5억 톤 이상이지만, 기후 변화로 인한 병해충에 의한 피해 증가는 안정적 생산을 위협하고 있다(Hue 등, 2025). 위협적인 병해 중 벼 깨씨무늬병(brown spot disease)은 20세기 초부터 기록된 대표적인 기후에 의존적인 병으로, 전 세계 벼 생산의 1-34%의 손실을 일으킬 수 있는 잠재적 피해 병원균으로 생각되고 있다(Ham 등, 2011; Kaboré 등, 2025; Savary 등, 2011).

역사적으로 벼 깨씨무늬병 *Bipolaris oryzae*의 피해는 1918년 인도 벵골 대기근(Great Bengal Famine)에서 큰 피해를 입혀 200만 명이 아사했다는 기록과 더불어 역사적 피해사례와 파급력이 크다(Ou, 1985). 19세기 말 일본, 중국, 동남아 등지에서 보고된 이후, 전 세계 벼 재배지에서 간헐적이지만 지속적으로 대유행을 일으켜 왔다. 특히 이상 기후(가뭄, 고온)와 토양 영양 결핍이 겹친 시기에 대기근을 초래하며, 경제, 사회 및 보건 위기에 기여해 왔다(Savary 등, 2019). 이 병으로 인한 수확량 손실은 감수성 품종, 환경 조건 및 영양 상태에 따라 다르며, 벼의 전 생육기에 나타나 수확량 감소가 5-45%까지 발생할 수 있다고 보고하고 있다(Barnwal 등, 2013; Choudhury 등, 2019; Estrada, 1984; Kamal과 Mia, 2009; Padmanabhan, 1973; Webster와 Gunnell, 1992).

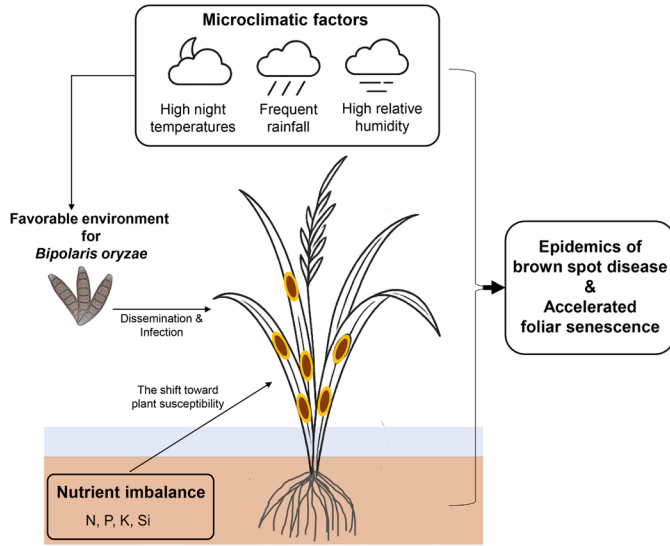
벼 깨씨무늬병균 *B. oryzae*는 Pleosporales에 속하며, 유성세대 명칭인 *Cochliobolus miyabeanus*로도 알려져 있다. 아직까지 무성세대와 유성세대 명칭이 둘 다 사용되고 있다. *B. oryzae*는 포자가 바람을 통해 장거리 이동하며 25-30°C 고온과 장기 습윤 조건에서 포자 발아와 균사 생장이 가장 활발하다(Kaboré 등, 2025). 최근 게놈(genome) 해독 결과, 폴리케타이드 합성(polyketide synthase), 비리보솜 펩타이드 합성(non-ribosomal peptide synthetase), reactive oxygen species-항산화 시스템, mitogen-activated protein kinase signaling 신호경로 등 스트레스 반응과 독소 생산 관련 유전자가 확장되어 있음이 보고되었으며(Wang 등, 2025), 이는 기후 변화와 같은 복합 환경 스트레스에 대해 유연한 적응력을 시사한다고 보고하였다. 또한 지역 및 품종 간 집단유전학 연구에서 높은 반수체 타입(haploid type) 다양성과 재조합 빈도가 보고되어, 병원균이 재배지와 품종 선택압 변화에 따라 빠르게 분화할 수 있음을 제시하였다(Kaboré 등, 2022).

기후 변화가 벼 깨씨무늬병의 발병과 확산을 촉진하는 주요 메커니즘은 다음과 같다. 1) 온도 상승 및 야간 고온이 가장 크게 기여하는 요인으로, 병원균의 포자 발아 속도와 잠복 기간 단축, 기주의 호르몬 방어(살리실산, 자스모네이트 경로) 억제

(Cao 등, 2024; Liang 등, 2022)가 제시되고 있다. 2) 강수-습도 패턴 변화의 경우도 기여할 수 있는데, 비가 지속적으로 내리는 장마 기간이 장기적으로 유지되거나 국지적으로 지속적인 호우에 따른 엽면 습윤 지속, 습윤-건조 반복으로 인한 포자 확산 강화(Hue 등, 2025; Percich 등, 1997)가 그 메커니즘 중 하나일 수 있다. 3) 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 증가이다. 병원균의 독성 대사산물 합성 촉진과 기주의 규산-칼슘 흡수 감소(Dallagnol 등, 2009; Dhingra와 Sinclair, 1995)가 영향을 미칠 수 있다. 4) 마지막으로, 가뭄-토양 영양 불균형일 가능성이 있다. 세포벽 방어 약화, 토양 길항 미생물 감소, 병원균 정착 용이화(Adzigbe 등, 2025; Andreo-Jimenez 등, 2019; Bidzinski 등, 2016)가 그 예제이다. 이 중 영양 관리, 특히 질소(N), 칼륨(K), 인(P), 규소(Si) 시비가 병 발생에 미치는 영향이 중요한 연구 주제로 부상하고 있다(Kaboré 등, 2025).

