

Burkholderia species에 의한 벼알마름증상 발생에 온도변화가 미치는 영향

최수연¹, 금창욱¹, 박현수², 김신화¹, 정현정¹, 김상민^{1*}, 이용훈^{3*}
¹국립식량과학원 작물기초기반과, ²국립식량과학원 작물육종과, ³전북대학교 생명공학부
(2024년 07월 05일 접수; 2024년 08월 28일 수정; 2024년 09월 19일 수락)

Impact of Temperature Changes on the Occurrence of Grain Rot Caused by *Burkholderia* species

Soo Yeon Choi¹, Chang Ok Geum¹, Hyun-Su Park², Shinhwa Kim¹,
Hyunjung Chung¹, Sang-Min Kim^{1*}, Yong Hoon Lee^{3*}

¹Crop Foundation Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju-gun
55365, Republic of Korea

²Crop Breeding Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju-gun
55365, Republic of Korea

³Division of Biotechnology, Jeonbuk National University, Jeonju-si 54896, Republic of Korea
(Received July 05, 2024; Revised August 28, 2024; Accepted September 19, 2024)

ABSTRACT

Bacterial grain rot (BGR) caused by *Burkholderia glumae* is a serious threat to rice production and quality. *Burkholderia gladioli* and *Burkholderia plantarii* have also been frequently isolated from rice panicles exhibiting Grain rot. The disease by the *Burkholderia* species are becoming prevalent due to the prolonged hot and humid conditions during the heading stage. However, the effects of the changing environments on the incidence of GR by the *Burkholderia* species remain to be explored. In this study, we inoculated rice panicles at the heading stage with the three *Burkholderia* species under different temperatures (25°C, 30°C, and 35°C) and evaluated disease incidences in both indoors and field conditions. *B. glumae* induced high disease incidences at the elevated temperatures in both conditions, whereas *B. gladioli* and *B. plantarii* showed no significant variations with temperature changes. Further analysis indicated that the increased incidence caused by *B. glumae* at the elevated temperature is linked to higher toxoflavin production and motility. The results of this study suggest that rising temperature due to climate change during the rice heading stage could potentially increase the incidence of BGR caused by *B. glumae*. This study provides insights for preparing for the outbreak of BGR.

Key words: Bacterial grain rot, *Burkholderia*, Climate change, Temperature



* Corresponding Author : Yong Hoon Lee, Sang-Min Kim
(yonghoonlee@jbnu.ac.kr, kimsangmin@korea.kr)

I. 서 론

벼(*Oryza sativa* L.)는 세계적으로 많은 나라에서 주식으로 재배되는 식량작물로서 종자부터 수확기까지 전 생육단계에 걸쳐 다양한 병이 발생하며(Wang *et al.*, 2008; Ochi *et al.*, 2017), 출수기부터 등숙기의 이삭에 발생하는 주요 병으로는 세균벼알마름병, 이삭도열병, 이삭누룩병 등이 보고되어 있다(Lee and Park, 1979; Ham *et al.*, 2011; Baite *et al.*, 2021). 이들 중 세균벼알마름병은 주로 *Burkholderia glumae*에 의해 발생하며 일본에서 처음 보고된 이후 아시아 지역을 비롯한 벼의 주요 재배지역에서 매년 발생하고 있다(Song and Kim, 1999). 국내에서는 *B. glumae* 외에도 *Burkholderia gladioli*와 *Burkholderia plantarii*가 벼 이삭(벼알)의 마름 및 변색 증상에 관여하는 것으로 알려져 있다(Ra *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2023).

이들 병원균은 벼의 생육단계 및 발생시기에 따라 다양한 병을 유발하는데, *B. glumae*는 벼 유묘 썩음증상과 벼 이삭(벼알)의 갈변 및 마름증상이 주요 병징으로 국내외에서 벼 출수기에 발생하는 세균벼알마름병의 원인 병원균으로 알려져 있다(Goto and Ohata, 1956; Ham *et al.*, 2011). *B. gladioli*는 잎집썩음증상이 주요 병징이며, 최근 국내·외에서 이삭마름증상을 유발한다고 보고되었으나, *B. glumae*에 비해 발생 빈도와 피해정도는 낮다(Ham *et al.*, 2011; Islam *et al.*, 2023). *B. plantarii*는 일본에서 육묘상자의 유묘마름증상에서 처음 보고되었으며(Azegami *et al.*, 1985), 황백화 및 뿌리 생육 억제와 같은 유묘마름증상이 주요 병징이다(Wang *et al.*, 2013). *B. plantarii*는 *B. gladioli*와 마찬가지로 국내에서 이삭 변색을 유발하는 병원균으로 보고되고 있음에도 불구하고, 이삭에서 발생상태와 피해정도 및 이삭(벼알)에 대한 병원성 관련 연구는 부족한 실정이다.

세균벼알마름병은 출수 개화기의 고온 다습한 환경에서 병원균이 벼알에 쉽게 침입하여 병이 진전된다(Cha *et al.*, 2001). 출수기에 벼알마름 증상을 유발하는 *Burkholderia* 속의 균이 침입하여 발생이 심해지면 불임이 발생하거나, 무게 감소 등으로 인해 생산량이 크게 감소할 수 있기 때문에 종자소독부터 시작해서 병을 예방·방제하는 것이 중요하다(Trung *et al.*, 1993; Ham *et al.*, 2011).

