



미생물제(*Sphingobium* sp. Cam5-1) 처리에 따른 토양 중 카두사포스의 분해효과

연제형¹, 정준희¹, 최한석¹, 고영준¹, 김다연¹, 안시현¹, 안재형¹, 한귀환², 원항연^{1*}

¹국립농업과학원 농업생물부 농업미생물과, ²(재)농축산용 미생물산업육성지원센터

Enhanced Degradation of Residual Cadusafos in Soils by the Microbial Agent of Cadusafos-degrading *Sphingobium* sp. Cam5-1

Jeohyeong Yeon¹, Joon-hui Chung¹, Han Suk Choi¹, Young-Joon Ko¹, Dayeon Kim¹, Sihyun An¹, Jae-Hyung Ahn¹, Gui Hwan Han² and Hang-Yeon Weon^{1*} (¹Agricultural Microbiology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Center for Industrialization of Agricultural and Livestock Microorganisms, Jeongeup 56212, Korea)

Received: 06 November 2023/ Revised: 28 November 2023/ Accepted: 07 December 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Jeohyeong Yeon

<https://orcid.org/0000-0002-3846-7795>

Joon-hui Chung

<https://orcid.org/0000-0001-9545-941X>

Han Suk Choi

<https://orcid.org/0009-0003-8222-3805>

Young-Joon Ko

<https://orcid.org/0000-0002-6228-311X>

Dayeon Kim

<https://orcid.org/0000-0002-9726-7128>

Sihyun An

<https://orcid.org/0000-0002-1743-1961>

Jae-Hyung Ahn

<https://orcid.org/0000-0002-7250-4959>

Gui Hwan Han

<https://orcid.org/0000-0001-9352-9445>

Hang-Yeon Weon

<https://orcid.org/0000-0002-9084-4316>

Abstract

Cadusafos, an organophosphorus insecticide, has been commonly used against various pests worldwide. Organophosphorus pesticides have shorter half-lives and lower toxicities than organochlorine pesticides. However, excessive use of Cadusafos can increase pest resistance and issues with acetylcholine biomagnification, potentially resulting in human toxicity. In this study, we investigated the effect of a Cadusafos-degrading micro-

bial agent (CDMA) prepared using *Sphingobium* sp. Cam5-1, which was previously reported to effectively degrade residual Cadusafos in soil. Experiments were conducted under both controlled laboratory and greenhouse field conditions. Under laboratory conditions, CDMA (10^6 cfu/g soil application rate) decomposed 97% of Cadusafos in the soil in the untreated control after 21 days. Additionally, when CDMA (10^6 cfu/g soil) was mixed with quicklime, 99% of Cadusafos was decomposed within 3 days. Under greenhouse field conditions, the combined effect of CDMA (10^6 cfu/g soil) and quicklime was not observed. However, CDMA (10^6 cfu/g soil) application alone was capable of decompos-

*Corresponding author: Hang-Yeon Weon
Phone: +82-63-238-3027; Fax: +82-63-238-3834;
E-mail: why@korea.kr

ing 91% of Cadusafos after 3 days. These results indicate that CDMA can effectively decompose high residual levels of Cadusafos in soils under field conditions using a low inoculum rate.

Key words: Biodegradation, Cadusafos, Microbial agent, Soil

서 론

현재 농업에서 화학 농약의 사용은 작물 생산량 증대 그리고 다양한 병원체로부터 발생하는 식물병 방제를 위한 가장 효과적인 방법이다[1]. 그러나 화학 농약은 의도적으로 생명체를 죽이기 위해 만들어진 독성이 있는 유해화학물질로써 과다 사용 시 토양 잔류로 인해 식물, 동물 그리고 사람에게 전이되어 부정적 영향을 주는 것으로 알려져 있다[2,3].

화학 농약 중 유기염소계 살충제(organochlorine insecticide)는 긴 잔류성 및 생물농축성으로 인체에 유해한 영향을 미쳐 1970년부터 대부분의 나라에서 사용이 금지되었으며, 상대적으로 잔류성 및 농축성이 낮은 카바메이트계(carbamate), 네오니코티노이드계(neonicotinoid), 유기인계 살충제(organo-phosphorous insecticide) 등의 사용이 증가하였다[4].

현재 사용되는 다양한 살충제 중 유기인계 살충제인 카두사포스(CAS No. 95465-99-9)는 토양에 서식하는 해충과 선충에 강한 독성을 나타내며 방제할 수 있는 해충의 적용 범위가 넓어 국내외 감자, 당근, 고추 등 다양한 농작물을 재배하는 농가에서 광범위하게 사용되고 있다[5,6]. 하지만 과도한 카두사포스 사용은 해충 저항성 증가와 아세틸콜린에스터 분해 효소(acetylcholinesterase) 억제로 인해 분해되지 않고 생체 내에 농축된 아세틸콜린(acetylcholin)은 신경 독성, 폐 질환 가능성 등의 인체 독성이 보고된 바 있다[7,8].