최근 농림축산식품부 정밀조사에 따르면 지난 10년간 벼 깨씨무늬병 발생 면적은 연 평균 약 1.6만 ha 수준이었으나, 2025년에는 9월 16일 기준 2.97만 ha, 10월 1일 기준 약 3.6만 ha까지 급증한 것으로 보고되었다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2025a, 2025b). 발생은 전남 해안, 충남, 경북, 전북 등 남부-서해안 저지대에 집중되었으며, 농촌진흥청 국립식량과학원은 이번 대발생이 7-8월 이상 고온과 9월 잦은 강우, 시간당 100 mm 이상의 집중호우로 인한 토양 양분 유실, 출수기 이후 질소-규산-인산 불균형, 연작에 의한 지력 저하와 품종 편중 등이 복합적으로 작용한 결과로 평가하고 있다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2025a, 2025b; Rural Development Administration, 2025). 정부와 지자체는 벼 깨씨무늬병을 농업 재해로 공식 인정하고 피해 조사를 실시하는 한편, 드론-위성 기반 정밀 예찰, 병 발생 원인에 대한 기상-토양 분석, 저항성 품종 육성 및 양분 관리 지침 보급 등을 포함하는 '기후 변화형 병해충 관리 체계'를 확대하고 있으나, 복합 기후 시나리오를 반영한 정량적 발병 예측 모델과 경제성 분석은 아직 초기 단계에 머물러 있다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2025a, 2025b; Rural Development Administration, 2025).

본 리뷰 논문은 기후 변화와 벼 깨씨무늬병 그리고 토양 영양 불균형과 벼 깨씨무늬병에 대하여 종합적으로 고찰하여, 기후 변화 하에서 벼 생산의 지속 가능성을 확보하기 위한 과학적-정책적 근거를 제시하는 것을 목표로 하였다. 특히 최근 한국에서 관찰된 벼 깨씨무늬병의 빠른 확산 양상을 기존에 보고된 연구 결과를 기반으로 해석하고, 병 발생에 관여하는 주요 발생 요인 간의 상호작용을 정리한 개념적 모식도를 Fig. 1에 제시하였다.



**Fig. 1.** Conceptual model of climate-nutrient-host-pathogen interactions driving rice brown spot epidemics. The diagram summarizes how climate stressors (high temperature, altered rainfall, prolonged humidity, and extended leaf wetness) and soil nutrient imbalances (notably N, P, K, Si deficiencies) weaken host physiological resilience and enhance infection and sporulation by *Bipolaris oryzae*. The convergence of these factors increases host susceptibility and accelerates brown spot development, emphasizing the need for integrated climate-smart nutrient and disease-management strategies.

## 기후 변화와 벼 깨씨무늬병

**온도 상승과 야간 고온이 *B. oryzae*의 병리·유전·생리에 미치는 영향.** 고온은 *B. oryzae*의 감염 및 병진전을 촉진하는 대표적인 환경 요인으로 알려져 있다. Percich 등(1997)은 온도와 엽면 습윤 기간을 달리한 접종 실험에서 25-30°C 구간에 포자 발아와 감염률이 가장 높고, 높은 온도와 장기간 습윤 조건이 복합될수록 병징 출현이 빨라진다고 보고하였다. 또한 Amorio와 Cumagun (2017)은 *B. oryzae*를 포함한 *Bipolaris* spp.가 고온 조건에서 침입사(haustoria-like structure) 형성 및 균사 정착이 증가하며 감수성 품종에서 병반 확산 속도가 빨라지는 경향을 보인다고 제시하였다.

야간 고온은 벼의 기공 개폐 리듬을 교란해 세포 수분 상태를 불안정하게 만들고, 살리실산(salicylic acid)과 자스모네이트(jasmonic acid) 신호 신호경로의 상호작용을 변화시킨다(Cao 등, 2024). 이로 인해 기주가 선천 면역 반응을 빠르게 활성화하지 못하고, 병원균의 초기 침입이 용이해질 수 있다. 또한, 고온의 지속은 규산 흡수 및 세포벽 리그닌화(lignification)를 억제하여 기계적 방어를 약화시킬 수 있다.

주요 아시아 국가의 병역학 연구는 고온 조건이 벼 깨씨무늬

병의 발병을 유의하게 증가시키는 주요 인자임을 일관되게 보여준다. Percich 등(1997)은 온도 상승과 장기간 엽면 습윤이 결합될수록 *B. oryzae*의 감염률과 병반 형성 속도가 뚜렷하게 증가한다고 보고하였으며, Amorio와 Cumagun (2017) 또한 고온 환경이 *Bipolaris* spp.의 균사 정착과 병반 확산을 촉진한다고 제시하였다.

아시아 지역 장기 모니터링 자료에서도 비슷한 경향이 나타난다. 예를 들어 인도와 동남아 벼 재배지에서는 고온-고습 조건이 지속되는 해에 벼 깨씨무늬병 발생이 급증하며, 가뭄-고온 복합 스트레스가 병원균의 잠복기 단축 및 발병 심화를 유발한다는 보고가 있었다(Savary 등, 2019).

한국에서도 동일한 패턴이 관찰된다. 2023-2025년 여름철 장마 지연 및 이상 고온 기간(7-8월) 동안 남부·서해안 평야지대에서 벼 깨씨무늬병 발생 면적이 예년 대비 크게 증가하였으며, 농촌진흥청은 이를 고온-다습 환경, 집중호우에 따른 양분 유실, 생육 후기 고온 조건의 복합 영향으로 분석하였다(Rural Development Administration, 2025). 이러한 결과는 기온 상승이 벼 깨씨무늬병 발생을 가속화하는 세계적 경향과 일치한다.

**강우 및 습도 패턴의 변화: 엽면 미세기후와 전염 역학.** Percich 등(1997)은 야생벼를 대상으로 한 시험에서, 25-30°C에서 엽면이 16-28시간 연속적으로 젖어 있을 때 *B. oryzae*의 병반 밀도(lesions cm<sup>-2</sup>)가 급격히 증가하며, 짧은 습윤 시간(2-6시간)이나 중간에 건조 기간이 끼어들 경우 감염 효율이 크게 감소한다고 보고하였다(Barnwal 등, 2013; Percich 등, 1997).

