농약과학회지 (Korean J. Pestic. Sci.)
Vol. 30, No. 3, pp. 172-179 (2026)
Open Access https://doi.org/10.7585/kjps.2026.30.3.172
ORIGINAL ARTICLES

Online ISSN 2287-2051
Print ISSN 1226-6183
Check for updates

난방제 식물병 방제용 미생물 제제 *Streptomyces nogalater* KRA0514-6 (KNB14980 EM 98%)의 인축 및 환경생물에 대한 독성 평가

윤선영[1,3] · 이영준[1] · 권보원[2] · 박민구[3] · 민석기[1]*

[1]한국화학융합시험연구원, [2](주)경농 R&D본부, [3]전북대학교 생물환경화학과

Toxicity Assessment of *Streptomyces nogalater* KRA0514-6 (KNB14980 EM 98%), a Microbial Formulation for the Control of Hard-to-manage Plant Diseases, in Mammals and Environmental Organisms

Seon-yeong Yun[1,3], Young-jun Lee[1], Bo-won Kwon[2], Min-goo Park[3], and Seok-ki Min[1]*

[1]Korea Testing & Research Institute (KTR), Gwacheon 13810, Korea
[2]R&D Division, Kyungnong Corp., Icheon 17405, Korea
[3]Department of Bioenvironmental Chemistry, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

(Received on July 7, 2026. Revised on July 24, 2026. Accepted on July 28, 2025)

Abstract This study evaluated the toxicological characteristics of *Streptomyces nogalater* KRA0514-6 (KNB14980 EM 98%), a microbial pesticide for the control of hard-to-manage plant diseases. Acute oral and acute dermal toxicity were assessed in Sprague–Dawley rats, skin and eye irritation/corrosion were evaluated in New Zealand White rabbits, and acute toxicity to *Danio rerio* and acute contact toxicity to *Apis mellifera* were also assessed. In the acute oral toxicity test, no mortality, treatment-related signs, or gross lesions were observed, and the LD_{50} was greater than 2,000 mg/kg body weight. In the acute dermal toxicity test, no mortality or systemic toxicity was observed, and the LD_{50} was greater than 4,000 mg/kg body weight; however, reversible local dermal reactions, including discoloration, erythema, scab formation, and desquamation, were noted. In the skin irritation test, erythema was observed without edema or corrosion, and all responses were reversible, indicating that the test substance was classified as non-irritant. No eye irritation was observed. In acute toxicity tests using *Danio rerio* and *Apis mellifera,* no mortality or abnormal signs were observed, and the LC_{50} and LD_{50} values were greater than 100 mg/L and 100 μg a.i./bee, respectively. These results indicate that KNB14980 EM 98% has generally low acute toxicity in mammals, although mild and reversible local dermal responses may occur after skin exposure. And also, it is low toxic for fish and bees.

Key words: Acute toxicity, Ecotoxicity, *Streptomyces nogalater*, Local toxicity, Microbial pesticide

서 론

전 세계적으로 농업 생산성 향상을 위해 화학농약의 사용이 지속적으로 확대되어 왔으나, 반복적인 사용에 따른 병원균의 약제저항성 발현, 토양 및 수질오염, 비표적 생물에 대한 영향, 그리고 농산물 잔류농약에 대한 소비자 우려가 지속적으로 제기되고 있다(Ayilara et al., 2023; Ruiu, 2018; Vermelho et al., 2024). 특히 동일하거나 유사한 작용기작을 갖는 화학살균제의 장기 사용은 병원균의 저항성 출현을 촉진하여 방제효율을 저하시킬 뿐 아니라 지속가능한 농업생산 체계를 위협하는 주요 요인으로 인식되고 있다(O'Brien, 2017). 이에 따라 화학농약을 대체하거나 보완할 수 있는 환경친화적이고 지속가능한 병해관리 기술 개발이 중요한 과제로 대두되고 있다.

이러한 배경에서 미생물농약(microbial pesticides)은 친환경

*Corresponding author
E-mail: skmin@ktr.or.kr

농업 실현을 위한 유망한 대안으로 주목받고 있다(Ruiu, 2018; Ayilara et al., 2023). 미생물농약은 세균, 진균, 바이러스 및 방선균 등 다양한 미생물을 이용하여 식물병원균을 억제하거나 작물의 생육을 촉진하는 생물학적 방제기술로 정의되며, 환경 중 분해가 비교적 빠르고 비표적 생물에 대한 영향이 상대적으로 낮아 지속가능한 농업에 적합한 수단으로 평가되고 있다(Vermelho et al., 2024; Chaudhary et al., 2024). 최근에는 미생물농약뿐 아니라 식물유래 농자재 및 나노기술 기반 생물농약 개발도 활발히 이루어지고 있으나, 실제 농업 현장에서의 적용성과 지속가능성 측면에서 미생물 기반 제제의 활용 가능성이 특히 크게 주목받고 있다(Ayilara et al., 2023).