기후변화로 인한 이상기온은 병원균의 병원성과 식

물체의 병 저항성에 영향을 줄 수 있으며, 이에 따라 병원균과 식물체간의 상호작용에도 영향을 미칠 수 있다(Jang *et al.*, 2019). 온도는 작물 생산량에 중요한 영향을 미치는 환경 요인으로 2021년 출수기의 갑작스러운 저온과 잦은 강우로 이삭도열병이 대발생하였으며(Chung *et al.*, 2022), 특히 고온은 세계적으로 작물 생산에 중요한 문제로 대두되고 있다(Birch *et al.*, 2012; Schauburger *et al.*, 2017). 고온은 작물의 발아율 감소 및 불임 증가를 유발하여 생산성에 영향을 줄 수 있으며(Hasanuzzaman *et al.* 2013), 특히 밤 온도 상승은 벼 수량 감소에 영향을 준다(Peng *et al.* 2004). *B. glumae*의 최적 생육 온도범위는 30~35°C로 다른 병원균보다 상대적으로 높기 때문에(Kurita *et al.*, 1964), 이상고온에서 더 빈번하게 발생할 수 있다. 온도는 식물병원균의 생장에 영향을 주기 때문에(Onaga *et al.*, 2017), *Burkholderia* species에 의한 발병에 온도가 미치는 영향에 대한 벼 식물체를 이용한 연구와 병원력의 변화에 관한 탐구를 통해 기후변화로 인한 온난화가 금후 벼알마름 증상에 미칠 영향에 대한 연구가 필요하다.

벼알마름 증상을 일으키는 *Burkholderia* species 병원균의 주요 병원성 인자로는 여러가지가 알려져 있다. *B. glumae*가 생산하는 독소플라빈(toxoflavin) 독소는 노란색을 띠고, 식물과 곰팡이에 강한 독성을 나타내며(Choi *et al.*, 2013), 벼에서 유묘의 뿌리 생육을 감소시키거나 출수기 이삭의 낱알의 썩음과 마름 증상을 유발하는데 중요한 역할을 한다(Kim *et al.*, 2004). 독소플라빈 생합성 유전자가 결핍된 균주는 비병원성 표현형이 나타나기 때문에 독소플라빈이 *B. glumae*의 중요한 병원성 인자라는 것은 이미 여러 연구로 증명되었다(Kim *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2023). 그러나, 온도가 독소플라빈 생성에 미치는 영향에 대해서는 명확하게 보고되지 않았다. 한편, *B. glumae*는 편모를 통해 운동성(motility)을 가지는데, 편모는 식물체 표면에 정착은 물론 감염부위로의 이동에 필요하기 때문에 식물병 방생 초기 단계에서 중요한 역할을 하는 중요한 병원성 인자이다(Characklis, 1990; Romantschuk, 1992; kim *et al.*, 2007; Venieraki *et al.*, 2016).

이상기후로 인해 벼의 안정적인 생산이 위협을 받고 있는 상황을 고려할 때, 온도변화에 따라 이삭에서의 벼알마름 증상과 관련된 병원균에 의한 병 발생과 원인 병원균의 특성이 어떻게 변화하는지에 대해 구명할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내에서 벼알

마름증상에 관여하는 것으로 알려진 3종의 *Burkholderia* species을 대상으로 온도변화에 따른 벼 이삭에서의 발병 정도의 변화와 주요 병원성 관련 인자의 변화를 비교하였다. 온도변화가 출수기 이삭에서 벼알마름병 발생에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 본 연구의 결과는 온난화에 대비하여 안정적인 벼 생산을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

II. 재료 및 방법

2.1. 실험에 사용된 병원균 및 벼 품종

본 연구에 사용된 *Burkholderia* 속 3종(*B. glumae*, *B. gladioli*, *B. plantarii*)은 벼 이삭에서 분리하여 병원성이 검증된 균주로 각 병원균주는 -80℃ 초저온 냉동고에 장기보관하며, 필요에 따라 Luria-Bertani (LB) 고체배지에 30℃에서 48시간 배양하여 실험에 사용하였다. 병원성 검정에 사용한 벼는 ‘신동진’을 국립식량과학원 작물육종과에서 분양받아 실험에 사용하였다.

2.2. *Burkholderia* 속 병원균의 벼 이삭에의 접종 및 배양 온도별 발병도 조사

벼 ‘신동진’ 종자를 종자를 60℃에서 10분간 온탕침지 후, 30℃의 미온수에 에코퍼하이드록사이드·이프코나졸 종자처리 액상수화제(2mL/L)을 첨가하여 30℃에서 48시간 침중하여 소독하였다. 싹이 튼 종자는 수도용 상토(부농)에 파종하여 국립식량과학원 반밀폐형 유리온실(평균기온 30℃)에서 3주간 육묘하였다. 포트(지름: 12cm, 높이: 11cm)에 수도용 상토를 담고 육묘한 유묘를 한 주씩 이양하여 포트 당 15cm 간격으로 온실에서 이삭이 나올 때까지 재배하였다. 각각의 병원균(*B. glumae*, *B. gladioli* 및 *B. plantarii*)은 LB 고체배지에 배양하여 자라난 세포를 멸균수에 현탁하여 흡광도 600nm에서 0.5로 맞춰 병원균의 밀도(1×10^8 CFU/mL)를 조정하였다. 이와 같이 준비한 균 현탁액을 벼의 출수기에 분무기를 이용하여 이삭 당 3mL씩 분무접종하였다. 접종 후 습도 유지를 위해 접종된 이삭에 비닐을 씌워 24시간동안 다습한 환경 조건을 유지하였다. 온도는 우리나라 중남부지역의 출수기 평균기온인 25℃~30℃인 것을 고려하고, 금후 기온이 상승할 것으로 예상하여 현재 출수기 기온의 낮은 온도(25℃), 현재의 높은 온도(30℃) 및 금후 상승할 고온(35℃)으로 설정하여 비교하였다. 포트는 식

물생장상(CONVIRON, A1000)에서 각각의 온도(25℃, 30℃ 및 35℃) 조건에서 재배(광/암, 12시간/12시간)하면서 접종 7일후에 Mizobuchi et al., (2018)의 평가 방법에 따라 벼알마름증상의 발생 정도를 10% 간격으로 나눠 0~100%로 평가하였다.