최근 논문들에서도 벼 깨씨무늬병은 25-30°C의 온도, 상대 습도 85% 이상, 연속 강우-젖은 이슬-흐린 날씨 등으로 인해 벼 잎이 장시간 젖어 있는 조건에서 가장 심하게 발생하는 것으로 보고하고 있으며, 이러한 기상 조건이 아시아 몬순 지역에서 빈번하다고 제시하였다(Barnwal 등, 2013; Bhutia 등, 2025; Imran 등, 2020). 동아시아 몬순 기후권에 속하는 한국의 장마기에도 장기간 강우와 고습으로 인해 벼 잎과 수관 내부의 엽면 습윤 기간이 길어져, 실험실에서 규명된 고위험 조건과 유사한 미세기후가 형성될 가능성이 높다(Barnwal 등, 2013; Sudhasa 등, 2022).

**대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 증가와 병원균 대사 네트워크.** 대기 CO<sub>2</sub> 농도 증가가 벼-병원균 상호작용에 영향을 준다는 연구가 보고되었다. 예를 들어, da Rosa Dorneles 등(2020)은 700 ppm CO<sub>2</sub> 처리에서 벼의 잎 구조, 광합성, 탄수화물 축적 등이 변화하였고, 그 결과 *Bipolaris oryzae*-유래 벼 깨씨무늬병의 증상의 심각도가 오히려 줄어들었다고 보고하였다. 그러나 CO<sub>2</sub> 증가가 병원균의 독

소 대사나 토양/식물체 내 무기성분(규소, 칼슘 등) 흡수에 어떤 영향을 주는지는 명확하게 보고된 바 없다. 따라서 CO<sub>2</sub> 변화의 작물 병해에 대한 영향은 여전히 비결정적이며, 병원성과 식물 영양-구조 변화를 동시에 고려한 추가 연구가 필요하다.

## 토양 영양 불균형과 벼 깨씨무늬병

**질소와 벼 깨씨무늬병.** 여러 포장 연구들은 질소 시비량이 과도할 때 벼 깨씨무늬병의 발생률과 병 심각도(disease severity)가 증가한다는 사실을 보고하였다. Kumar 등(2024)은 질소를 120 kg/ha 투입한 처리구에서 벼 깨씨무늬병의 병 심각도가 가장 높게 관찰되었고, 동시에 수량은 감소하였다고 보고하였다. 반면, 퇴비(well-decomposed farmyard manure) 투입, 줄파종(line sowing) 및 분할 질소 시비(split application)와 같은 경종적 관리법을 병행한 처리구에서는 병 발생이 감소하고 수량이 안정화되는 결과도 제시되었다(Kumar 등, 2024). 이러한 결과는 과다 질소 공급이 벼의 조직 연약화 및 방어 반응 저하를 초래하여 병감수성을 높일 수 있다는 이전 기술된 가설을 지지한다(Agrios, 2005).

그러나 “무질소(non-N) 또는 질소 결핍” 환경에서도 오히려 병 발생이 증가하는 경우가 보고되면서, 질소량만으로 벼 깨씨무늬병 발생을 예측하기 어렵다는 점도 강조되고 있다. Yea 등(2009)은 국내 논 포장에서 병 발생이 심한 지역일수록 토양의 질소뿐 아니라 유효인산, 치환성 칼륨, 규산 등 다른 무기성분까지 전반적으로 낮았다고 보고하였다. 반대로 토양 무기성분이 균형 있게 유지된 논에서는 병 발생이 상대적으로 적게 나타났다(Yea 등, 2009). 이는 질소 과다뿐 아니라 질소 결핍 역시 벼의 생리적 약화를 초래하여 병에 대한 감수성을 증가시킬 수 있음을 보여준다.

질소 시비량이 벼 깨씨무늬병 발생에 영향을 미친다는 보고는 오래 전부터 제시되어 왔으나, 그 효과는 시비량 자체보다 시비 방식(timing, split application) 및 다른 영양소와의 균형에 의해 크게 달라지는 경향이 있다. Sunder 등(2005)은 질소 수준(0-180 kg/ha)을 달리한 포장 시험에서 일부 품종에서는 질소 증가가 벼 깨씨무늬병 발생을 억제하기도 하고, 다른 품종에서는 오히려 증가시키는 등 질소의 효과가 품종-환경에 따라 이중적임을 보고하였다. 또한 분할 시비(split N)가 단회 시비보다 병 발생을 유의하게 감소시키는 효과가 있음을 제시하여, 질소의 공급 방식이 병 발생 조절에 중요한 요소임을 보여주었다(Sajjad 등, 2025; Sunder 등, 2005).

더불어 칼륨(K)과의 상호작용도 벼 깨씨무늬병 발생에 큰 영향을 미친다. Carvalho 등(2010)은 질소-칼륨(N-K) 비율이 병

심각도와 이병엽률에 직접적으로 영향을 미치며, 특히 고질소-저칼륨 조건에서 병 발생이 현저히 증가한다고 보고하였다(Carvalho 등, 2010). 이러한 연구들은 질소 시비량 자체보다 여러 영양소 간 상호작용(multinutrient interaction), 특히 질소-칼륨-규소-인의 균형이 벼 깨씨무늬병의 역학을 결정하는 핵심 요인임을 시사한다.

종합적으로 볼 때, 벼 깨씨무늬병의 안정적 관리와 지속 가능한 생산을 위해서는 단순히 질소량을 줄이거나 늘리는 방식에서 벗어나, 적정 질소 시비, 분할 시비, 시기 조절, 다른 영양소와의 균형(Si, K, P 등), 토양 상태 개선을 통합한 관리 전략이 필요하다. 질소의 과다와 결핍 모두 병 발생을 악화시킬 수 있다는 점에서, 향후 연구에서는 토양 영양-기후-병원균 상호작용을 고려한 정밀 질소 관리(precision N management)가 핵심적일 것으로 보인다(Kaboré 등, 2025).

**칼륨과 벼 깨씨무늬병.** Carvalho 등(2010)의 질소(N)-칼륨(K) 요인 실험에서 이들은 벼 포장에서 질소와 칼륨 시비 수준을 조합하여 처리한 후, 벼 깨씨무늬병의 병 심각도와 수량 반응을 분석하였다. 그 결과, 낮은 칼륨 수준에서는 질소 증가와 함께 벼 깨씨무늬병의 병반 지수와 병진전이 증가하는 경향을 보였으나, 충분한 칼륨을 동시에 공급할 경우 높은 질소 조건에서도 병 심각도가 완화되고 식물 생육과 수량이 개선되는 양상을 보고하였다(Carvalho 등, 2010). 이 결과는 칼륨이 단순히 결핍 시 위험 요인일 뿐 아니라, 높은 질소 환경에서 발생하는 생리적 스트레스를 완충하여 *B. oryzae*에 대한 저항성을 회복시키는 조절 인자로 작용할 수 있음을 시사한다.

