



김정한
서울대 농업생명과학대 교수

농업 현장에서는 물론이거니와 집에서 모기향이나 가정용 살충제로 귀찮은 벌레를 잡다보면, 살충제는 해충을 어떻게 죽일까? 또 살균제나 제초제는 병원균과 잡초를 어떻게 죽일까? 궁금하게 여긴 적이 한 두 번은 있을 것이다. 두 번째 원고(생활과 농약, 2005.9)에서 보았듯이 방제 대상 생물에 따라서 농약의 종류도 많고, 농약의 구성 원소나 구조도 다양한 것을 보면 농약 작용을 하는 원리가 다 똑 같지 않은 것은 확실한 것 같다. 이번 호부터는 농약을 살충제, 살균제, 제초제, 식물생장조절제로 나누어 농약과 생물체와의 상호작용을 이용한 농약의 작용 원리에 대하여 알아본다.

생물체는 외부환경에서 에너지나 물질을 받아들이고 다양한 생

살충제는 해충을 어떻게 죽이나? (I)

동물 · 식물 · 미생물 등 작용대상 다양, 기작 정밀 · 특이 · 흥미로워
대부분 생리생화학적으로 작용, 신경계 · 에너지대사 · 생장조절 · 기타로 분류

리생화학적 기능을 발휘하여 생체 자체의 항상성을 유지하면서 환경의 변화에 적응하고, 생명 유지와 종족 보존을 하고 있다. 이러한 생물의 생리생화학적 기능은 비할 때 없이 신비로운데, 다양한 구조의 화합물과 그들 간의 상호작용 및 반응으로 이루어진다. 농약은 이러한 생물체의 생리생화학적 과정에 직접적 또는 간접적으로 관여하여 그 정상적 작용을 무너뜨려 우리에게 해로운 생물을 퇴치하거나 죽일 만큼 정교한 화합물이다. 이러한 농약 작용의 원리를 작용기작이라고 하며, 농약 작용의 대상이 동물(해충), 식물(잡초), 미생물(병원균)과 같이 다양하기 때문에 그 작용기작 또한 정밀하고 특이하고 흥미롭다. 그러나 아직도 작용기작이 밝혀지지 않은 농약도 많고, 한 가지 농약도 여러 가지 작용기작을 보이기도 하기 때문에 중심이 되는 작용기작에 초점을 맞추어 간단하고 이해하기 쉽게 알아보는데, 살충제의 살충작용부터 살펴보자.

기계유 살충제로 예를 들면, 이 살충제는 살포되면 해충의 호흡



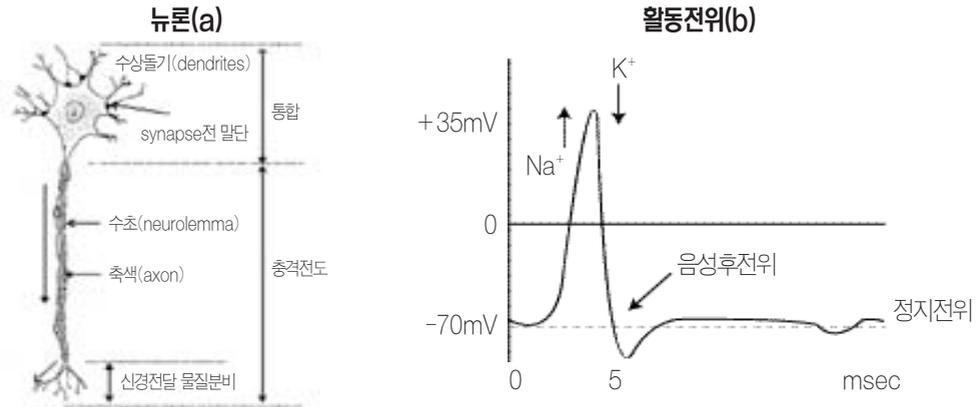


그림 1. 뉴론(a)과 활동전위(b) (참조: 최신 농약학)

기관(기문)을 봉쇄하여 일종의 질식사 시킨다. 이와 같이 단순한 물리적 살충작용을 제외하면 대부분 살충제는 생리생화학적으로 작용을 하는데, 크게 해충의 Δ 신경계에 관여하는 살충작용 Δ 에너지 대사에 관여하는 살충작용 Δ 생장조절에 관여하는 살충작용 Δ 기타 살충작용 등으로 분류할 수 있다.

신경계에 관여하는 살충작용

【신경계 구조와 신경 전달】

신경계에 작용해서 살충 작용을 하는 원리를 알기 위해서 일단 신경계의 구조와 신경 전달과정을 간단하고 이해하기 쉽게 알아보자.