현재 사용 가능한 화학 농약 중 토양에 잔류하여 다양한 문제를 야기하는 화학 농약의 문제를 해결하기 위해 최근 물리, 화학, 생물학적 기술을 사용한 토양정화 방법이 연구되고 있다 [9,10]. 이 중 미생물의 대사활동에 의한 생물학적 토양정화 기술은 다른 기술보다 저렴하며 친환경적으로 토양 잔류 농약 분해가 가능하다고 알려져 있다[11,12].

이전 연구에서 우리는 *Sphingobium* sp. Cam5-1 균주가 특이적으로 인-황(P-S) 결합을 가진 유기인계 살충제 카두사포스에 대해 우수한 분해 활성이 있다는 것을 보고하였다[13]. 하지만 카두사포스의 분해 활성 평가는 실험실 조건에서만 구명되었을 뿐 현장적용을 위한 균주의 제형화 그리고 포장에서의 카두사포스 잔류 농약 분해 효과 및 지속성은 평가되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 카두사포스를 분해하는 미생물로 보고된 *Sphingobium* sp. Cam5-1 균주를 제형화한 미생물제를 항온 시험 그리고 시설재배지 토양에 처리 후 토양 중 잔류 카두사포스 분해 효과 및 현장 적용 가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

Sphingobium sp. Cam5-1 균주 대량배양 및 제형화

Sphingobium sp. Cam5-1 균주의 대량 배양을 위한 최적 배지는 yeast extract 3%, glucose 2%, K₂HPO₄ 0.03%, MgSO₄ 0.012%, CaCl₂ 0.012%, pH 6.3으로 조성되어 사용하였다. 최적 배지를 사용한 *Sphingobium* sp. Cam5-1 균주 대량 배양은 Yeon 등[14]이 사용한 방법과 동일하게 진행하였으며 대량 배양 후 배양 최종 산물은 회석평판법을 통해 균수(cfu/mL)를 확인하였다. 1.5 ton 배양기에서 1 ton으로 대량 배양된 *Sphingobium* sp. Cam5-1 균주의 제형화를 위해, 배양액을 6,800 rpm에서 1시간 동안 디스크 원심분리기(ton/h, GEA Co., Korea)를 이용하여 균체를 농축하였다. 농축된 균체의 보존을 위해 skim milk 20%, monosodium glutamate 7.5%, vitamin C 0.5%를 첨가하고 120시간 동안 동결건조한 후 분쇄기를 이용하여 균질화 및 분말 제형화 하였다.

항온 시험 1 (카두사포스 분해 효과)

항온 시험에 사용된 토양은 전라북도 완주군 이서면 국립 농업과학원 내 시설재배지에서 깊이 10-30 cm 토양을 채취하여 자연건조한 뒤, 2 mm 체를 사용하여 이물질을 제거한 후 사용하였다. 광구 배양병(WM-C100, 직경: 60 mm, 높이: 70 mm)에 자연건조한 토양 50 g을 담고 카두사포스(92.5%, 원제)를 acetonitrile을 사용 1% 농도로 회석 후 10 mg/kg soil이 되도록 토양 50 g에 처리하였다. 미생물제는 토양 g당 생균수 8.0×10^4 , 8.0×10^5 그리고 8.0×10^6 cfu의 3가지 농도가 되도록 물에 회석 후 각 처리구에 수분함량이 14%가 되도록 7 mL씩 토양에 관주 처리하였다. 미생물제를 처리하지 않고 중류수 7 mL을 토양에 관주한 처리를 대조구로 사용하였다.

미생물제 처리 후 28°C 배양기에서 3주 동안 시험을 진행하였으며 총 6회(0, 1, 3, 7, 14, 21일)에 걸쳐 실험용 약수저를 사용하여 토양을 균질화 후 토양 시료 5 g을 취하여 250 mL 삼각플라스크에 침량하고 acetone 100 mL을 가한 뒤 30분간 진탕 추출하였다. 추출물을 5 g의 celite 545가 깔린 Büchner funnel 상에서 갑압여과하고, 이때 acetone 30 mL로 용기 및 잔사를 씻어 앞의 여액과 합하였다. 이 여액을 분액깔대기에 옮겨 중류수 150 mL와 포화 NaCl 50 mL를 가하고 dichloromethane 50 mL로 2회 분배하였다. Dichloromethane층을 50 g의 anhydrous sodium sulfate에 통과시켜 탈수하였다. 이후 40°C 수욕상에서 갑압농축, 건고한 후 acetonitrile 20 mL에 재용해하여 primary secondary amine (PSA), MgSO₄를 첨가하여 2분간 흔들고 4,200 rpm에서 원심분리한 뒤 0.2 μm 공극의 필터로 여과하였다. 이 여액 3 μL를 LC/MS/MS에 주입하여 나타난 크로마토그램상의 피크 면적을 측정하여 표준검량선에 의해 잔류농도를 계산하였다.