미생물 기반 살균제는 병원균에 대한 직접적인 길항작용 외에도 항생물질 생산, 세포벽 분해효소 분비, 철 이온 경쟁, 휘발성 유기화합물 생성 및 식물 면역반응 유도 등 다양한 기작을 통하여 식물병을 억제하는 것으로 알려져 있다(Haas and Défago, 2005; Backer et al., 2018; Köhl et al., 2019; Chaudhary et al., 2024). 또한 근권 및 식물체 내 유용미생물은 식물과의 상호작용을 통해 생육을 촉진하고 병원균의 정착과 증식을 억제함으로써 작물의 건전성 유지에 기여할 수 있다(Lugtenberg and Kamilova, 2009; Compant et al., 2019). 최근에는 다양한 *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.* 및 기타 유용미생물을 활용한 생물학적 방제 연구와 제품 개발이 활발히 진행되고 있으며, 미생물 다양성과 작물 미생물군집의 활용이 향후 식물병 방제의 중요한 방향으로 제시되고 있다(Berg et al., 2017; Lee et al., 2023; Negi et al., 2023).

국내에서도 화학농약 사용 저감과 친환경 농업 확대를 위한 정책적·산업적 요구가 증가함에 따라 미생물농약 및 유기농업자재 개발이 활발히 추진되고 있다. 특히 시설재배 작물에서 문제되는 병해를 대상으로 한 미생물 제제의 개발과 현장 적용 연구가 지속적으로 수행되고 있으며, 친환경 농업현장에서 활용 가능한 미생물 살균제의 제품화 필요성도 점차 증대되고 있다(Kim et al., 2017). 난방제 식물병의 효율적 관리를 위한 미생물 제제의 개발은 이러한 흐름과 맞물려 중요한 연구 분야로 자리매김하고 있다.

한편 미생물농약은 일반적으로 화학농약에 비해 상대적으로 낮은 독성을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 살아있는 미생물 자체 또는 이들이 생성하는 이차대사산물을 포함할 수 있으므로 인축 및 비표적 환경생물에 대한 독성 특성을 과학적으로 입증하는 과정이 필요하다(Wend et al., 2024; Karaoğlan et al., 2024). 특히 미생물 제제는 포유류 독성뿐 아니라 수생생물 및 유익곤충을 대상으로 독성 특성을 함께 평가할 필요가 있다(OECD, 2014; OECD, 2018). 본 연구의 시험물질인 *Streptomyces nogalater* KRA0514-6 (KNB14980 EM 98%)는 갈색 액상의 사균 미생물 제제로서 난방제 식물병 방제용 친환경 살균제 개발을 목적으로 선발되었다. 따라서 본 연구에서는 KNB14980 EM 98%를 대상으로 급성경구독성, 급성경피독성, 피부자극성, 안점막자극성, 담수어류 급성독성 및 꿀벌 급성접촉독성시험을 수행하여 인축 및 환경생물에 대한 독성 특성을 평가하였다.

재료 및 방법

시험물질

본 연구에 사용한 시험물질은 난방제 식물병 방제용 사균 미생물 제제인 *Streptomyces nogalater* KRA0514-6 (KNB14980 EM 98%)로, 한국화학연구원으로부터 제공받아 사용하였다. 본 시험에 사용된 시험물질은 불활화(inactivated)된 사균 제제였으며, 갈색 액상의 제형으로 제품 표기농도는 98%였다. 시험 전까지 권장 보관조건에 따라 보관하였고, 각 시험에 사용하기 직전에 균질화하여 사용하였다.

실험동물 및 시험생물

인축 독성 평가는 Sprague-Dawley(SD)계 rat와 New Zealand White rabbit를 이용하여 수행하였으며, 환경생물 독성 평가는 제브라피시(*Danio rerio*)와 서양종 꿀벌(*Apis mellifera*)을 이용하여 수행하였다. 각 실험동물 및 시험생물은 일정 기간 순화한 후 건강상태를 확인하여 시험에 사용하였다. 실험동물 및 시험생물의 일반적 특성은 Table 1과 같다. 각 시험은 해당 OECD 시험지침과 농촌진흥청 「농약 및 원제의 등록기준」에 따라 수행하였다 (OECD TG 203, 214, 402, 404, 405, 423; Rural Development Administration, 2025a-d).