2.3. 기상환경이 다른 지역별 *Burkholderia* 속 병원균의 벼 이삭에의 접종 및 발병조사

국립식량과학원의 시험연구용 본원 포장(완주군, 35°50'01.3"N 127°02'36.8"E)과 상주출장소 포장(상주시, 36°26'26.3"N 127°56'36.2"E)에서 실험을 수행하였다. 위에서와 동일한 조건으로 벼 ‘신동진’ 종자를 소독하고 국립식량과학원 온실에서 육묘하였다. 두 지역에서의 출수 시기를 비슷하게 맞추기 위해 평균 온도가 낮은 상주포장에 먼저 이양(주당 간격 15×30cm)하고, 2주 뒤에 완주포장에 이양하여 재배하였다. 균 현탁액은 위에서와 같은 농도(10^8 CFU/mL)로 준비하고, 각각의 지역에서 개화초기에 분무기를 이용하여 균현탁액을 이삭 당 3mL씩 분무접종하고 10일 후에 이삭 당 감염률을 백분율로 환산하여 발병 정도를 평가하였다. 완주포장과 상주포장의 지역별 기상정보는 접종일부터 접종 후 10일까지의 평균기온과 강수량 정보를 농업날씨365 (<http://weather.rda.go.kr>)에 등록된 자료를 수집하여 분석하였다.

2.4. 톡소플라빈 생산 조사

온도별 *B. glumae*의 톡소플라빈 생성량 정도는 Chen et al., (2012)의 방법에 따라 조사하였다. LB 고체배지에서 자란 *B. glumae*의 단일 콜로니를 3mL의 LB 액체배지에 접종한 다음 25℃, 30℃ 및 35℃ 온도에서 160rpm으로 24시간 동안 진탕배양하였다. 배양액 2mL을 원심분리(13,000rpm, 5분)하여 상층액을 회수하고 상층액 1mL에 동량의 클로로포름을 넣고 충분히 섞어주었다. 이후 후드에서 자연건조하여 남은 침전물을 80% 메탄올로 추출하여 분광광도계를 이용하여 393nm에서 흡광도를 측정하여 톡소플라빈 농도를 계산하였다(Iqbal et al., 2021).

2.5. Swimming motility 검증

LB 한천배지에 배양한 *B. glumae*의 단일 콜로니를 멸균된 이쑤시개를 사용하여 한천이 0.25% 함유된 LB 고체배지 중앙에 접종하였다. 접종된 배지는 25℃,

30℃ 및 35℃에 배양하면서 24시간 간격으로 3일간 이동한 거리를 측정하였다.

2.6. 통계분석

온도별 발병정도 및 특성 조사결과의 차이를 비교하기 위해 R 프로그램(<http://www.r-project.org>)을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 수행하였다. 결과값의 사후분석은 유의확률 0.05 수준에서 Turkey 다중범위검정(multiple range test)을 이용하였으며, 모든 결과값은 평균과 표준편차로 나타냈다.

III. 결과 및 고찰

3.1. *Burkholderia species*에 의한 벼 이삭에서의 병 발생에 온도가 미치는 영향

환경은 병원균과 식물체 각각에 직·간접적으로 영향을 미칠뿐만 아니라 이들 간의 상호작용에 영향을 미치고 병 발생 정도에 차이를 가져오게 된다(Anderson *et al.* 2004). 특히, 온도는 작물의 생육 및 수량에 중대한 영향을 미치는 환경요인으로서 온도변화는 식물 병원균의 생리·생태에도 많은 영향을 미친다(Oh *et al.*, 2014; Hunjan and Lore, 2020). *Burkholderia species*에 의한 벼 이삭의 병징을 보면 *B. glumae*의 경우 감염 초기에 벼알이 갈변하다가 시간이 지나면서 갈색으로 마름증상이 나타나는 것이 특징이고, *B. gladioli*와 *B. plantarii*는 벼알의 변색이 주요 특징으로 병원균들간에 병징의 차이가 있다. 각각의 병원균을 벼 이삭에 접종한 후에 온도가 다른 환경에서 재배하며 7일째에 벼알에서의 병 발병도를 조사한 결과 *B. glumae*의 경우, 25℃, 30℃ 및 35℃에서 발병도가 각각 29%, 48%, 89%로 온도가 5℃ 증가함에 따라 약 2배씩 증가하였는데 특히, 35℃에서의 발병도가 25℃, 30℃와 비교하였을 때 유의미한 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 1). *B. gladioli*의 경우에는 25℃에서 발병도가 30%였으며, 30℃ 및 35℃에서는 약간 발병도가 감소하는 경향이였으나 통계적으로 유의미한 차이는 없었다. *B. plantarii*의 경우, 온도가 증가할수록 발병도도 증가하여 35℃에서는 발병도가 60% 정도였으나 온도 별로 유의미한 차이는 없었다. 이상의 결과는 온도의 증가는 *Burkholderia species*에 의한 벼에서의 발병 정도에 변화를 유발할 수 있다는 것을 시사한다. 특히, *B. glumae*의 경우 기후변화에 의한 온도 상승에 따라