최근에는 칼륨 자체가 *B. oryzae* 저항성을 매개하는 핵심 인자라는 점을 직접적으로 입증한 연구도 보고되고 있다. Silva 등(2024)은 잎의 칼륨 농도가 낮을수록 벼가 *B. oryzae* 감염에 대해 더 높은 저항성을 보였다고 하였다. 구체적으로, 잎 칼륨 농도가 낮은 처리구에서는 항산화 효소 활성, 페놀 화합물 축적 등이 활발하여 병징이 경미하였고, 반대로 칼륨 농도가 높은 처리구에서는 병 심각도가 더 컸다(Silva 등, 2024). 저자들은 칼륨의 공급이 잎 조직의 칼륨 축적과 더불어 일부 방어 관련 지표(항산화 활성, 스트레스 마커 등)의 개선과 연계된다는 점을 근거로, 칼륨이 벼 깨씨무늬병과 벼의 상호작용에서 중요한 영양 기반 방어 요소라고 제안하였다.

Yea 등(2009)의 논문에서는 논에 벼 깨씨무늬병이 심한 포장일수록 인산, 칼륨, 규산 등 다량원소와 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg) 등 미량원소가 동시에 결핍된 토양과 맞물려 있었으며, 이러한 낮은 비료 조건이 벼 깨씨무늬병과 여러 벼의 병해(“nibbler disease”) 발생을 촉진한다고 보고하였다.

예를 들어, 말레이시아에서는 토양 개량을 위해 실리카(silicon) 기반 비료 또는 쌀겨재(rice husk ash)를 적용한 결과, 벼 깨씨무늬병의 병 심각도가 유의하게 감소했다는 보고가 있다. 이러한 연구들은 토양 무기영양, 특히 적절한 규소와 칼륨을 포함한 균형 시비가 벼 깨씨무늬병 예방에 유용할 수 있음을 시사한다. 다만, '토양의 전반적 저비옥도'와 병 발생을 직접적으로 통계 분석한 연구는 드물기 때문에, 이 부분은 향후 추가 연구가 필요하다(Mahmad-Toher 등, 2022). 이 연구에서는 벼 깨씨무늬병 발생 논의 칼륨을 비롯한 규소(Si), 망간(Mn), 철(Fe), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg) 등이 전반적으로 영양분의 함량이 낮은 토양과 연관된다고 보고하였다(Mahmad-Toher 등, 2022).

연구 결과들을 종합하면, 벼 깨씨무늬병과 칼륨의 상관관계는 단순한 “칼륨 과다/과소” 차원을 넘어, 1) 칼륨 결핍 또는 질소 대비 상대적 칼륨 부족 상태에서 병 심각도가 증가하고, 2) 높은 질소 조건에서 충분한 칼륨 공급은 병 발생을 완화하며, 3) 칼륨을 포함한 다수 영양소의 결핍이 동반되는 낮은 저비옥 토양에서 벼 깨씨무늬병이 만성적으로 문제화될 수 있다고 할 수 있다(Barnwal 등, 2013; Carvalho 등, 2010; Mahmud-Toher 등, 2022; Yea 등, 2009).

따라서 벼 깨씨무늬병 관리에서 칼륨 시비는 독립적인 “방제 수단”이라기보다, 질소·규소·인산 등 다른 영양소와의 균형을 통해 벼의 생리와 방어능을 조절한다고 할 수 있다. 이러한 연구 결과들은 벼 깨씨무늬병의 통합 관리 전략에 중요한 시사점을 제공한다. 우선, 토양 검정을 기반으로 한 적정 칼륨 시비와 질소-칼륨의 비율 조절은 벼 깨씨무늬병에 대한 기본 저항성(general defence) 확보에 필수적이며, 높은 질소-낮은 칼륨 또는 전반적 저비옥 상태를 피하는 것이 중요하다(Carvalho 등, 2010; Kaboré 등, 2025).

또한, 칼륨 공급은 규소 시비, 적정 질소 관리, 병 저항성 품종 사용, 재배 환경 개선(배수·수분·밀도 조절 등)과 결합될 때 가장 큰 효과를 나타낼 것으로 예상되며, 벼 깨씨무늬병이 재출현하고 있는 기후 변화 환경에서 칼륨 기반 영양 관리가 중요하게 고려되어야 한다.

**인산과 벼 깨씨무늬병.** 벼 깨씨무늬병은 다량 무기양분 결핍이 병 발생을 조장하는 주요 요인으로 지목되어 왔다. 국내 포장 연구에서 Yea 등(2009)은 벼 깨씨무늬병 발생이 심한 논에서 유효인산(available P), 치환성 칼륨(K), 유효규산(Si), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg) 등 주요 무기양분이 전반적으로 낮았으며, 반대로 인산을 포함한 토양 비옥도가 양호한 포장에서는 병 심각도가 낮았음을 보고하였다. 이러한 결과는 인산이 벼의 생리적 안정성 및 기저 방어력 유지에 기여하며, 인산 결핍이 벼 깨

씨무늬병의 간접적 위험 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다.

그러나 인산(P)은 깨씨무늬병 발생을 단독으로 결정짓는 요인이라기보다는 칼륨(K), 규소(Si), 칼슘(Ca) 등 다른 무기양분과 함께 작용하는 복합적 토양비옥도 요소의 일부로 해석하는 것이 타당하다. 최근 일부 리뷰에서는 벼 깨씨무늬병이 단일 인(P) 결핍보다는 질소(N)·인(P)·칼륨(K)·규소(Si)·망간(Mn) 등 다수 무기양분 결핍이 동반된 저비옥 토양과 ‘스트레스받는 벼’의 생리 상태와 더 밀접히 연관된다고 정리하였다(Barnwal 등, 2013; Bhatia 등, 2025), 벼 깨씨무늬병은 오랫동안 빈약한 토양 비옥도의 지표(disease indicator)로 간주되어 왔으며, 여러 무기원소들이 상호작용하여 최적 반응곡선을 형성한다는 점도 강조된다(Barnwal 등, 2013). 무기영양과 병 저항성의 연계를 다룬 더 넓은 관점의 리뷰 논문은 균형 잡힌 질소(N)·인(P)·칼륨(K)·규소(Si) 공급과 토양 비옥도 유지가 병 저항성 확보의 핵심이라고 제시하고 있다(Shrestha 등, 2020; Tripathi 등, 2022).