Table 1. General characteristics of test organisms used in the safety evaluations

Test name	Species	Sex
Acute Oral Toxicity	SD rat	Female
Acute Dermal Toxicity	SD rat	Male / Female
Acute Dermal Irritation/Corrosion	New Zealand White rabbit	Male
Acute Eye Irritation/Corrosion	New Zealand White rabbit	Male
Fish, Acute Toxicity	*Danio rerio*	-
Honeybees, Acute Contact Toxicity	*Apis mellifera*	Worker bee

인축 독성 평가

급성경구독성시험

급성경구독성은 OECD TG 423에 따라 SD계 암컷 rat를 이용하여 평가하였다. 실험동물은 시험물질 투여 전 약 18시간 절식시켰으며, 시험물질은 300 및 2,000 mg/kg body weight(B.W.) 수준으로 조제한 후 경구용 sonde를 장착한 주사기를 이용하여 위내에 1회 강제 경구투여(gavage) 하였다. 투여 후 약 3–4시간에 사료를 다시 공급하였으며, 음수는 시험기간 동안 자유섭취(ad libitum)하도록 하였다.

투여 후 14일 동안 임상증상 및 사망 여부를 관찰하였으며, 투여 당일에는 투여 후 0.5, 1, 2, 3 및 4시간에 추가 관찰을 실시하였다. 체중은 투여 전과 투여 후 1, 3, 7 및 14일에 측정하였다. 사료 및 음수는 시험기간 동안 자유섭취하도록 하였으며, 사료섭취량 및 음수량은 측정하지 않았다. 관찰 종료 후 생존동물은 isoflurane으로 마취한 후 방혈치사하였으며, 주요 장기에 대한 육안부검을 실시하였다. 이를 바탕으로 반수치사량(LD_{50})을 판정하였다.

급성경피독성시험

급성경피독성은 OECD TG 402에 따라 SD계 rat를 이용하여 평가하였다. 투여 전날 실험동물의 등 부위를 제모한 후, 시험물질을 4,000 mg/kg body weight(B.W.) 수준으로 거즈(gauze)에 적용하여 제모 부위(체표면적의 약 10%)에 도포하였다. 시험물질의 유실을 방지하기 위해 비자극성 테이프와 탄력붕대를 이용하여 폐첩(occlusive dressing)한 상태로 24시간 노출시켰다. 노출 종료 후 도포물을 제거하고, 투여 부위는 멸균증류수로 세척하여 잔여 시험물질을 제거하였다.

이후 14일 동안 임상증상, 사망 여부 및 체중변화를 관찰하였으며, 투여 당일에는 투여 후 0.5시간 및 1–4시간까지 매시간 관찰하였다. 체중은 투여 전과 투여 후 7 및 14일에 측정하였다. 시험 종료 후 생존동물에 대해 isoflurane 마취 후 방혈치사하여 주요 장기에 대한 육안부검을 실시하였으며, 이를 바탕으로 반수치사량(LD_{50})을 평가하였다.

피부자극성시험

피부자극성은 OECD TG 404에 따라 rabbit를 이용하여 평가하였다. 시험물질 0.5 mL를 거즈(gauze)에 균일하게 도포하여 제모한 등 부위에 적용한 후, 비자극성 테이프와 탄력붕대를 이용하여 4시간 동안 폐첩(occlusive dressing) 하였다. 초기시험은 1마리를 대상으로 실시하였으며, 4시간 노출 시 피부부식성이 관찰되지 않아 추가 2마리를 이용한 확인시험을 수행하였다. 노출 종료 후 시험물질을 제거하고 멸균증류수로 처리 부위를 세척하였다.

피부반응은 시험물질 제거 후 1, 24, 48 및 72시간에 관찰하였으며, 피부반응이 지속된 경우에는 회복 여부를 확인하기 위해 최대 14일까지 추가 관찰하였다. 홍반/가피 형성 및 부종은 Draize 기준에 따라 점수화하여 평균 자극값(mean score)을 산출하였으며, 피부자극성 여부는 피부반응의 정도와 가역성을 종합하여 판정하였다.

안점막자극성시험

안점막자극성은 OECD TG 405에 따라 rabbit를 이용하여 평가하였다. 시험물질 처리 전 양안의 각막, 홍채 및 결막에 이상이 없음을 확인한 후, 시험물질 0.1 mL를 우안의 결막낭(conjunctival sac)에 단회 점적하고 좌안을 대조안으로 사용하였다. 시험물질 점적 후 약 1초간 상·하안검을 폐안하여 시험물질의 누출을 방지하였으며, 처리 24시간 후 잔여 시험물질이 있는 경우 멸균생리식염수로 세척하였다.

시험은 초기시험과 확인시험으로 실시하였으며, 초기시험에서 심한 안손상 또는 심한 자극성이 관찰되지 않아 추가 2마리를 이용한 확인시험을 수행하였다. 안점막반응은 시험물질 처리 후 1, 24, 48 및 72시간에 관찰하였으며, 각막 혼탁, 홍채 이상, 결막 발적 및 결막 부종을 Draize 기준에 따라 점수화하여 평균 자극값(mean score)을 산출하고, 안점막자극성 여부를 판정하였다.