발병정도가 증가할 경향이 매우 높은 병원균으로 판단되어 출수기에 평년보다 높은 이상고온이 지속될 경우 *B. glumae*에 의한 세균벼알마름병 발생 증가에 대한 대책 수립이 필요할 것이다. 다만, 기후변화가 병 발생에 미치는 영향의 분석에는 기주의 저항성 또는 감수성 변화뿐만 아니라 병원균의 생육, 병원성 변화 등과 다른 환경 요인 등의 변화를 함께 고려해야 하기 때문에 온도 변화와 같은 특정 요인만으로 병 발생 변화를 예측하는 것은 한계가 있을 수 있다(Elad and Pertot, 2014). 따라서, 정확한 세균벼알마름병 발생을 예측하기 위해서는 온도 이외에도 CO₂ 변화 등과 같은 다른 환경 요인 들을 고려하고, 식물과 병원균에 대한 영향을 종합적으로 고려하여 이들 병원균에 의한 발생 변화 예측 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2. *Burkholderia species*에 의한 벼 이삭에서의 발병에 재배지역에 따른 생육환경이 미치는 영향

*Burkholderia species*를 벼 이삭에 접종한 후에 온도변화에 따른 발병도의 차이를 식물배양상에서 조사하는 것과 별도로 벼의 생육기간중의 온도가 차이나는 두 지역(전북 완주와 경북 상주)의 포장에서 *B. glumae*, *B. gladioli* 및 *B. plantarii* 3종에 의한 발병차이를 조사하였다. 접종 후 두 지역간의 평균기온을 비교했을 때, 완주포장이 상주포장보다 접종 직후 1~2일 동안의 평균기온이 3℃ 이상 높았으며, 10일동안 전체 평균기온은 3.2℃ 차이가 났다(Fig. 2). 발병정도 조사 결과 평균기온이 높았던 완주포장에서 모든 병원균에 의한 발병정도가 증가하는 것을 확인할 수 있었는데(Fig. 3), *B. gladioli*와 *B. plantarii*에 의한 발병정도는 온도증가에 따라 약간 증가하는 경향으로 통계적으로는 유의미한 차이는 아니었으나, *B. glumae*의 경우 상주포장 보다 완주포장의 이삭에서의 발병정도가 약 1.4배 더 높았으며, 통계적으로도 유의미한 차이를 확인할 수 있었다. 앞선 결과인 식물배양실에서 *B. glumae*에 의한 발병정도를 비교했을 때, 25℃에 비해 30℃의 온도에서 재배한 이삭에서의 발병정도가 증가하는 경향이였으며, 이와 유사한 정도의 평균기온의 차이(약 3℃)를 나타낸 포장에서도 발병정도에 유의성 있는 차이가 있었다. 실내의 경우 접종 후 7일간 온도의 변화없이 동일한 온도조건에서 재배하며 발병정도를 조사한 반면, 포장의 경우 매일 밤과 낮 동안의 최저 및 최고기온을 고려하지 않고 평균값으로 비교하였

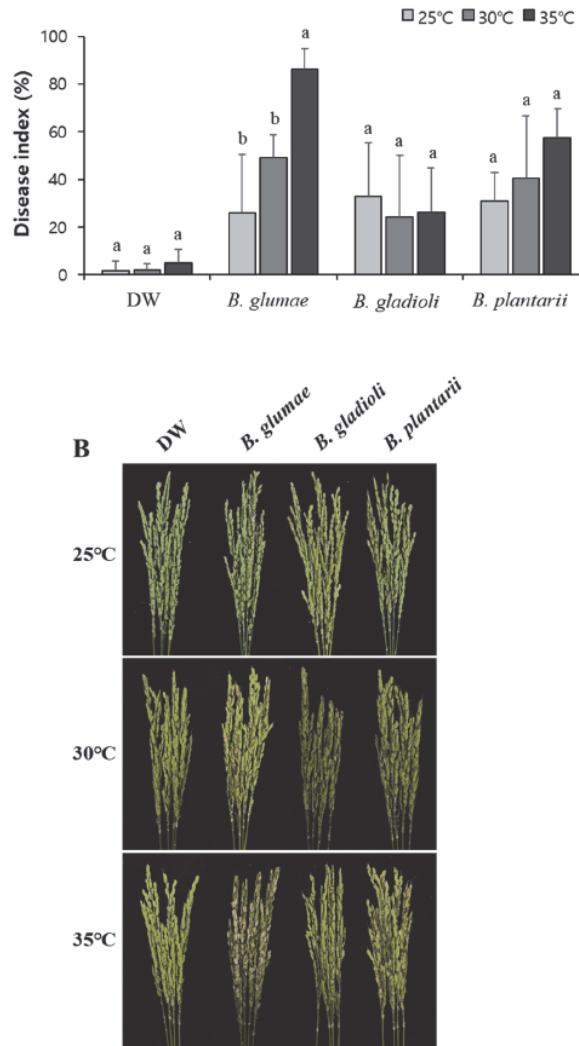


Fig. 1. Disease incidence caused by *Burkholderia* spp. on rice panicles depending on temperatures. (A) Bar graph shows the percentage of disease severity on rice panicles 7 days after inoculation with each *Burkholderia glumae*, *B. gladioli*, and *B. plantarii*. Results are means and standard deviation of 7 replicates. Different letters above the columns indicate significant differences by Turkey’s multiple range test, $P < 0.05$. (B) Photograph shows the representative disease incidences at each temperature.