이러한 이유로 인산만을 설정해 벼 깨씨무늬병에 미치는 직접 효과를 검증한 실험 연구는 거의 존재하지 않는 것으로 보인다. 그 이유는 첫째, 포장 연구에서 인산 시비는 보통 질소(N)·칼륨(K)·규소(Si) 등과 함께 이루어지므로, 인산 단독 처리는 농업적으로 비현실적이거나 실제 재배 조건과 괴리되기 쉽다. 둘째, 벼 깨씨무늬병 발생은 기후(습도·강우·고온), 품종, 토성, pH, 유기물 수준 등 다양한 환경 요인과 상호작용하기 때문에 인산 단독 영향을 통계적으로 분리하기가 매우 어렵다(Bhatia 등, 2025). 셋째, 현장 기반 연구 대부분이 토양, 식물체 무기성분을 패턴 분석(multinutrient pattern analysis) 형태로 다루기 때문에, 인산의 개별 효과는 필연적으로 복합 요인 속에 포함되어 해석된다(Yea 등, 2009). 따라서 인산은 중요한 영양 요인이지만, 벼 깨씨무늬병과의 상관관계는 다영양소 환경과 상호작용하는 간접적, 조절적 요소이다.

**규산과 벼 깨씨무늬병.** 규소는 벼 깨씨무늬병을 경감하는 대표적 영양 원소로, 초기 포장 연구에서부터 병반지수와 병 심각도 감소 효과가 지속적으로 확인되었다. Datnoff 등(1997)은 규소 결핍 논에서 칼슘규산을 시비하였을 때 벼 도열병과 함께 벼 깨씨무늬병이 감소하고 수량이 증가한다고 보고하였으며, 이후 다수의 포장 연구에서도 규소 시비가 잎과 껍질 조직의 규소 축적을 증가시켜 병진전과 범색 변색을 줄이는 효과가 확인되었다(Datnoff 등, 1997; Rezende 등, 2009). 이러한 결과는 규소가 벼의 기본 병 저항성을 강화하는 중요한 영양 요소임을 시사한다.

규소의 효과는 단순한 조직 강화뿐 아니라 벼의 능동적 규소 흡수 및 기주 생리 유지와 밀접하게 연관된다. Rezende 등

(2009)은 규소 시비 수준에 따라 벼 깨씨무늬병 병진전곡선과 병반의 밀도가 뚜렷한 반응곡선을 보이며, 일정 수준 이상의 규소 축적이 병 저항성을 발휘하기 위한 최소 임계치(threshold)로 작용할 수 있음을 보고하였다(Datnoff 등, 1997; Rezende 등, 2009). 또한 최근 말레이시아 포장 연구에서도 칼슘규산 또는 쌀겨재(rice husk ash)를 이용한 규소 공급이 잎외피 조직의 규소 축적을 증가시키고 벼 깨씨무늬병 병지수와 벼씨의 변색을 유의하게 감소시킨 것으로 나타났다(Mahmad-Toher 등, 2022).

또한 규소 결핍 조건(-Si)에서는 감염 후 광합성 속도, 엽록소, 가용당 농도가 빠르게 감소하며 병 발생 심각도(disease severity)가 높아지지만, 규소가 충분한 조건에서는 광합성과 탄수화물 대사가 유지되어 병반 확대가 억제되었다고 보고되었다(Dallagnol 등, 2013). 이는 규소가 스트레스 조건에서도 식물 생리를 안정화하여 병 발생 심각도를 낮추는 생리적 완충 인자로 기능함을 의미한다.

더 나아가 규소는 벼의 병 저항성을 강화하는 생리적 및 분자적 기작에 관여하는 것으로 보고되어 왔다. 포장 및 포트 실험에서는 규소 공급이 벼 깨씨무늬병 병 진전을 억제하고 벼씨의 변색(discoloration)을 감소시키는 효과가 지속적으로 확인되었다(Mahmad-Toher 등, 2022; Rezende 등, 2009). 한편, 규소가 벼의 호르몬 신호경로(자스몬산[JA]-에틸렌[ethylene] 상호작용)와 세포사멸 관련 반응을 조절하여 병원균 감염 후 과도한 노화(senescence)와 대사 교란을 완화한다는 보고도 있으나, 이는 주로 도열병 및 잎집무늬마름병을 대상으로 한 연구에서 도출된 결과이며(Van Bockhaven 등, 2015), 벼 깨씨무늬병에서 동일한 분자적 메커니즘이 작동하는지는 아직 연구가 부족한 상태이다.

Prabhu 등(2012)과 Dallagnol 등(2014)의 포장 및 이삭 피해 연구에서도 규소 시비는 벼 깨씨무늬병의 심각도와 벼씨 변색을 줄이고 수량 구성 요소(예: 1,000립중)를 증가시키는 것으로 보고되어, 규소가 벼 깨씨무늬병 관리에서 효과적이고 실용적인 영양 기반 전략임이 재확인되었다.

## 결 언

본 리뷰는 *Bipolaris oryzae*에 의한 벼 깨씨무늬병을 중심으로, 기후 변화가 병 발생과 확산에 미치는 다차원적 영향을 심층 분석하였다. *Bipolaris oryzae*에 의한 벼 깨씨무늬병은 기후 변화의 대표적 병으로 볼 수 있는데, 특히 온도 상승, 극지성 폭우, 장마의 장기화, CO<sub>2</sub> 농도 증가, 토양 영양 불균형이 병원균의 확산을 가속화할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 이러한 다양한

요인이 기후의 면역과 생리 대사를 약화시켰을 가능성이 크다. 이 결과, 한국을 포함한 전 세계 벼 재배지는 발병 시기의 조기화와 지리적 확산, 경제적 피해의 증대라는 위협에 직면해 있다.