신경계는 뉴론(neuron, 그림1-a)이라는 신경세포(수상돌기, 축삭, 축삭말단으로 이루어짐)가 연결되어서 이루어지는데, 완전히 결합되어 연결된 것이 아니라 시냅스(synapse)라는 미세한 간격($20\text{-}30 \times 10^3 \text{m}$)을 두고 연결되어 있다. 뉴론의 축삭에서 신경자극은 활동전위(action potential, 그림1-b)라는 전기적인 충격신호로 전달되며 이 신호는 Na^+ 이온이 뉴론 내로 유입되면서 전위가 양성(+)으로 올라갔다가 K^+ 이온을 유출시켜 음성(-)으로 내려와 생성된다. 이

러한 전기적인 충격신호는 축삭을 따라 전달되다가(곤충에서 1초당 50cm - 6m의 속도로 전달), 축삭말단에 가서는 신경전달물질을 분비하여 이 물질이 시냅스사이를 퍼져나가 다음 뉴론의 신경전달물질 수용체(receptor)에 결합하면 다시 활동전위가 생성되어 뉴론을 따라 신경자극이 전달된다. 이때 활동전위를 생성시키게 하는 신경전달물질을 흥분성 신경전달물질[예: 아세틸콜린(acetylcholine)]이라고 하고 반대로 생성을 억제하는 물질을 억제성 신경전달물질[예: GABA(γ -aminobutyric acid)]이라고 한다. 이 억제성 물질이 해당 수용체에 결합되면 Cl^- 이온이 뉴론 내로 유입되어 더욱 음성(-) 상태를 만들어 활동전위의 생성이 억제된다. 이러한 두 물질의 역할이 최적의 상태로 유지되면서 동물은 정상적인 운동과 생활을 할 수 있는 것이다. 하지만 어떤 이유로 인해 신경자극이 이루어지지 않으면 당연히 아무런 운동도 못하고 죽게 되는 것이고, 과도하게 신경자극이 일어나도 경련/마비가 일어나 죽게 되는 것이다.

【신경계에 작용하는 농약과 살충작용】

살충제 중에서 디디티(DDT)류의 유기염소계

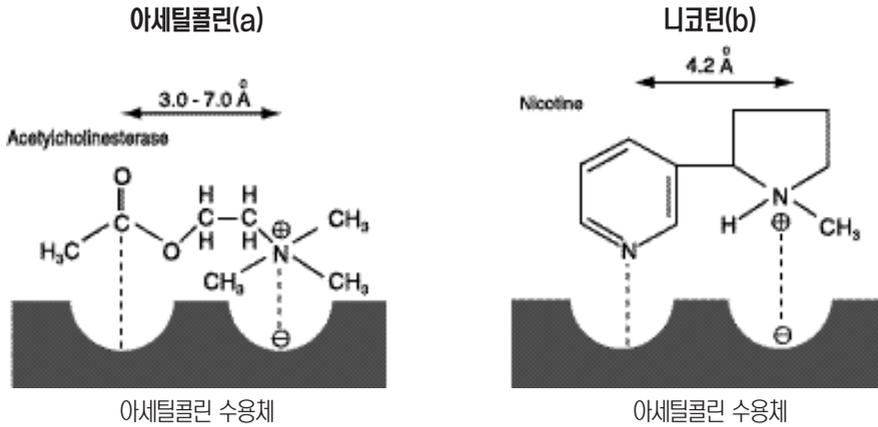


그림 2. 신경전달물질 아세틸콜린(a)과 니코틴(b)(참조: The Pesticide Book)

살충제 및 모기향의 유효성분인 알레스린 (allethrin) 등의 피레스로이드계 살충제는 활동 전위를 생성시키는 Na⁺이온이 유입되는 통로 (Na⁺-channel)에 이상을 일으켜서 비정상적인 활동 전위가 생성되고 과다한 신경자극이 전달되어 경련과 마비를 일으켜 해충을 죽게 한다. 바로 모기향에 의해 모기가 죽어 떨어지는 원리이다. 이와는 반대로 인독사카브(indoxacarb)는 Na⁺-channel을 막아서 Na⁺이온에 의한 활동전위 및 신경자극 생성이 억제되어 해충을 죽게 한다.

엔도설판(endosulfan)류 유기염소계 살충제 및 피프로닐(fipronil) 살충제는 억제성 신경전달물질인 GABA가 결합하는 GABA 수용체에 결합하여 GABA의 역할을 차단, Cl⁻(염소이온)이 뉴런 내로 유입되지 못하여 신경자극 전달을 적절히 억제하지 못하게 하고 따라서 과다한 신경자극이 전달되어 경련과 마비를 일으켜 해충을 죽게 한다. 이와는 반대로 아바멕틴(ivermectin)류 살충제는 GABA 수용체에 결합하여 GABA의 작용을 활성화 하여 Cl⁻이온이 뉴런 내로 다량 유입되어 신경자극전달을 과다

하게 억제하고 따라서 운동성을 상실하여 먹이도 못 먹고 해충을 죽게 한다.