기 때문에 실제 온도와는 차이가 있었을 것으로 생각되며, 특히 포장의 낮기온은 평균기온보다 높은 기온을 유지하였다. 따라서, 두 지역의 포장에서는 약 3℃의 평균기온의 차이에도 불구하고 발병정도에 차이를 보였을 것으로 판단된다. 또한, 완주포장에서는 집중 후 3일째 적은 양이지만 강우(20.5mm)가 있었으며, 이는 다습한 환경을 유발하여 고온환경과 함께 완주포장에서의 병 발생에 영향을 주었을 것이라 판단된다. 병의 발생은 기주와 병원균뿐만이 아니라 온도, 습도

(강우) 등의 여러 환경 요인을 함께 고려해야 하기 때문에 온도만으로는 병 발생을 예측하고 판단하는데 한계가 있을 수 있다. 따라서, 기후변화에 따른 벼 이삭에서의 *Burkholderia* species에 의한 병 발생 예측을 위해서는 온도 외의 다른 환경 요인에 의한 영향을 종합적으로 고려한 추가 연구가 보다 정밀하게 수행될 필요가 있다.

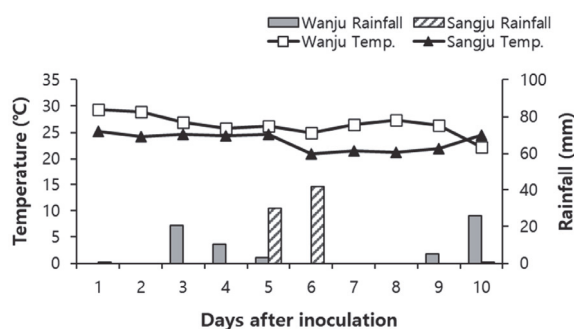


Fig. 2. Meteorological characteristics of Wanju-gun and Sangju-si in August 2023. The graph shows the average temperature (°C) and the amount of rainfall (mm) for 10 days after inoculation.

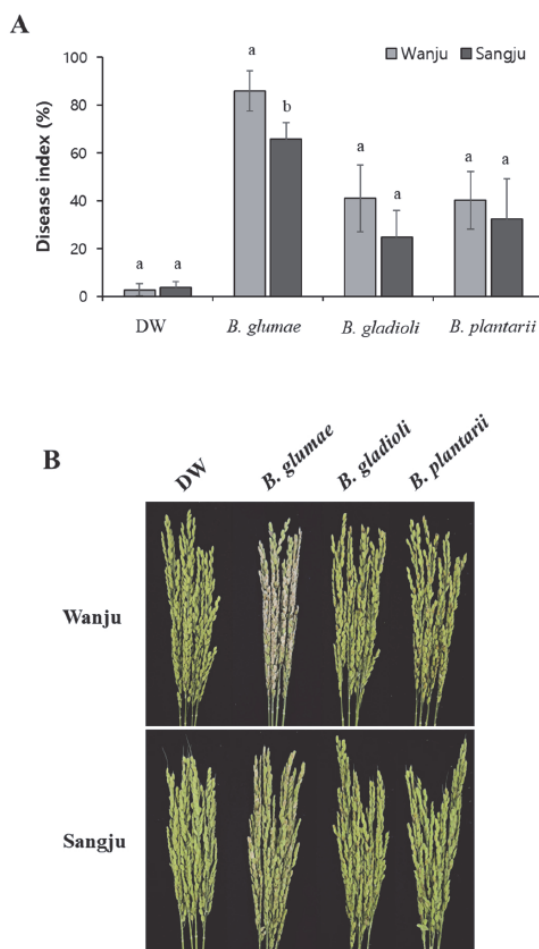


Fig. 3. Disease incidence caused by *Burkholderia* spp. on rice panicles in different regions. (A) Bar graph shows the percentage of disease incidence on rice panicles 10 days after inoculation with each *Burkholderia* species. Results are means and standard deviation of 20 replicates. Different letters indicate significant differences by Turkey's multiple range test, $P < 0.05$. (B) Photographs show the representative disease severity in each region.

3.3. *B. glumae*의 톡소플라빈(toxoflavin) 생산에 대한 온도의 영향

톡소플라빈은 *B. glumae*의 주요 병원성 인자로 벼 이삭에 황백화 현상을 유발하여 생산량에 심각한 손실을 일으킨다고 보고되어 있다(Kim *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2012). 그러나, 온도에 따른 세균벼알마름병원균의 독소 생산에 관한 연구는 미흡한 상황으로 본 연구에서는 온도(25°C, 30°C 및 35°C)가 *B. glumae*의 톡소플라빈 생산에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 25°C에서 배양하였을 때보다 35°C에서 배양했을 때 톡소플라빈 생성량이 통계적으로 유의미하게 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 온도가 높아질수록 병원세균의 대사 활동이 향상되어 잠재적으로 톡소플라빈 합성이 증가하면서 병원성이 증가할 수 있다고 보고되어 있다(Matsuda and Sato, 1988). 따라서, 이러한 결과는 생육 온도가 증가함에 따라 톡소플라빈 생성량도 증가할 수 있다는 것을 시사하며, 온도 상승에 따른 *B. glumae*에 의한 발병 증가는 톡소플라빈의 생합성 증가가 중요한 요인 중의 하나였다는 것을 의미한다. 다만, 온도에 따른 균 생육의 차이를 반영하여 온도가 톡소플라빈 분비량에 미치는 영향을 정확히 정량할 필요가 있고, 독소 생성과 관련된 유전자의 발현 등의 연구도 필요할 것이다.

3.4. *B. glumae*의 운동성(motility)에 대한 온도의 영향

*B. glumae*를 배지에 접종하고 24시간, 48시간, 72시간 경과 후에 이동정도를 조사한 결과 25°C에서는 각각 5.3mm, 17.3mm 및 26.2mm, 30°C에서는 각각 18.2mm, 46.7mm 및 71.3mm, 35°C에서는 각각 22.2mm, 59.2mm 및 85.0mm를 이동하여, 온도가 높아질수록 운동성이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5). 편모 등을 이용한 식물 병원세균의 운동은 유해물질의 회피, 신호물질이나 기증로의 이동뿐만 아니라 식물 표면에서의 정착과 침입부위로의 이동 등에 매우 중요하다(Ottemann & Miller, 1997). 병원세균의 운동 정도는 온도에 따라 변화하였으며(Hockett *et al.*, 2013), 이러한 결과는 온도변화가 병원균의 생육이나 환경 적응 외의 운동성에도 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. *B. glumae*에 의한 발병 정도가 고온 환경(35°C)에서 높았는데, 이러한 발병 증가에는 25°C에 비해 30°C와 35°C에서의 운동이 상대적으로 증가한 것도 병원성 차이의 원인일 것으로 보여진다.