따라서 내병성·내열성 품종 개발, 토양 및 양분 관리 혁신, 정밀 예찰·조기경보 체계 구축, 친환경 통합 방제, 사회·경제적 지원이 필수적이다. 더 나아가 다중 오믹스 기반의 시공간적 병역학 모델과 글로벌 데이터 공유를 통해 복합 기후 스트레스 하의 발병을 정량 예측해야 한다. 이러한 통합적 대응이 실현될 때, 한국과 전 세계는 기후 변화가 가속화되는 미래에서도 지속 가능한 벼 생산과 식량 안보를 유지할 수 있을 것이다. 따라서 벼 깨씨무늬병 확산을 방지하는 데 합리적인 해결책을 제시할 수 있도록 다음과 같이 제안하는 바이다. 1) 내병성·내열성 품종 개발: OsFBN6, WRKY 등 저항성 유전자를 기반으로 한 육종 및 CRISPR/Cas9 유전체 편집은 기후 변화 하에서 안정적인 저항성을 확보하는 핵심 기술이다(Cao 등, 2024). 품종 개발 시 단일 병 저항성뿐만 아니라 고온·가뭄·CO<sub>2</sub> 복합 스트레스에 대한 내성을 동시에 고려해야 한다. 2) 토양 및 양분 관리 혁신: 토양 및 양분 관리 전략은 벼 깨씨무늬병의 발병 억제에 잠재적으로 중요한 역할을 할 수 있다. 실제로, 병 발생이 심한 논포장은 인산, 치환성 칼륨, 규산 등의 무기성분이 낮았다는 현장 조사 결과가 있으며(Yea 등, 2009), 규산 비료의 사용은 벼 생육과 수량을 유지하면서 벼 깨씨무늬병 발생을 줄였다는 보고도 있다(Ning 등, 2014). 또한, 볏짚 환원 및 토양 유기물 투입, 적정 규산 보충, 웃거름 분할 시비 등은 토양 건강 유지에 기여할 수 있는 실무적 권고로 제시되고 있다(Rural Development Administration, 2025). 다만, 이러한 영양 및 토양 관리가 다양한 환경 조건(비, 수온, 토양형, 품종) 하에서 일관되게 벼 깨씨무늬병의 발생을 억제할 수 있다는 점은 아직 충분한 과학적 검증이 이루어지지 않았으므로, 향후 장기간의 통제 연구가 요구된다. 3) 정밀 예찰 및 조기경보 체계: 최근 농업 원격탐사 및 디지털 농업 기술의 발전으로, 드론/unmanned aerial vehicle, 위성, Internet of Things (IoT) 센서와 머신러닝을 결합한 벼 병해 조기 탐지 및 예측 시스템의 가능성이 제기되고 있다(Dogra 등, 2023; Li 등, 2023; Pirian과 Selvi, 2025; Yan 등, 2025). 이러한 접근은 벼 깨씨무늬병을 포함한 벼 병해의 조기경보를 가능하게 할 잠재력을 지니며, 특히 기상 및 토양 데이터, 엽면 습윤, 생육 상태, 영상 분석 결과를 통합한 다변량 예측 모델은 발병 전 단계에서 방제를 수행할 수 있는 유용한 도구가 될 것이다. 4) 친환경 통합 방제(integrated disease management): 길항 미생물(*Streptomyces*, *Bacillus* 등)의 생물적 방제제와 저독성·선택적 살균제를 기상·토양 정보와 연계해 최적 시점에 살포하는 통합 방제 전략은 약제 저항성 발달을 억제하고 환경 부담을 최소화해야 할

것이다. 5) 사회·경제적 지원 및 교육: 농민이 실시간 병해 정보에 접근하고 즉시 대응할 수 있도록 스마트폰 기반 현장 의사결정 지원 앱을 개발하고(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2025b), 농업 재해 보험과 보조금을 통해 경제적 피해를 완충해야 한다.

## 요 약

벼 깨씨무늬병은 *Bipolaris oryzae* (syn. *Helminthosporium oryzae*; 유성세대 *Cochliobolus miyabeanus*)에 의해 발생하며, 최근 기후 변화로 인한 환경 불안정성이 심화됨에 따라 아시아 벼 생산 체계에서 다시 중요한 위협으로 부상하고 있다. 스트레스 연관 병해(stress-associated disease)로 알려진 이 병은 온도, 습도, 강우, 엽면 습윤 시간 그리고 기주 영양 상태 간의 상호작용에 의해 정교하게 조절된다. 특히 최근에는 계절적 강우 패턴의 변화, 야간 기온 상승, 고습 환경의 빈번한 발생이 병원균의 침입, 병반 확산, 포자 형성을 유리하게 만드는 미세기후를 조성하고 있다. 한편, 장기간 집약 재배된 논에서 만성적으로 나타나는 질소, 인, 칼륨, 규소 및 일부 미량원소의 불균형 또는 결핍은 벼의 감수성을 높이고 잎의 노화를 가속하여 *B. oryzae*가 선호하는 생리적 환경을 형성한다. 2025년 한국 남부 벼 재배지에서 나타난 비정상적으로 심각한 벼 깨씨무늬병 발생은 극심한 강우, 장기간의 흐린 날씨, 높은 상대습도 그리고 장기 재배 논에서의 영양분 고갈과 밀접하게 연관되었을 가능성이 컸을 것으로 예측된다. 본 리뷰에서는 병원균 생물학, 기후 기반 병역학, 영양생태학 그리고 전 세계적 재출현 패턴에 관한 최신 지식을 통합하고, 한국의 최근 발생 양상을 설명할 수 있는 가능한 기작들을 고찰하였다. 나아가 미래의 대규모 전염을 예방하기 위해 기후-영양-병원균 상호작용을 통합적으로 이해하는 프레임워크와 기후 스마트(climate-smart) 영양 관리 전략의 필요성을 강조한다.

## Conflicts of Interest

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

## Acknowledgments

This work was supported by the Rural Development Administration of Korea (RS-2024-00400211).