환경생물 독성 평가

담수어류 급성독성시험

담수어류 급성독성은 OECD TG 203에 따라 제브라피시(*Danio rerio*)를 이용하여 평가하였다. 예비시험에서 100 mg/L까지 치사 및 이상증상이 관찰되지 않아, 본시험은 100 mg/L의 한계시험(limit test)으로 실시하였다. 시험은 시험용액을 교체하지 않는 지수식(static system) 조건에서 96시간 동안 수행하였으며, 전장 1–2 cm의 제브라피시를 대조군과 처리군에 각각 10마리씩 노출시켰다. 시험용액은 시험물질을 시험수에 분산하여 조제하였으며, 시험 중에는 먹이를 공급하지 않았다.

치사 및 이상행동은 시험물질 처리 후 2, 5, 24, 30, 48, 54, 72, 78 및 96시간에 관찰하였으며, 치사 개체는 즉시 제거하였다. 노출 종료 후에는 각 군의 생존 개체에 대해 체중과 전장을 측정하였다. 시험기간 동안 수온(21–25°C), pH(6.0–8.5), 용존산소량(포화용존산소의 60% 이상) 및 광주기(명 16시간/암 8시간)를 유지하였다. 시험 결과를 바탕으로 반수치사농도(LC_{50})와 무영향관찰농도(NOEC)를 산출하였다.

꿀벌 급성접촉독성시험

꿀벌 급성접촉독성은 OECD TG 214에 따라 서양종 꿀벌(*Apis mellifera*) 일벌을 이용하여 평가하였다. 예비시험에서 100 μg a.i./bee까지 치사 및 이상증상이 관찰되지 않아, 본

Table 2. Summary of toxicity tests and experimental conditions

Test name	OECD TG	Test system	Exposure /dose	Observation period	Endpoint
Acute Oral Toxicity	423	SD rat	300, 2,000 mg/kg B.W.	14 days	LD_{50}
Acute Dermal Toxicity	402	SD rat	4,000 mg/kg B.W.	14 days	LD_{50}
Acute Dermal Irritation/Corrosion	404	Rabbit	0.5 mL	Up to 14 days	Draize score, classification
Acute Eye Irritation/Corrosion	405	Rabbit	0.1 mL	Several days	Draize score, classification
Fish, Acute toxicity	203	*Danio rerio*	100 mg/L	96 h	LC_{50}, NOEC
Honeybees, Acute Contact Toxicity	214	*Apis mellifera*	100 μg a.i./bee	48 h	LD_{50}, NOEC

시험은 100 μg a.i./bee의 한계시험(limit test)으로 실시하였다. 시험은 반복당 10마리씩 3반복으로 구성하였으며, 시험생물은 무작위로 배정하였다. 시험 전 순화과정은 실시하지 않았으며, 꿀벌은 CO_2로 마취한 후 micro syringe를 이용하여 시험용액 1 μL를 흉부에 1회 처리하였다.

노출기간은 48시간이었으며, 시험용기는 원통형 스테인리스 철망 케이지를 사용하였다. 시험기간 동안 온도는 23–27°C, 상대습도는 50–70% 및 암조건을 유지하였으며, 시험물질 처리 후 50% 자당용액을 자유섭취하도록 공급하였다. 치사 및 이상증상은 시험물질 처리 후 4, 24 및 48시간에 관찰하였으며, 시험 결과를 바탕으로 반수치사약량(LD_{50})과 무영향관찰농도(NOEC)를 평가하였다.

인축 및 환경생물 독성 평가에 적용한 시험법과 주요 시험조건은 Table 2에 제시하였다.

결과 및 고찰

인축 독성 평가

급성경구독성시험

KNB14980 EM 98%의 급성경구독성시험 결과는 Table 3에 제시하였다. 시험기간 동안 시험물질에 의한 사망동물은 관찰되지 않았으며, 모든 실험동물에서 시험물질과 관련된 임상증상은 확인되지 않았다. 체중은 전반적으로 정상적인 증가 양상을 보였으나, 일부 개체에서는 투여 후 3일 또는 7일 시점에서 1.01–3.73%의 일시적인 체중감소가 관찰되었다. 그러나 해당 변화는 경미하였고 시험물질과 관련된 임상증상 및 육안부검 소견이 동반되지 않아 독성학적 의미는 제한적인 것으로 판단되었다. 시험 종료 후 실시한 육안부검에서도 시험물질과 관련된 이상소견은 관찰되지 않았다. 따라서 KNB14980 EM 98%의 반수치사량(LD_{50})은 2,000 mg/kg B.W. 초과로 평가되었다.