이상의 결과를 종합하면, 고온(35°C) 환경으로 변화되면 *B. gladioli*와 *B. plantarii*에 비해 *B. glumae*에 의한 이삭에서의 발병 정도가 증가할 것으로 예상된다. 이러한 이유는 온도 증가에 따른 생육의 증가뿐만 아니라 톡소플라빈 생합성 및 운동성 증가가 중요한 요인일 것으로 판단되기 때문이다. 하지만 온도의 변화는 식물병원균의 병원성뿐만 아니라 식물의 저항성

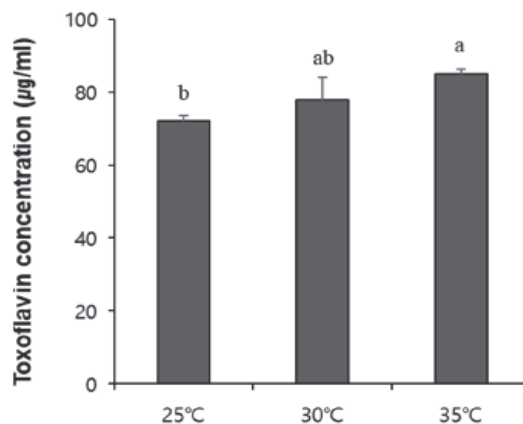


Fig. 4. Toxoflavin production by *Burkholderia glumae* depending on temperatures. *B. glumae* was cultured in LB broth at 25°C, 30°C, and 35°C for 24 h, and the amount of toxoflavin was quantified spectrometrically. Results are means and standard deviation of 3 replicates. Different letters indicate significant differences by Turkey's multiple range test, $P < 0.05$.

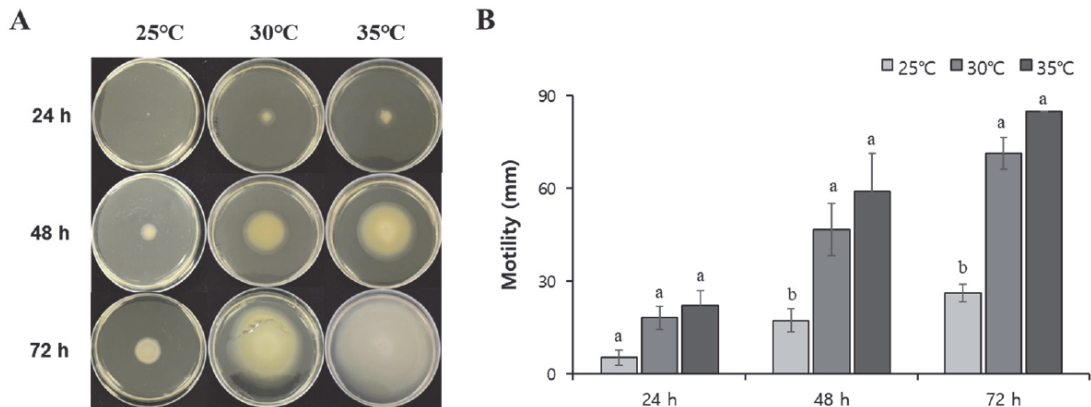


Fig. 5. Motility patterns of *Burkholderia glumae* depending on temperatures. (A) *B. glumae* was cultured on 0.25% agar LB medium at 25°C, 30°C, and 35°C. The diameter of colony was measured 24, 48, and 72h. After incubation at each temperature. (B) Bar graph shows the diameter of the colonies on the media in time. Results are means and standard deviation of 3 replicates. Different letters indicate significant differences by Turkey's multiple range test, $P < 0.05$.

에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 향후 온도변화에 따른 벼의 저항성 변화를 고려하여 기후변화가 발병에 미칠 영향에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 기후변화에 따른 온도의 증가는 *B. glumae*의 병원성에 유리한 환경을 조성하고, 세균벼알마름병의 발생도 증가될 수 있을 것으로 예상됨에 따라 이에 대한 대비가 적극적으로 이루어져야될 것이다. 또한, 이의 정확한 예측을 위해서는 여러 병원성 관련 인자들의 변화에 대한 연구도 필요할 것이다.

적 요

세균벼알마름병은 쌀 생산과 품질에 심각한 영향을 주는 병 중 하나로 국내에서는 벼알마름증상을 보이는 이삭에서 3종의 *Burkholderia* (*Burkholderia glumae*, *B. gladioli*, *B. plantarii*)가 보고되었다. 벼알마름 증상은 출수기 동안 지속되는 고온다습한 환경조건으로 인하여 발생면적이 증가하고 있으나, *Burkholderia* 속의 의해 발생하는 벼알마름 증상의 발병에 대한 환경 변화의 영향에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 3종의 *Burkholderia* 병원균을 출수기에 벼 이삭에 접종하여 여러 온도(25°C, 30°C 및 35°C) 조건의 생육상과 온도 차이가 있는 포장에서 재배하면서 병 발생정도를 비교하였다. *B. glumae*는 실내 및 포장의 고온(35°C)에서 높은 발병률을 보인 반면, *B. gladioli*와 *B. plantarii*는 유의미한 병 발생변화를 보이지는