항온 시험 2 (최적 첨가제)

항온 시험 2는 토양 첨가제 처리 전 항온 시험 1과 동일한

토양 및 시험방법을 사용하였다. 첨가제는 미생물제의 현장 토양에서의 카두사포스 분해 활성을 촉진하기 위해 탄소원으로는 가축분뇨비, 유박비료, 질소원으로는 요소, pH 조절제로는 생석회, 계면활성제로는 Tween 80을 비료 적정량 시험 또는 작물양분의 요구도에 따라 설정한 평준 시비량을 기준으로 토양에 처리하였다[15,16]. 미생물제는 항온 시험 1에서 선발한 토양 g 당 생균수 8.0×10^6 cfu/g soil을 최적 농도로 사용하였으며 각각의 첨가제를 처리한 토양 50 g에 수분함량 14%가 되도록 7 mL씩 토양 관주 처리하였다. 첨가제와 미생물제를 처리하지 않고 중류수 7 mL을 토양에 관주한 처리를 대조구로 사용하였다. 첨가제와 미생물제 처리 후 28°C 배양기에서 7일 동안 실험을 진행하였으며 토양 시료채취, 카두사포스 추출, LC/MS/MS 분석은 항온 시험 1과 동일하게 진행하였다.

시설재배지에서 미생물제의 카두사포스 분해 효과

시설재배지(Fig. 1) 시험은 전라북도 완주군에 위치한 국립농업과학원에서 2023년 6-7월 동안 진행하였다. 시험 기간 동안 평균 온도는 $28.8 \pm 5.3^{\circ}\text{C}$, 습도는 $79.5 \pm 19.4\%$ 였다. 완전임의배치법을 사용하여 시험구를 배치하였으며 각 시험구의 면적은 1.5 m^2 ($1.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$)로 24개의 상추(*Lactuca sativa* L. cv. Seon Hong Jeok Chuk Myeon)를 정식하였다. 미생물제 처리 전 시험구 토양에는 항온 시험과 동일한 10 mg/kg soil 농도가 되도록 카두사포스(92.5%, 원제)를 acetonitrile을 사용하여 1% 희석 후 처리구당 0.13 L/ m^2 로 살포하였다. 카두사포스 처리 후 처리 농약이 작토층(15 cm)까지 균일한 농도가 되도록 토양을 균질화하였다. 균질화 후 항온 시험 1, 2 결과를 기준으로 (1) 무처리 (2) 8.0×10^6 cfu/g soil 미생물제 단독처리 (3) 8.0×10^6 cfu/g soil 미생물제와 pH 조절제(생석회) 300 mg 혼합처리 (4) 8.0×10^5 cfu/g soil 미생

물제 단독처리 (5) 8.0×10^5 cfu/g soil 미생물제와 pH 조절제(생석회) 300 mg을 혼합처리 하였다. 토양 시료 채취는 농약 살포 후 0, 3, 7, 14, 21, 28일에 모종삽을 사용하여 각 시험구의 6개 지점의 0-15 cm 깊이에서 약 500 g씩 채취하였다. 카두사포스 살포 3주 후 재식한 상추는 재배 28일 후 미생물제 처리에 의한 생육 촉진 효과를 확인하기 위해 시험구별 상추 무게를 측정하였다. 시험 종료 후 토양 pH는 토양과 중류수를 1:5 비율로 하여 30분 교반 후 혼탁액을 pH meter (Thermo Fisher Scientific XL200, USA)로 측정하였다.

채취한 토양 시료의 카두사포스 분해 효과를 평가하기 위한 카두사포스 추출, LC/MS/MS 분석은 항온 시험 1, 2와 동일하게 진행하였다.

농약표준용액 및 기기분석

본 연구의 카두사포스(92.5%, 순도)는 농협케미컬(Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea)에서 제공받아 사용하였다. 분석을 위한 전처리과정에 사용된 acetonitrile (99.9%), dichloromethane (99.9%), methanol (99.9%)은 Burdick & Jackson (MI, USA), formic acid (98%), magnesium sulfate anhydrous는 Sigma Aldrich (Homburg, Germany), ammonium formate (99%)는 Fluka (New Jersey, USA), QuEChERS Extract Pouch, EN Method 제품은 Agilent technology (California, USA), 그리고 PSA-Kit-03는 Bekolut (Homburg, Germany)는 Varian Co. (Crawley, UK)로부터 구입하여 사용하였다.