급성경피독성시험

KNB14980 EM 98%의 급성경피독성시험 결과는 Table 3에 함께 제시하였다. 시험기간 동안 시험물질에 의한 사망동물은 관찰되지 않았으며, 체중변화와 육안부검에서도 전신 독성과 관련된 이상소견은 확인되지 않았다. 그러나 시험물질 적용 부위에서는 착색화, 발적, 가피형성 및 표피박리가 관찰되었으며, 이러한 국소 반응은 수컷에서 9일 이내, 암컷에서 13일 이내에 모두 회복되었다. 따라서 KNB14980 EM 98%의 반수치사량(LD_{50})은 4,000 mg/kg B.W. 초과로 평가되었다.

피부자극성시험

KNB14980 EM 98%의 피부자극성시험 결과는 Table 4에 제시하였다. 시험물질 적용 후 모든 실험동물에서 피부부식성은 관찰되지 않았다. 반면 초기시험과 확인시험에서 홍반이 관찰되었으며, Draize 기준에 따른 평균점수는 홍반/가피 형성 0.7–1.3, 부종 0.0으로 나타났다. 관찰된 피부반응은 모두 가역적이었으며, 초기시험에서는 14일, 확인시험에서는 각각

Table 3. Acute oral and dermal toxicity, clinical signs, and necropsy findings of KNB14980 EM 98%

Item	Acute Oral Toxicity	Acute Dermal Toxicity
Dose	2,000 mg/kg B.W.	4,000 mg/kg B.W.
Mortality	0/6	0/10
Clinical signs	Not observed	Local discoloration, erythema, scab formation, and desquamation (reversible)
Body weight change	Transient decrease in some animals (1.01–3.73%)	Normal gain
Gross lesions	Not observed	Not observed
Endpoint	LD_{50} > 2,000 mg/kg B.W.	LD_{50} > 4,000 mg/kg B.W.

Table 4. Skin and eye irritation/corrosion potential of KNB14980 EM 98% in rabbits

Item	Skin irritation	Eye irritation
Draize score	Erythema/eschar: 0.7–1.3; edema: 0.0	Cornea: 0.0; iris: 0.0; conjunctival redness: 0.0; conjunctival edema: 0.0
Main response	Erythema observed; no edema or corrosion	No ocular response observed
Reversibility	Recovered within 3–14 days	Not applicable
Endpoint	Not classified as irritant	No irritation

10일 및 3일 이내에 회복되었다. 이에 따라 KNB14980 EM 98%는 피부반응이 관찰되었으나, 최종적으로는 분류기준상 피부자극성이 없는 물질로 평가되었다.

안점막자극성시험

KNB14980 EM 98%의 안점막자극성시험 결과는 Table 4에 함께 제시하였다. 시험물질 점적 후 초기시험과 확인시험의 모든 동물에서 각막 혼탁, 홍채 이상, 결막 발적 및 결막 부종은 관찰되지 않았다. 시험기간 동안 시험물질과 관련된 임상증상 또한 확인되지 않았으며, 모든 평가항목의 평균점수는 0.0이었다. 따라서 시험물질은 안점막반응의 분류기준상 자극이 없는 물질로 평가되었다.

환경생물 독성 평가

담수어류 급성독성시험

KNB14980 EM 98%의 담수어류 급성독성시험 결과는 Table 5에 제시하였다. 제브라피시에 시험물질을 96시간 노출한 결과, 처리군에서 치사개체는 관찰되지 않았으며 유영행동, 평형상실 및 호흡이상 등 독성과 관련된 이상행동도 확인되지 않았다. 시험 유효성 검토에서 대조군의 치사율은 0%였고, 노출기간 동안 용존산소량도 유효성 기준을 만족하였다. 이에 따라 48시간 및 96시간 LC_{50}은 모두 100 mg/L 초과로 평가되었으며, NOEC는 100 mg/L로 나타났다.

꿀벌 급성접촉독성시험

KNB14980 EM 98%의 꿀벌 급성접촉독성시험 결과는 Table 5에 함께 제시하였다. 시험물질 처리 후 48시간 동안 시험물질에 의한 사망 개체는 관찰되지 않았으며, 진전, 마비 및 운동성 저하 등 시험물질과 관련된 이상증상도 확인되지 않았다. 따라서 24시간 및 48시간 LD_{50}은 모두 100 μg a.i./bee 초과로 평가되었으며, NOEC는 100 μg a.i./bee로 나타났다.

최근 화학농약의 지속적인 사용에 따라 병원균의 약제저항성 발달, 환경오염 및 비표적 생물에 대한 영향이 중요한 문제로 대두되면서 미생물을 이용한 생물학적 방제기술의 중요성이 점차 증가하고 있다(Ayilara et al., 2023; Ruiu, 2018). 미생물농약은 병원균에 대한 길항작용, 항균물질 생산, 식물의 유도저항성(induced systemic resistance, ISR) 활성화 등 다양한 작용기작을 통해 병해를 억제할 수 있으며, 환경친화적 특성으로 인해 지속가능한 농업을 위한 대안으로 주목받고 있다(Backer et al., 2018; Köhl et al., 2019).