않았다. 고온(35°C)에서 *B. glumae*에 의한 병 발생이 증가한 것은 독소플라빈 생산과 이동성의 증가에 의한 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 기후 변화로 인한 출수기 동안의 온도 상승이 *B. glumae*에 의해 유발되는 세균벼알마름병 발생을 증가시킬 수 있음을 시사하며 이러한 병 발생의 증가에 대비하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 신농업기후변화대응체계구축사업(과제번호: RS-2021-RD009498)의 지원으로 수행된 결과입니다. 과제 수행을 위해 상주지역의 벼 관리에 도움을 주신 조준현 연구관님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Anderson, P. K., A. A. Cunningham, N. G. Patel, F. J. Morales, P. R. Epstein, and P. Daszak, 2004: Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution* **19**(10), 535-544.
- Azegami, K., K. Nishiyama, Y. Watanabe, T. Suzuki, M. Yoshida, K. Nose, and S. Toda, 1985: Tropolone as a root growth-inhibitor produced by a plant pathogenic *Pseudomonas* sp. causing

- seedling blight of rice. *Japanese Journal of Phytopathology* **51**(3), 315-317.
- Baite, M. S., M. K. Khokhar, and R. P. Meena, 2021: Management of false smut disease of rice: A Review. IntechOpen.
- Birch, P. R. J., G. Bryan, B. Fenton, E. M. Gilroy, I. Hein, J. T. Jones, A. Prashar, M. A. Taylor, L. Torrance, and I. K. Toth, 2012: Crops that feed the world 8: Potato: Are the trends of increased global production sustainable? *Food Security* **4**(4), 477-508.
- Characklis, W. G., 1990: Biofilm processes. *Biofilms*, 195-231.
- Cha, K. H., Y. H. Lee, S. J. Ko, S. K. Park, and I. J. Park, 2001: Influence of weather condition at heading period on the development of rice bacterial grain rot caused by *Burkholderia glumae*. *Research in Plant Disease* **7**(3), 150-154.
- Chen, R., I. K. Barphagha, H. Karki, and J. H. Ham, 2012: Dissection of quorum-sensing genes in *Burkholderia glumae* reveals non-canonical regulation and the new regulatory gene tofM for toxoflavin production. *PLoS One* **7**(12), e52150.
- Choi, O., Y. Lee, I. Han, H. Kim, E. Goo, and J. Kim, 2013: A simple and sensitive biosensor strain for detecting toxoflavin using β -galactosidase activity. *Biosensors and Bioelectronics* **50**, 256-261.
- Chung, H., W.-I. Lee, S. Y. Choi, N. J. Choi, S.-M. Kim, J.-Y. Yoon, and B. C. Lee, 2023: Outbreak of rice panicle blast in Jeonbuk province of Korea in 2021. *The Plant Pathology Journal* **39**(1), 136-140.
- Elad, Y., and I. Pertot, 2014: Climate change impacts on plant pathogens and plant diseases. *Journal of Crop Improvement* **28**(1), 99-139.
- Goto, K., and K. Ohata, 1956. New bacterial diseases of rice (brown stripe and grain rot). *Annals of the Phytopathological Society of Japan* **21**, 46-47.
- Ham, J. H., R. A. Melanson, M. C. Rush, 2011: *Burkholderia glumae*: next major pathogen of rice? *Molecular Plant Pathology* **12**(4), 329-339.
- Hasanuzzaman, M., K. Nahar, M. Alam, R. Roychowdhury, and M. Fujita, 2013: Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences* **14**(5), 9643-9684.
- Hockett, K. L., A. Y. Burch, and S. E. Lindow, 2013: Thermo-regulation of genes mediating motility and plant interactions in *Pseudomonas syringae*. *PLoS One* **8**(3), e59850.
- Hunjan, M., and J. S. Lore, 2020: Climate change: Impact on plant pathogens, diseases, and their management. *Crop protection under changing climate*, 85-100.
- Islam, M. R., R. Jannat, I. A. Protic, M. N. A. Happy, S. I. Samin, M. M. Mita, S. Bashar, M. M. Masud, H. Islam, M. N. Uddin, M. A. Akter, and M. Z. Alam, M., 2023: First report of bacterial panicle blight in rice caused by *Burkholderia gladioli* in Bangladesh. *Plant Disease* **107**(9), 2837.
- Iqbal, A., P. R., Panta, J. Ontoy, J. Bruno, J. H. Ham, and W. T. Doerrler, 2021: Chemical or genetic alteration of proton motive force results in loss of virulence of *Burkholderia glumae*, the cause of rice bacterial panicle blight. *Applied and Environmental Microbiology* **87**(18), e00915-21.
- Jang, J.-O., B.-H. Kim, J.-B. Lee, J.-H. Joa, and S. Koh, 2019: Evaluation of bacterial spot disease of *Capsicum annuum* L. in drought stress environment by high temperature. *Research Plant Disease* **25**(2), 62-70.
- Kim, J., J. G. Kim, Y. Kang, J. Y. Jang, G. J. Jog, J. Y. Lim, S. Kim, H. Suga, T. Nagamatsu, and I. Hwang, 2004: Quorum sensing and the LysR-type transcriptional activator ToxR regulate toxoflavin biosynthesis and transport in *Burkholderia glumae*. *Molecular Microbiology* **54**(4), 921-934.
- Kim, J., Y. Kang, O. Choi, Y. Jeong, J.-E. Jeong, J. Y. Lim, M. Kim, J. S. Moon, H. Suga, and I. Hwang, 2007: Regulation of polar flagellum genes is mediated by quorum sensing and FlhDC in *Burkholderia glumae*. *Molecular microbiology* **64**(1), 165-179.
- Kim, N., D. Lee, S.-B. Lee, G.-H. Lim, S.-W. Kim, T.-J. Kim, D. S. Park, and Y.-S. Seo, 2023: Understanding *Burkholderia glumae* BGR1 virulence through the application of toxoflavin-degrading enzyme, TxeA. *Plants* **12**(23), 3934.
- Kim, S. H., J. Choi, Y.-J. Choi, B. Y. Park, S. H. Lee, G. H. Kim, H. G. Kong, D. Kim, S. Kim, Y. Kim, C.-G. Back, H.-S. Byun, J. K. Seo, J. M. Yue, J.-Y. Yoon, D.-H. Lee, S.-Y. Lee, S. Lim, Y. Jeon, J. Chun, I. Choi, I.-Y. Choi, H.-W. Choi, J. S. Hong, and S.-B. Hong, 2023: Introduction of list of plant diseases in Korea 6.1st edition (2023 revised version). *Research in Plant Disease* **29**(4), 331-344. (In Korea)
- Kim, S.-M., J. E. Ra, M. H. Kang, B. C. Lee, N. J. Choi, T. H. Noh, and J. Y. Choi, 2018: Disease management and resistance test methods of