카두사포스 농도 기기분석은 Shiseido nanospace SI2 LC/MS/MS (TSQ Quantum Discovery Max. USA)를 사용하였으며, 컬럼은 Unison UK-C18 (2.0 m \times 100 mm, 3 μm , Imtakt, Japan)을 사용하였고, 이동상의 유속은 0.3 mL/



Fig. 1. The greenhouse field treated with the Cadusafos-degrading microbial agent.

min이었다.

통계 분석

항온, 시설재배지 시험은 3반복으로 수행되었으며 실험 결과는 IBM SPSS 통계프로그램(Version 23.0 for Windows; SPSS, Chicago, USA)을 사용하여 평균±표준오차로 나타내었다. 평균치 분석은 일원배치 분산분석법에 따라 실시하였으며, 평균값 간 유의성 검정은 Tukey's HSD test ($p < 0.05$)를 사용하였다.

결과 및 고찰

항온 실험에서 미생물제의 카두사포스 분해 효과

미생물제 사용 시 유발되는 토양 잔류 카두사포스 분해 효과를 분석하기 위해 10 mg/kg 의 카두사포스가 포함된 토양에 미생물제 처리 후 28°C 에서 배양하였다. 무처리구에서 카두사포스 초기 잔류 농도(처리 당일)는 $9.00 \pm 0.19 \text{ mg/kg}$ 에서 21일 후 $8.28 \pm 0.31 \text{ mg/kg}$ 로 약 8.0% 감소하여 카두사포스의 자연 분해가 약간 일어난다는 것을 확인하였다(Fig. 2). 미생물제 처리구 토양의 카두사포스 초기 잔류 농도(처리 당일)는 $8.67 \pm 0.29 \text{ mg/kg}$ ($8.0 \times 10^6 \text{ cfu/g soil}$), $9.31 \pm 0.29 \text{ mg/kg}$ ($8.0 \times 10^5 \text{ cfu/g soil}$) 그리고 $9.27 \pm 0.15 \text{ mg/kg}$ ($8.0 \times 10^4 \text{ cfu/g soil}$)이었으며 미생물제 $8.0 \times 10^6 \text{ cfu/g soil}$ 희석 처리 농도에서는 처리 1일 후 무처리군 대비 카두사포스 분해를 33.3% 시작으로 21일차까지 무처리군에 비해 카두사포스 96.7%가 분해되는 효과를, $8.0 \times 10^5 \text{ cfu/g soil}$ 희석 처리 농도에서는 처리 1일 후 무처리군 대비 카두사포스 분해를 9.5% 시작으로 21일차까지 무처리군에 비해 카두사포스 67.4%가 분해되었다(Fig. 2). 이러한 결과는 본 시험과 동

일한 농도 10 mg/kg 의 카두사포스가 처리된 토양에 *Sphingomonas paucimobilis*를 $4.3 \times 10^8 \text{ cfu/g soil}$ 희석 농도로 처리하였을 때 24일 후 최대 80%까지 카두사포스 분해 효과를 보고한 Karpouzas 등(2005)의 연구결과보다 더 낮은 접종 농도에서 우수한 분해 효과가 있음을 의미한다[17]. 하지만 미생물제 $8.0 \times 10^4 \text{ cfu/g soil}$ 처리구에서는 3주 후 카두사포스 토양 잔류 농도는 8.01 mg/kg 로 무처리구 9.00 mg/kg 과 유의한 차이가 없었다. 이러한 결과는 미생물제 현장적용을 위한 처리농도는 $8.0 \times 10^5 \text{ cfu/g soil}$ 이상이 되어야 한다는 것을 의미한다.

첨가제의 미생물제 분해 효과 증진

다양한 첨가제를 토양에 혼합 시 카두사포스 분해 증진 효과를 분석하기 위해 카두사포스가 10 mg/kg 포함된 토양에 탄소원, 질소원, pH 조절제, 계면활성제를 혼합 후 1차 항온 시험에서 가장 우수한 토양 잔류 카두사포스 분해 효과를 나타낸 미생물제 접종 농도 $8.0 \times 10^6 \text{ cfu/g soil}$ 를 처리한 후 28°C 에서 배양하였다. 미생물제 접종 농도 $8.0 \times 10^6 \text{ cfu/g soil}$ 만을 처리한 구에서의 카두사포스 초기 잔류 농도(처리 당일)는 $7.79 \pm 0.43 \text{ mg/kg}$ 에서 1주 후 $0.25 \pm 0.13 \text{ mg/kg}$ 로 무처리구 대비 97.4% 감소하는 것을 나타내어 1차 토양에 첨가제를 혼합한 후 미생물제 접종 농도($8.0 \times 10^6 \text{ cfu/g soil}$)로 처리한 실험에서 카두사포스 초기 잔류 농도(처리 당일)와 처리 1주 후 농도는 Fig. 3과 같이 미생물제를 단독 처리한 것과 유의한 차이는 없었다. 그러나 pH 조절제(생석회)가 혼합된 토양에서는 무처리구 대비 카두사포스 초기 잔류 농도(처리 당일)는 $3.01 \pm 0.56 \text{ mg/kg}$ 로 무처리구 대비 68.6%, 1주 후 카두사포스 잔류 농도 $0.08 \pm 0.00 \text{ mg/kg}$ 로 무처리구 대비 99.1%