미생물농약은 일반적으로 화학농약에 비해 상대적으로 낮은 독성을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 살아있는 미생물 또는 미생물 유래 대사산물을 포함할 수 있으므로 인축 및 환경생물에 대한 독성 특성의 평가는 여전히 중요하다(OECD, 2014; OECD, 2018; Wend et al., 2024). 특히 미생물 제제의 독성 평가 시 포유류 독성뿐 아니라 수생생물 및 유익곤충에 대한 영향을 함께 고려하여 평가될 필요가 있으며, 이러한 자료 축적은 개별 제제의 독성학적 특성을 이해하는 데 기초가 된다(Karaoğlan et al., 2024).

본 연구에서는 난방제 식물병 방제용 미생물 제제인 KNB14980 EM 98%에 대하여 급성경구독성, 급성경피독성, 피부자극성, 안점막자극성, 담수어류 급성독성 및 꿀벌 급성접촉독성시험을 수행하였다. 그 결과 급성경구독성시험에서는 시험물질에 의한 사망, 임상증상 및 육안부검 소견이 관찰되지 않았으며, LD_{50}은 2,000 mg/kg B.W.를 초과하는 것으로 평가되었다. 이는 본 제제가 경구 노출 조건에서 뚜렷한 전신 급성독성을 유발하지 않음을 시사한다. 일부 개체에서 일시적인 체중감소가 관찰되었으나, 변화의 정도가 1.01–3.73%로 경미하였고, 다른 독성지표와의 연관성이 확인되지 않았다는 점에서 시험물질 관련 영향으로 보기는 어려웠다.

Table 5. Acute ecotoxicity of KNB14980 EM 98% to non-target environmental organisms

Test name	Test level	Mortality	Observations	Endpoint
Fish, Acute toxicity	100 mg/L	0/10	Not observed	LC_{50} > 100 mg/L; NOEC = 100 mg/L
Honeybees, Acute Contact Toxicity	100 μg a.i./bee	0/30	Not observed	LD_{50} > 100 μg a.i./bee NOEC = 100 μg a.i./bee

급성경피독성시험에서도 4,000 mg/kg B.W. 수준에서 사망이나 전신 독성 징후는 확인되지 않았고, 육안부검에서도 특이소견은 관찰되지 않았다. 그러나 시험물질 적용부위에서는 착색화, 발적, 가피형성 및 표피박리와 같은 국소 반응이 관찰되었으며, 이러한 변화는 모두 일정 기간 내 회복되었다. 또한 피부자극성시험에서는 피부부식성이나 부종은 관찰되지 않았으나, Draize 평균점수에서 홍반/가피 형성은 0.7–1.3, 부종은 0.0으로 나타났고, 모든 피부반응은 가역적이었다. 따라서 KNB14980 EM 98%는 전신 급성독성은 낮지만, 피부 또는 경피 노출 시 적용부위에서 일시적이고 가역적인 국소 반응을 유발할 가능성이 있음을 보여준다.

반면 안점막자극성시험에서는 각막, 홍채 및 결막 반응이 전혀 관찰되지 않았으며, 모든 평가항목의 평균점수는 0.0으로 나타났다. 이는 본 시험조건에서 KNB14980 EM 98%가 안구에 대해 유의한 자극성을 나타내지 않음을 시사한다. 피부와 안점막에서 반응 양상이 서로 달랐다는 점은 동일 제제라 하더라도 접촉 부위와 노출 조건에 따라 생체 반응이 다르게 나타날 수 있음을 보여준다.

제브라피시를 이용한 담수어류 급성독성시험에서 96시간 동안 100 mg/L 농도로 노출하였음에도 치사 및 이상행동이 관찰되지 않았고, 96 h-LC_{50}은 100 mg/L 초과로 평가되었다. 또한 꿀벌 급성접촉독성시험에서도 100 μg a.i./bee 처리 후 48시간 동안 사망이나 이상증상이 나타나지 않아 48 h-LD_{50}은 100 μg a.i./bee 초과로 평가되었다. 일반적으로 적용되는 EPA 급성독성 분류기준에 따르면, 어류에서 LC_{50} >100 mg/L는 practically non-toxic 수준에 해당하고, 꿀벌에서 LD_{50} >11 μg/bee는 practically non-toxic 수준으로 해석된다. 따라서 본 시험물질은 본 시험조건에서 담수어류와 꿀벌에 대해 낮은 급성독성을 나타내었다. 어류와 꿀벌은 각각 수생생물과 화분매개곤충을 대표하는 비표적 생물로 독성평가에 널리 활용되는 시험종이며(OECD, 2014), 본 연구 결과는 KNB14980 EM 98%의 어류 및 꿀벌에 대한 급성독성 특성을 제시하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다 (Karaoğlan et al., 2024).