- bacterial grain rot. Rural Development Administration.
- Kurita T., H. Tabei, and T. Sato, 1964: A few studies on factors associated with infection of bacterial grain rot of rice. *Annals of the Phytopathological Society of Japan* **29**, 60.
- Lee, E. W., and S. Z. Park, 1979: Interpretation on the epidemic outbreak of rice blast disease in Korea. *Korean Journal of Crop Science* **24**(1), 1-10.
- Matsuda, I., and Z. Sato, 1988: Relation between pathogenicity and pigment productivity in the causal agent of bacterial grain rot of rice. *Annals of the Phytopathological Society of Japan* **54**, 378
- Mizobuchi, R., S. Fukuoka, C. Tsuiki, S. Tsushima, and H. Sato, 2018: Evaluation of major Japanese rice cultivars for resistance to bacterial grain rot caused by *Burkholderia glumae* and identification of standard cultivars for resistance. *Breeding science* **68**(4), 413-419.
- Ochi, A., H. Konishi, S. Ando, K. Sato, K. Yokoyama, S. Tsushima, S. Yoshida, T. Morikawa, T. Kaneko, T. and H. Takahashi, 2017: Management of bakanae and bacterial seedling blight diseases in nurseries by irradiating rice seeds with atmospheric plasma. *Plant Pathology* **66**, 67-76.
- Oh S., K. H. Moon, I.-C. Son, E. Y. Song, Y. E. Moon, and S. C. Koh, 2014: Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of Chinese cabbage in response to high temperature. *Horticultural Science and Technology* **32**(3), 318-329.
- Ottmann, K. M., & J. F. Miller., 1997: Roles for motility in bacterial-host interactions. *Molecular Microbiology* **24**(6), 1109-1117.
- Onaga, G., K. D. Wydra, B. Koopmann, Y. Séré, and A. von Tiedemann, 2016: Elevated temperature increases in planta expression levels of virulence related genes in *Magnaporthe oryzae* and compromises resistance in *Oryza sativa* cv. Nipponbare. *Functional Plant Biology* **44**(3), 358-371.
- Peng, S., J. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. Zhong, G. S. Centeno, G. S. Khush, and K. G. Cassman, 2004: Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **101**(27), 9971-9975.
- Ra, J. E., M. H. Kang, S. J. Seo, B. C. Lee, N. J. Choi, I. M. Chung, and S.-M. Kim, 2016: First report of bacterial grain rot caused by *Burkholderia plantarii* in Republic of Korea. *Journal of Plant Pathology* **98**(3), 693.
- Romantschuk, M., 1992: Attachment of plant pathogenic bacteria to plant surfaces. *Annual review of phytopathology* **30**(1), 225-243.
- Schauberger, B., S. Archontoulis, A. Arneith, J. Balkovic, P. Ciaia, D. Deryng, J. Elliott, C. Folberth, N. Khabarov, C. Muller, T. A. M. Pugh, S. Rolinski, S. Schaphoff, E. Schmid, X. Wang, W. Schlenker, and K. Frieler, 2017: Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. *Nature Communications* **8**(1), 13931.
- Song, W.-Y., and H.-M. Kim, 1999: Current status of bacterial grain rot of rice in Korea. *Plant Disease and Agriculture* **5**(1), 1-7.
- Trung, H. M., M. V. Van, N. V. Vien, D. T. Lam, and M. Lien, 1993: Occurrence of rice grain rot disease in Vietnam. *International Rice Research Notes* **18**(3), 30.
- Venieraki, A., P. Ch. Tsalgaidou, D. G. Georgakopoulos, M. Dimou, and P. Katinakis, 2016: Swarming motility in plant-associated bacteria. *Hellenic Plant Protection Journal* **9**(1), 16-27.
- Wang, H.-D., J.-P. Chen, H.-M. Zhang, X.-L. Sun, J.-L. Zhu, A.-G. Wang, W.-X. Sheng and M. J. Adams, 2008: Recent *Rice stripe virus* epidemics in Zhejiang Province, China, and experiments on sowing date, disease-yield loss relationships, and seedling susceptibility. *Plant Disease* **92**(8), 1190-1196.
- Wang, M., M. Hashimoto and Y. Hashidoko, 2013: Carot-4-en-9, 10-diol, a conidiation-inducing sesquiterpene diol produced by *Trichoderma virens* PS1-7 upon exposure to chemical stress from highly active iron chelators. *Applied and Environmental Microbiology* **79**(6), 1906-1914.