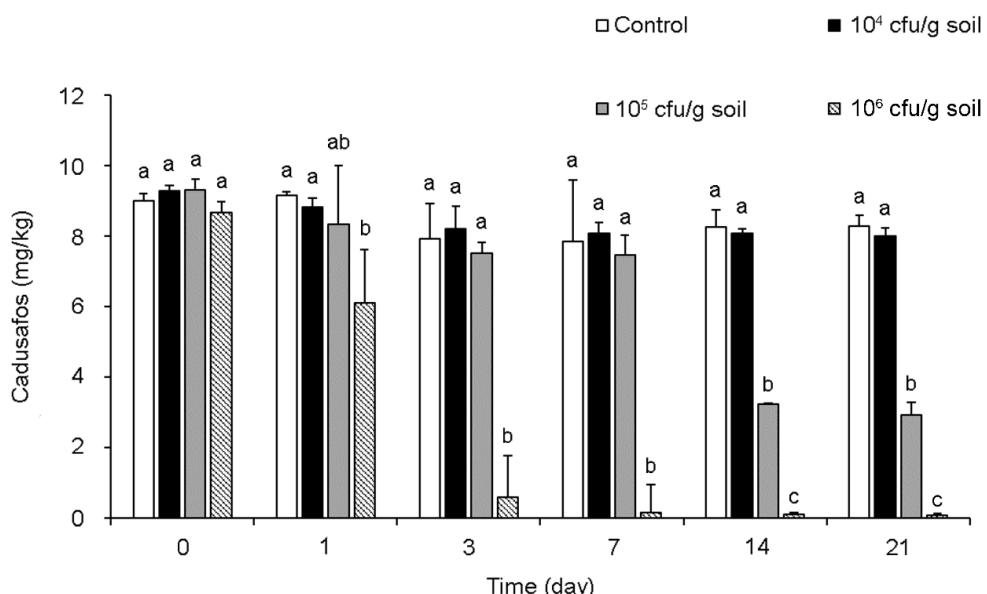


Fig. 2. Degradation of Cadusafos in soil according to the inoculum rate of the Cadusafos-degrading microbial agent in the laboratory condition. Values are presented as means±standard errors, $n=3$. Different lowercases indicate significant difference among the treatments based on Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

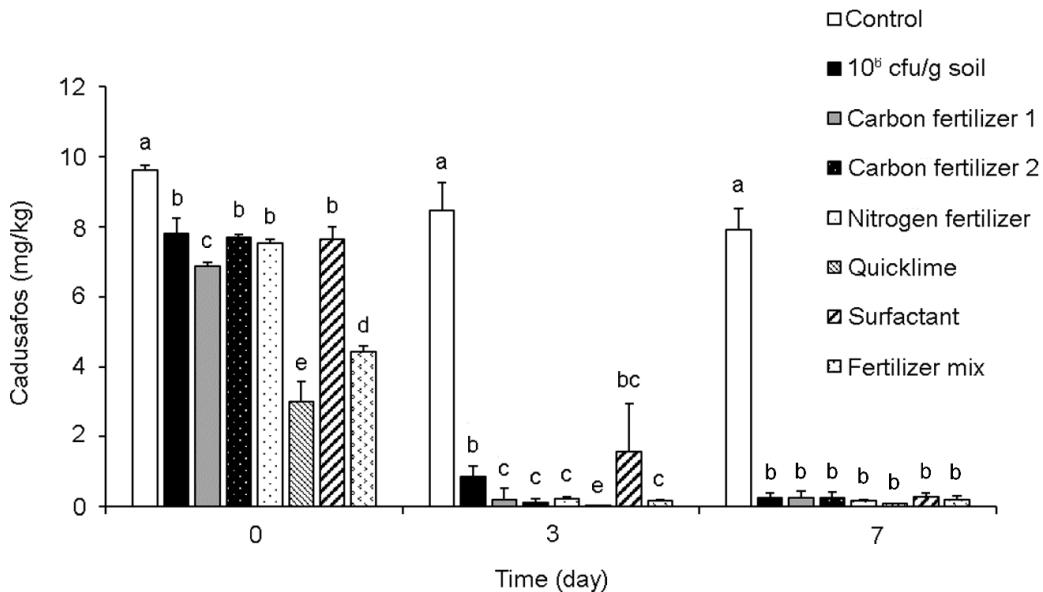


Fig. 3. Degradation of Cadusafos in soils according to the presence of the Cadusafos-degrading microbial agent and various supplemental agents in the laboratory condition (Carbon fertilizer 1; Animal waste compost, Carbon fertilizer 2; Press cake, Nitrogen fertilizer; Urea). Values are presented as means \pm standard errors, $n=3$. Different lowercases indicate significant difference among the treatments based on the Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