이러한 결과는 기존에 보고된 미생물농약의 급성독성 특성과 대체로 유사한 경향을 나타낸다. *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.* 및 기타 길항미생물을 이용한 생물학적 방제제는 일반적으로 포유류와 비표적 생물에 대한 급성독성이 낮은 것으로 보고되어 왔으며(Haas and Défago, 2005; Berg et al., 2017; Lee et al., 2023), 본 연구에서도 KNB14980 EM 98%는 급성경구독성, 급성경피독성, 담수어류 급성독성 및 꿀벌 급성접촉독성시험에서 시험조건 내 사망 또는 전신 독성 영향이 관찰되지 않아 기존 보고와 유사한 경향을 보였다. 다만, 경피독성시험에서는 적용부위의 착색화, 발적, 가피형성 및 표피박리가 관찰되었고, 피부자극성시험에서는 가역적인 홍반이 확인되어 노출 경로에 따른 국소 반응이 나타날 수 있음을 확인하였다.

한편 본 연구는 급성독성 및 자극성시험을 중심으로 수행되었으므로 반복노출독성, 흡입노출, 병원성(pathogenicity), 감염성(infectivity), 면역학적 반응, 환경 중 장기 거동 및 미생물 유래 2차 대사산물의 잠재적 영향까지 포괄하지는 않았다(OECD, 2014; OECD, 2018; OECD, 2023). OECD에서는 미생물농약의 특성상 이러한 항목에 대한 추가적인 평가가 필요함을 제시하고 있으며(OECD, 2014; OECD, 2018), Wend 등(2024) 또한 미생물농약의 독성 특성을 종합적으로 이해하기 위해서는 병원성, 감염성 및 환경 중 거동에 대한 자료의 축적이 필요하다고 보고하였다.

종합하면, KNB14980 EM 98%는 본 연구에서 수행한 급성경구독성, 급성경피독성, 피부자극성, 안점막자극성, 담수어류 급성독성 및 꿀벌 급성접촉독성시험에서 시험조건 내 전신 급성독성은 관찰되지 않았으며, 피부에서는 가역적인 국소 반응이 확인되었다. 또한 담수어류와 꿀벌을 대상으로 한 급성독성시험에서는 시험농도에서 치사 및 이상증상이 관찰되지 않았다. 본 연구는 KNB14980 EM 98%의 급성독성 및 국소독성 특성을 제시하는 기초자료로 활용될 수 있으며, 병원성, 감염성 및 반복노출에 대한 독성 특성은 본 연구에 포함되지 않았으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년부터 2026년까지 수행한 농림수산식품기술기획평가원 기술사업화지원(R&D) “난방제 식물병 방제용 친환경 살균제 제품화”(과제번호: RS-2024-00398338)의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

Author Information and Contributions

Seon-yeong Yun, Safety Assessmnet & Analysis Center, Korea Testing & Research Institute (KTR), Gwacheon 13810, Korea, Researcher, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8464-8516

Young-jun Lee, Safety Assessmnet & Analysis Center, Korea Testing & Research Institute (KTR), Gwacheon 13810, Korea, Researcher

Bo-won Kwon, R&D Division, Kyungnong Corp., Icheon, Korea, Doctor of Philosophy

Min-goo Park, Department of Bioenvironmental Chemistry, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea, Professor

Seok-ki Min, Korea Testing & Research Institute (KTR),

Gwacheon 13810, Korea, Doctor of Philosophy, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4382-0303

이해상충관계

저자는 이해상충관계가 없음을 선언합니다.

Literature Cited

Ayilara MS, Adeleke BS, Akinola SA, Fayose CA, Adeyemi UT, Gbadegesin LA, Omole RK, Johnson RM, Uthman QO, Babalola OO, 2023. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. Front. Microbiol. 14:1040901.

Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S, Smith DL, 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. Front. Plant Sci. 9:1473.

Berg G, Köberl M, Rybakova D, Müller H, Grosch R, Smalla K, 2017. Plant microbial diversity is suggested as the key to future biocontrol and health trends. FEMS Microbiol. Ecol. 93:fix050.

Chaudhary R, Nawaz A, Khattak Z, et al., 2024. Microbial bio-control agents: A comprehensive analysis on sustainable pest management in agriculture. J. Agric. Food Res. 18:101421.

Compant S, Samad A, Faist H, Sessitsch A, 2019. A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. J. Adv. Res. 19:29-37.

Haas D, Défago G, 2005. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. Nat. Rev. Microbiol. 3:307-319.

Karaoğlan B, Alkassab AT, Borges S, et al., 2024. Microbial pesticides: Challenges and future perspectives for non-target organism testing. Environ. Sci. Eur. 36:205.