## References

- Adzigbe, J., Frimpong, F., Danquah, A., Danquah, E. Y., Asante, I. K., Abebrese, S. O. et al. 2025. The responses and adaptations of rice (*Oryza sativa* L.) to drought stress: a review. *Climate Smart Agriculture* 2: 100080.
- Agrios, G. N. 2005. *Plant Pathology* 5th edition. Elsevier Academic Press, Amsterdam, The Netherlands.
- Amorio, D. J. and Cumagun, C. 2017. Pathogenicity and cytological examination of adapted and non-adapted *Bipolaris* species on resistant and susceptible cultivars of rice and corn. *Mycosphere* 8: 377-391.
- Andreo-Jimenez, B., Vandenkoornhuise, P., Lê Van, A., Heutinck, A., Duhamel, M., Kadam, N. et al. 2019. Plant host and drought shape the root associated fungal microbiota in rice. *PeerJ* 7: e7463.
- Barnwal, M. K., Kotasthane, A., Magculia, N., Mukherjee, P. K., Savary, S., Sharma, A. K. et al. 2013. A review on crop losses, epidemiology and disease management of rice brown spot to identify research priorities and knowledge gaps. *Eur. J. Plant Pathol.* 136: 443-457.
- Bhutia, T. P., Rao, Y. D., Kharel, P., Rai, P., Rana, M. and Srivastava, S. 2025. A comprehensive review on brown spot disease of rice: etiology, epidemiology, management strategies and future directions. *Plant Sci. Today* 12: e4657.
- Bidzinski, P., Ballini, E., Ducasse, A., Michel, C., Zuluaga, P., Genga, A. et al. 2016. Transcriptional basis of drought-induced susceptibility to the rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. *Front. Plant Sci.* 27: 1558.
- Cao, F.-Y., Zeng, Y., Lee, A.-R., Kim, B., Lee, D., Kim, S.-T. et al. 2024. Os-FBN6 enhances brown spot disease resistance in rice. *Plants* 13: 3302.
- Carvalho, M. P., Rodrigues, F. A., Silveira, P. R., Andrade, C. C. L., Baroni, J. C. P., Paye, H. S. et al. 2010. Rice resistance to brown spot mediated by nitrogen and potassium. *J. Phytopathol.* 158: 160-166.
- Choudhury, F. A., Jabeen, N., Haider, M. S. and Hussain, R. 2019. Comparative analysis of leaf spot disease in rice belt of Punjab, Pakistan. *Adv. Life Sci.* 6: 76-80.
- da Rosa Dorneles, K., Martins, A. C., Fernando, J. A., do Amarante, L., de Avila, L. A., Deuner, S. et al. 2020. Increased atmospheric CO<sub>2</sub> concentration causes modification of physiological, biochemical and histological characteristics that affects rice-*Bipolaris oryzae* interaction. *Eur. J. Plant Pathol.* 157: 29-38.
- Dallagnol, L. J., Rodrigues, F. A., Chaves, A. R. M., Cale, F. X. R. and DaMatta, F. M. 2013. Photosynthesis and sugar metabolism in rice plants supplied with silicon and infected by *Magnaporthe oryzae*. *Plant Pathol.* 62: 120-129.
- Dallagnol, L. J., Rodrigues, F. A., Mielli, M. V. and Ma, J. F. 2014. Rice grain resistance to brown spot and yield are increased by silicon. *Trop. Plant Pathol.* 39: 56-63.