가 감소하여 미생물제 단독 처리보다 분해 효과를 우수하였다 (Fig. 3). 또한, pH 조절제(생석회)가 혼합된 토양에서는 토양 pH가 8.97 ± 0.15 로 미생물제 단독 처리 토양 $pH 5.20 \pm 0.05$ 보다 pH가 상승하였다. 염기성 pH에서는 유기인계 살충제의 화학적 가수분해가 일어날 수 있고 유기인계 살충제의 가수분해 효소 최적 pH가 8.5-9.5로 연구되었기 때문에 생석회 첨가가 카두사포스의 화학적·생물학적 분해 속도를 촉진시킨 것으로 추정된다[18]. 이는 미생물제에 pH 조절제(생석회)를 혼합하였을 때 미생물에 의한 단독 분해 효과뿐만 아니라 생석회 첨가에 의한 유기인계 살충제의 가수분해 및 분해효소 활성 등의 다양한 카두사포스 분해 효과 증진이 나타남을 의미한다.

시설재배지에서 미생물제의 카두사포스 분해 효과

국립농업과학원 시설재배지에서 수행된 미생물제를 처리한 토양의 카두사포스 초기 잔류량(처리 당일)은 모든 처리구에서 10.69 ± 1.12 mg/kg으로 나타났다 (Fig. 4). 무처리구에서는 처리 7일 후부터 카두사포스 토양 분해가 시작되었으며 28일 후 1.20 ± 1.10 mg/kg으로 감소하여 항온 시험에 비해 카두사포스 자연 분해가 더 크게 발생하는 것을 확인하였다. 반면, 처리 3일 후 모든 미생물제와 pH 조절제(생석회) 혼합 처리구에서 무처리구 대비 카두사포스 토양 분해 효과가 시작되었다 (Fig. 4). 미생물제 단독 처리 (8.0×10^5 cfu/g soil) 와 pH 조절제(생석회) 혼합 처리 3일 후 무처리구 대비 우수한 카두사포스 분해효과 (8.0×10^5 cfu/g soil: 65.7%, 8.0×10^5 cfu/g soil + 생석회: 54.3%, 8.0×10^6 cfu/g soil: 91.5%, 8.0×10^6 cfu/g soil + 생석회: 70.5%)가 나타났으며 시간이 지날수록 계속 증가하다 처리 28일 후 모든 처리구에서 토양 카두사포스 초기 잔류량 대비 98.1-99.3% 이상 분해되었다.

(Fig. 4). 시설재배지 시험에서도 항온 시험 결과와 동일하게 미생물제를 8.0×10^5 cfu/g soil 이상 처리하였을 때 우수한 카두사포스 분해 효과를 나타내었다. 하지만 미생물제와 pH 조절제(생석회) 혼합 시 항온 시험에서 나타난 카두사포스 우수 분해속도 증가는 나타나지 않았다. 시설재배지에 pH 조절제(생석회) 처리 후 토양 pH는 Table 1와 같이 평균 7.9로 항온 시험 2의 pH 조절제(생석회) 처리 토양의 pH 9.0에 비해 낮았다. 이러한 pH 차이로 인해 토양 잔류 카두사포스 분해 효과가 시설재배지에서 크게 않았던 것으로 추정된다.

살충제 카두사포스를 시설재배지 처리 후 28일 동안 미생물제는 카두사포스를 Fig. 4와 같이 99.1% 분해하였으며, 이는 카두사포스 분해 미생물인 *Sphingomonas paucimobilis*을 직접 이용한 포트 시험 시 24일 후 80% 분해하는 결과를 보고한 Karpouzas 등(2005)의 연구결과 보다 더 우수한 분해 효과를 나타내었다[17]. 현재까지 미생물을 활용하여 토양 잔류 카두사포스를 분해하기 위한 연구가 이루어지고 있다.