Kim YC, Kang B, Kim YH, Park SK, 2017. An effective and practical strategy for biocontrol of plant diseases using on-site mass cultivation of chitin-degrading bacteria. Res. Plant Dis. 23:19-34.

Köhl J, Kolnaar R, Ravensberg WJ, 2019. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: Relevance beyond efficacy. Front. Plant Sci. 10:845.

Lee J, Kim S, Jung H, et al., 2023. Exploiting bacterial genera as biocontrol agents: Mechanisms, interactions and applications in sustainable agriculture. J. Plant Biol. 66:485-498.

Lugtenberg B, Kamilova F, 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. Annu. Rev. Microbiol. 63:541-556.

Negi R, Sharma B, Kaur S, et al., 2023. Microbial antagonists: Diversity, formulation and applications for management of pest-pathogens. Egypt. J. Biol. Pest Control 33:105.

O'Brien PA, 2017. Biological control of plant diseases. Australas. Plant Pathol. 46:293-304.

OECD, 2014. OECD guidance to the environmental safety evaluation of microbial biocontrol agents. Paris, France.

OECD, 2018. Working document on the risk assessment of secondary metabolites of microbial biocontrol agents. Paris, France.

OECD, 2023. OECD issue paper on microbial contaminants limits for microbial pest control products. Paris, France.

Ruiu L, 2018. Microbial biopesticides in agroecosystems. Agronomy 8:235.

Rural Development Administration, 2025a. Registration standards for pesticides and technical grade active ingredients: Acute toxicity test in freshwater fish (13-1-1). Jeonju, Korea.

Rural Development Administration, 2025b. Registration standards for pesticides and technical grade active ingredients: Acute contact toxicity test in honeybees (13-1-4-1). Jeonju, Korea.

Rural Development Administration, 2025c. Registration standards for pesticides and technical grade active ingredients: Acute dermal toxicity test (12-1-2). Jeonju, Korea.

Rural Development Administration, 2025d. Registration standards for pesticides and technical grade active ingredients: Acute oral toxicity test-Acute toxic class method (12-1-20). Jeonju, Korea.

Vermelho AB, Moreira JV, Akamine IT, Cardoso VS, Mansoldo FRP, 2024. Agricultural pest management: The role of microorganisms in biopesticides and soil bioremediation. Plants 13:2762.

Wend K, Zorrilla L, Freimoser FM, et al., 2024. Microbial pesticides: Challenges and future perspectives for testing and safety assessment with respect to human health. Environ. Health 23:49.

난방제 식물병 방제용 미생물 제제 *Streptomyces nogalater* KRA0514-6 (KNB14980 EM 98%)의 인축 및 환경생물에 대한 독성 평가

윤선영[1,3] · 이영준[1] · 권보원[2] · 박민구[3] · 민석기[1]*

[1]한국화학융합시험연구원, [2](주)경농 R&D본부, [3]전북대학교 생물환경화학과

요 약: 본 연구는 난방제 식물병 방제용 미생물 제제 *Streptomyces nogalater* KRA0514-6 (KNB14980 EM 98%)의 독성 특성을 평가하기 위하여 수행되었다. Sprague–Dawley 랫드를 이용한 급성경구독성 및 급성경피독성, New Zealand White 토끼를 이용한 피부 및 안점막자극성, 그리고 담수어류와 꿀벌을 이용한 생태독성 시험을 평가하였다. 급성경구독성시험에서 사망, 임상증상 및 육안부검 소견은 관찰되지 않았고, LD_{50}은 2,000 mg/kg B.W. 초과였다. 급성경피독성 시험에서도 사망이나 전신 독성은 관찰되지 않았으며, LD_{50}은 4,000 mg/kg B.W. 초과였다. 다만 적용부위에서는 착색화, 발적, 가피형성 및 표피박리와 같은 가역적인 국소 피부반응이 관찰되었다. 피부자극성시험에서는 홍반이 관찰되었으나 부종 및 피부부식성은 없었고, 모든 반응은 회복되어 피부자극성 물질로 분류되지 않았다. 안점막자극성시험에서는 자극반응이 관찰되지 않았다. 담수어류 급성독성시험에서 치사 및 이상증상이 관찰되지 않았으며 96 h-LC_{50}은 100 mg/L 초과였고, 꿀벌 급성접촉독성시험에서도 치사 및 이상증상이 관찰되지 않았으며, 48 h-LD_{50}은 100 μg a.i./bee 초과였다. 이상의 결과는 KNB14980 EM 98%가 포유류에서 전반적으로 낮은 급성독성을 나타내지만 피부 노출 시 경미하고 가역적인 국소 피부반응이 나타날 수 있음을 시사한다. 또한 담수어류와 꿀벌에 대해서도 낮은 독성을 나타내는 것으로 확인되었다.

핵심어: *Streptomyces nogalater*, 미생물농약, 급성독성, 국소독성, 생태독성