- Dallagnol, L. J., Rodrigues, F. A., Mielli, M. V., Ma, J. F. and Datnoff, L. E. 2009. Defective active silicon uptake affects some components of rice resistance to brown spot. *Phytopathology* 99: 116-121.
- Datnoff, L. E., Deren, C. W. and Snyder, G. H. 1997. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. *Crop Prot.* 16: 525-531.
- Dhingra, O. D. and Sinclair, J. B. 1995. Basic plant pathology methods, 2nd edition. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Dogra, R., Rani, S., Singh, A., Albahar, M. A., Barrera, A. E. and Alkhayat, A. 2023. Deep learning model for detection of brown spot rice leaf disease with smart agriculture. *Comput. Electr. Eng.* 109: 108659.
- Estrada, A. B. 1984. Selection of differential varieties for race study of *Helminthosporium oryzae*. University of Philippines at Las Banos, Leguna, Philippines.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2023. World food and agriculture-Statistical yearbook 2023. FAO, Rome, Italy.
- Ham, J. H., Melanson, R. A. and Rush, M. C. 2011. *Burkholderia glumae*: next major pathogen of rice? *Mol. Plant Pathol.* 12: 329-339.
- Hue, Y., Kim, J. H., Nam, Y., Choi, B., Kim, T. S., Lee, S.-J. et al. 2025. Changes in the occurrence patterns of rice fungal diseases due to climate change. *Res. Plant Dis.* 31: 17-29.
- Imran, M., Sahi, S. T., Atiq, M. and Rasul, A. 2020. Brown leaf spot: an exacerbated embryonic disease of rice: a review. *J. Innov. Sci.* 6: 108-125.
- Kaboré, K. H., Kassankogno, A. I., Adreit, H., Milazzo, J., Guillou, S., Blondin, L. et al. 2022. Genetic diversity and structure of *Bipolaris oryzae* and *Exserohilum rostratum* populations causing brown spot of rice in Burkina Faso based on genotyping-by-sequencing. *Front. Plant Sci.* 13: 1022348.
- Kaboré, K. H., Kassankogno, A. I. and Tharreau, D. 2025. Brown spot of rice: worldwide disease impact, phenotypic and genetic diversity of the causal pathogen *Bipolaris oryzae*, and management of the disease. *Plant Pathol.* 74: 908-922.
- Kamal, M. M. and Mia, M. A. T. 2009. Diversity and pathogenicity of the rice brown spot pathogen, *Bipolaris oryzae* (Breda de Haan) Shoem. in Bangladesh assessed by genetic fingerprint analysis. *Bangladesh J. Bot.* 38: 119-125.
- Kumar, S., Kiran, A. and Mandal, D. 2024. Impact of cultural practices and nitrogenous fertilizer on the development of brown spot disease of rice. *J. Adv. Biol. Biotechnol.* 27: 787-790.
- Li, R., Chen, S., Matsumoto, H., Gouda, M., Gafforov, Y., Wang, M. et al. 2023. Predicting rice diseases using advanced technologies at different scales: present status and future perspectives. *ABIOTECH* 29: 359-371.
- Liang, B., Wang, H., Yang, C., Wang, L., Qi, L., Guo, Z. et al. 2022. Salicylic acid is required for broad-spectrum disease resistance in rice. *Int. J. Mol. Sci.* 23: 1354.
- Mahmad-Toher, A. S., Govender, N., Dorairaj, D. and Wong, M. Y. 2022. Effects of silica soil amendment against *Exserohilum rostratum*, the fungal pathogen of rice brown spot disease in Peninsular Malaysia. *Sci. Rep.* 12: 15690.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2025a. MAFRA recognizes rice brown spot damage as an agricultural disaster and initiates damage assessment. MAFRA, Sejong, Korea.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2025b. MAFRA launches a detailed investigation to assess rice brown spot damage and analyze causal factors. MAFRA, Sejong, Korea.
- Mohidem, N. A., Hashim, N., Shamsudin, R. and Che Man, H. 2022. Rice for food security: revisiting its production, diversity, rice milling process and nutrient content. *Agriculture* 12: 741.
- Nguyen, N. V. 2002. Global climate changes and rice food security. *IRC Newsletter* 54: 24-30.
- Ning, D., Song, A., Fan, F., Li, Z. and Liang, Y. 2014. Effects of slag-based silicon fertilizer on rice growth and brown-spot resistance. *PLoS One* 9: e102681.
- Ou, S. H. 1985. Rice Disease 2nd edn. CMI, Kew, England.
- Padmanabhan, S. Y. 1973. The great bengal famine. *Ann. Rev. Phytopathol.* 11: 11-24.
- Percich, J. A., Nyvall, R. F., Malvick, D. K. and Kohls, C. L. 1997. Interaction of temperature and moisture on infection of wild rice by *Bipolaris oryzae* in the growth chamber. *Plant Dis.* 81: 1193-1195.
- Pirian, P. R. and Selvi, J. 2025. SmartCropGuard: an IoT-based real-time paddy plant disease detection system for precision agriculture in cauvery delta regions. *Tehnicki Vjesnik* 32: 2073-2080.
- Prabhu, A. S., Barbosa Filho, M. P., Datnoff, L. E., Snyder, G. H., Berni, R. F., Rodrigues, F. A. et al. 2012. Silicon reduces brown spot severity and grain discoloration on several rice genotypes. *Trop. Plant Pathol.* 37: 409-414.
- Rezende, D. C., Rodrigues, F. A., Carré-Missio, V., Schurt, D. A., Kawamura, I. K. and Korndörfer, G. H. 2009. Effect of root and foliar applications of silicon on brown spot development in rice. *Australas. Plant Pathol.* 38: 67-73.
- Rezvi, H. U. A., Tahjib-Ul-Arif, M., Azim, M. A., Tumpa, T. A., Tipu, M. M. H., Najnine, F. et al. 2022. Rice and food security: climate change implications and the future prospects for nutritional security. *Food Energy Secur.* 12: e430.
- Rural Development Administration (RDA). 2025. RDA initiates on-site surveys of rice brown spot-affected fields. RDA, Jeonju, Korea.
- Sajjad, M., Hussain, K., Wajid, S. A. and Saqib, Z. A. 2025. The impact of split nitrogen fertilizer applications on the productivity and nitrogen use efficiency of rice. *Nitrogen* 6: 1.
- Savary, S., Nelson, A., Sparks, A. H., Willocquet, L., Duveiller, E., Mahuku, G. et al. 2011. International agricultural research tackling the effects of global and climate changes on plant diseases in the developing world. *Plant Dis.* 95: 1204-1216.
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N. and Nelson, A. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat. Ecol. Evol.* 3: 430-439.
- Shrestha, J., Kandel, M., Subedi, S. and Shah, K. K. 2020. Role of nutrients in rice (*Oryza sativa* L.): a review. *Agrica* 9: 53-62.

- Silva, L. C., Einhardt, A. M., Brás, V. V., Oliveira, L. M., Chaves, J. A., Pinto, L. F. et al. 2024. Rice resistance against *Bipolaris oryzae* infection is mediated by lower foliar potassium concentration. *Plant Pathol.* 73: 548-563.
- Sudhasha, S., Balabaskar, P. and Eswaran, A. 2022. Aerobiological dynamics of *Bipolaris oryzae* in the rice agroecosystem and its impact on rice brown spot disease severity. *Crop Res.* 57: 433-441.
- Sunder, S., Singh, R., Dodan, D. S. and Mehla, D. S. 2005. Effect of different nitrogen levels on brown spot (*Drechslera oryzae*) of rice and its management through host resistance and fungicides. *Plant Dis. Res.* 20: 111-114.
- Tripathi, R., Tewari, R., Singh, K. P., Keswani, C., Minkina, T., Srivastava, A. K. et al. 2022. Plant mineral nutrition and disease resistance: a significant linkage for sustainable crop protection. *Front. Plant Sci.* 13: 883970.
- Van Bockhaven, J., Spíchal, L., Novák, O., Strnad, M., Asano, T., Kikuchi, S. et al. 2015. Silicon induces resistance to the brown spot fungus *Cochliobolus miyabeanus* by preventing the pathogen from hijacking the rice ethylene pathway. *New Phytol.* 206: 761-773.
- Wang, C., Yang, K., Jibril, S. M., Wang, R., Li, C. and Wang, Y. 2025. Genome sequencing and comparative transcriptomic analysis of rice brown spot pathogen *Bipolaris oryzae* adaptation to osmotic stress. *J. Fungi* 11: 227.
- Webster, R. K. and Gunnell, P. S. 1992. Compendium of rice diseases. American Phytopathological Society, St. Paul, MN, USA.
- Yan, J., Wu, H., Diao, Z., Miao, Y., Zhang, B. and Zhao, C. 2025. Recent developments and applications of crop disease remote sensing and UAV technologies. *Engineering* 139: 103-134.
- Yea, W.-H., Park, Y.-H., Kim, L.-Y., Taik, J.-S., Nam, Y.-J., Shim, H.-S. et al. 2009. Comparisons of inorganic amounts in paddy field soil, rice straw and grain with severity of brown spot caused by *Cochliobolus miyabeanus*. *Res. Plant Dis.* 15: 41-45. (In Korean)