미생물제의 식물생육에 미치는 효과

미생물제 8.0×10^6 cfu/g soil 처리 시 상추의 무게는 30.59 ± 3.73 g으로 무처리구 20.08 ± 0.84 g 대비 52%의 생육 촉진효과가 있었다. 그 외 처리구에서는 생육의 감소 또는 증가는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 미생물제 8.0×10^6 cfu/g soil 농도와 토양 평균 pH 5 조건에서는 미생물 *Rhodococcus* sp. 3-2이 토양 잔류농약 분해와 식물생육 촉진을 유발한 결과와 동일하다고 추정된다[14]. 미생물제와 pH 조절제(생석회)를 혼합 처리한 시험구의 토양 pH는 7.8-7.9로 식물 미량 원소 흡수에 저하를 미칠 수 있다고 보고되었으나 미생물제 혼합 처리 시 생육 저하는 발생하지 않았다[19,20].

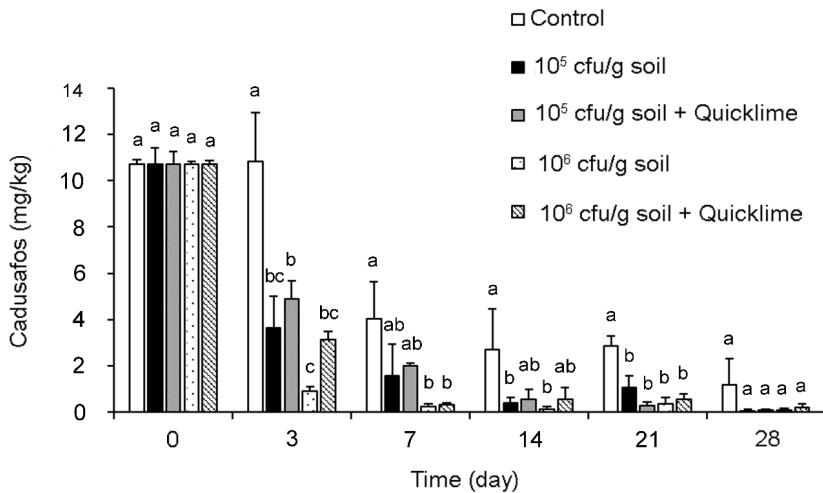


Fig. 4. Degradation of Cadusafos in soils according to the presence of the Cadusafos-degrading microbial agent and quicklime in the greenhouse field. Different lowercases indicate significant difference based on Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

Table 1. Effects of the treatment of Cadusafos-degrading microbial agent and quicklime on the soil pH and the growth of lettuce plants

| Treatment | Soil pH | Lettuce weight (g) |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|
| Control | 5.18 \pm 0.11 | 20.08 \pm 0.84b |
| 10^5 cfu/g soil | 5.22 \pm 0.08 | 19.64 \pm 3.35b |
| 10^5 cfu/g soil + Quicklime | 7.92 \pm 0.02 | 22.76 \pm 4.85b |
| 10^6 cfu/g soil | 5.15 \pm 0.23 | 30.59 \pm 3.73a |
| 10^6 cfu/g soil + Quicklime | 7.83 \pm 0.15 | 21.27 \pm 0.53b |

Values are means \pm standard deviations of three replicates (24 lettuce plants/replicate). Each treatment consisted of 72 lettuce plants. Different lowercase letters mean significant differences ($p < 0.05$) by Tukey's HSD test.

본 연구에서는 상추 재배 후 토양의 미량원소 소비 측정이 이루어지지 않았다. 또한, 미생물제 처리 후 식물생육 촉진 물질(IAA: Indole Acetic Acid, Siderophore, 인산 가용화능, ACC: 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid 등) 생성 분석도 이루어지지 않았다. 따라서 향후 카두사포스에 오염된 토양에 미생물제 처리 후 식물 생육 촉진하는 토양 미량원소 가용화 및 생육촉진 물질 분석에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

결 론

본 연구 결과는 유기인계 살충제인 카두사포스의 과도한 사용으로 토양 잔류 카두사포스를 미생물제를 이용 최적 농도 및 pH 조절제(생식회)를 혼합하여 포트 시험에서 카두사포스를 효과적으로 분해하고 시설재배지에서 잔류량을 감소시키는 결과를 확인하였다. 향후 카두사포스에 오염된 농경지 또는 시설재배지에서 친환경적이고 효과적으로 카두사포스 분해 효과

를 더 향상시킬 수 있는 추가적 연구(미생물제 처리 시기, 혼합 미생물 사용)가 필요할 것으로 사료된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

This work was supported by the National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea (Project no. PJ014897).

References

- Lee YR, Lee SM, Jang EY, Hong CO, Kim KK, Park HC, Lee SM, Kim YG, Son HJ (2015) Isolation and characterization of *Bacillus* strain as a potential biocontrol agent. Journal of Life Science, 25, 1408-1414. <https://doi.org/10.5352/JLS.2015.25.12.1408>.
- Kim JA, Song JS, Jeong MH, Park SY, Kim Y (2022) Biocontrol of maize diseases by microorganisms. Research in Plant Disease, 28, 179-194. <https://doi.org/10.5423/RPD.2022.28.4.195>.
- Tao H, Bao Z, Jin C, Miao W, Fu Z, Jin, Y (2020) Toxic effects and mechanisms of three commonly used fungicides on the human colon adenocarcinoma cell line Caco-2. Environmental Pollution, 263, 114660. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114660>.
- Song JS, Kwon KD, Choi HS, Yu HY (2014) Biological monitoring of the exposure level of organophosphorus and pyrethroid pesticides. The Korean Journal of

- Pesticide Science, 18, 41-47.
<http://dx.doi.org/10.7585/kjps.2014.18.1.41>.
5. Kim DG, Kim JB, Lee JK, Choi SK, Yoon JT (2002) Effects of treatment time of Cadusafos and fosthiazate for the control of *Meloidogyne arenaria* on oriental melon. Korean journal of Applied Entomology, 41, 293-298.
6. Hari CM, Vijay TG, Ghanendra SAK, Gautam C (2010) Nematicidal efficacy, enhanced degradation and cross adaptation of carbosulfan, Cadusafos and triazophos under tropical conditions. Nematology. 12, 211-224. <https://doi.org/10.1163/138855409X12465264245574>.
7. Oh BJ, Hwang SO, Lee KH, Hong ES, Lim JC, Kim H, Cho JH, Shin JS, Yoo KC (1998) Different clinical features of organophosphate insecticides intoxication according to the route of administration: Disparity between clinical severity and plasma cholinesterase level. Journal of the Korean Society of Emergency Medicine, 9, 131-141.
8. Lee JH (2023) Pulmonary thromboembolism following organophosphate intoxication: A case report. Journal of the Korean Society of Clinical Toxicology, 21, 64-67. <https://doi.org/10.22537/jksct.2023.00002>.
9. Falciglia PP, De Guidi G, Catalfo A, Vagliasindi FGA (2016) Remediation of soils contaminated with PAHs and nitro-PAHs using microwave irradiation. Chemical Engineering Journal, 296, 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.099>.
10. Jia JL, Wang BB, Wu Y, Niu Z, Ma XY, Yu Y (2016) Environmental risk controllability and management of VOCs during remediation of contaminated sites. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 25, 13-25. <https://doi.org/10.1080/15320383.2016.1085834>.
11. Reddy GV, Antwi FB (2016) Toxicity of natural insecticides on the larvae of wheat head armyworm, *Dargida diffusa* (Lepidoptera: Noctuidae). Environmental Toxicology and Pharmacology, 42, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2016.01.014>.
12. Morillo E, Villaverde J (2017) Advanced technologies for the remediation of pesticide-contaminated soils. Science of the Total Environment, 586, 576-597.
13. Ahn JH, Lee SA, Kim SJ, You J, Han BH, Weon HY, Lee SW (2018) Biodegradation of organophosphorus insecticides with P-S bonds by two *Sphingobium* sp. strains. International Biodeterioration & Biodegradation, 132, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.05.006>.
14. Yeon J, Kim HS, Ahn JH, Han GH, Oh YG, Cho IK, Park IC (2021) Degradation effect of carbendazim in soil by application with the microbial agent, *Rhodococcus* sp. 3-2. Korean Journal of Environmental Agriculture, 40, 322-329. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.4.36>.
15. National Academy of Agricultural Science (2017) Fertilizer recommendation for crop production. pp. 1-338, 3rd edition, RDA, Korea.
16. Ryu A, Choi H (2006) Application of nano-technology to contaminated soil/groundwater remediation. Journal of Korea Society of Environmental Engineers, 29, 257-261.
17. Karpouzas DG, Fotopoulou A, Menkissoglu-Spiroudi U, Singh BK (2005) Non-specific biodegradation of the organophosphorus pesticides, cadusafos and ethoprophos, by two bacterial isolates. FEMS Microbiology Ecology, 53, 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2005.01.012>.
18. Munnecke DM (1976) Enzymatic hydrolysis of organophosphate insecticides, a possible pesticide disposal method. Applied and Environmental Microbiology, 32, 7-13.
19. Lee PO, Lee JS, Choi JM (2010) Impact of application rates of pre-planting liming fertilizers on changes in soil chemical properties and growth of 'Melody Yellow' pansy in plug production. Korean Journal of Horticultural Science and Technology, 28, 735-742.
20. Ku HH, Lee SG, Chiang MH, Choi JL, Lee SE (2019) Effects of pH of soil medium on the growth and nutrient absorption of cultivated and native Chinese chives plants. Korean Journal of Environmental Biology, 37, 42-27. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.1.042>.