그러면 담배의 유효성분이며 살충제인 니코틴(nicotine)은 어떠한가? 그림 2에서 보듯이 니코틴은 흥분성 신경전달물질인 아세틸콜린과 분자의 크기가 비슷하여 아세틸콜린 수용체에 결합하여 아세틸콜린과 같은 흥분성 역할을 하게 되고 따라서 과다한 신경자극이 전달되어 경련과 마비를 일으켜 해충을 죽게 한다. 이제 니코틴의 작용 비밀을 알았으니 이 원고를 읽은 애연가들은 담배를 즐겨도 제대로 알고 즐긴다고 할 수 있겠다. 물론 금연이 제일이지만 말이다.

니코틴 외에 네오니코틴류로 통하는 이미다클로프리드(imidacloprid)나, 스피노사드(spinosad) 같은 살충제도 유사한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 칼탐(cartap)류 살충제도 아세틸콜린 수용체에 결합하지만 니코틴과는 상이하게 아세틸콜린과 같은 역할을 하지 않게 하고, 아세틸콜린이 아세틸콜린 수용체에 결합하는 것을 막아서 신경자극 생성을 억제하여 해충을 죽게 하는 것으로 생각되고 있다.

옥토파민(Octopamine)은 곤충에서 신경호르

살충제는 해충을 어떻게 죽이나?(I)

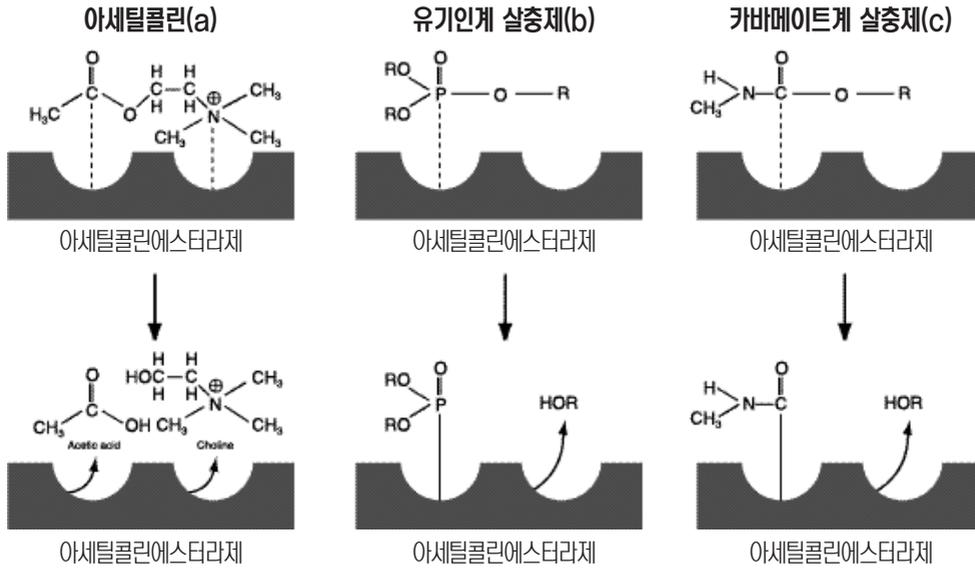


그림 3. 아세틸콜린에스터라제는 아세틸콜린을 초산과 콜린으로 분해함(a), 유기인계 살충제나 카바메이트계 살충제는 아세틸콜린에스터라제에 결합하여 {-O-R}부분이 가수분해되어 (H-O-R)로 이탈되고 나머지 부분은 결합한 채로 남아 있어서 아세틸콜린에스터라제에 아세틸콜린이 결합하지 못함(b)(c). (참조: The Pesticide Book)

몬 및 신경수신물질로서의 기능을 하고 있는데, 아미트라즈(Amitraz)같은 포마미딘계 살충/살비제(응애 방제)는 옥토파민 수용체에 결합하여 옥토파민 역할을 더욱 활성화 시키고 인산화와 탈인산화의 순환 균형을 파괴하여 해충을 죽인다. 정말 재미있고 흥미로운 작용기작이다.

잔류농약 검사시 채소류에서 검출되어 신문지상에 자주 등장하는 클로르피리포스(chlorpyrifos)와 같은 유기인계 살충제 및 카바릴(carbaryl)과 같은 카바메이트계 살충제는 또 다른 작용기작을 갖고 있다. 아세틸콜린에스터라제(acetylcholinesterase)라는 효소의 작용을 저해하여 해충을 죽게 한다. 이 효소는 아세틸콜린 수용체에 결합하여 신경전달을 하고난 아세틸콜린을 파괴(콜린과 초산으로 분해)한다(그림 3-a). 이렇게 해야 다음 아세틸콜린분자가 다시 아세틸콜린 수용체에 결합하여 신경전달을 정상적으로 진행할 수 있다. 놀라운 것은 1개의 효소

가 1분당 약 300,000개 분자의 아세틸콜린 분자를 분해한다고 추정하는데 다시 말하면, 바로 1분당 약 300,000개 분자의 아세틸콜린 분자가 그 수용체에 결합하여 신경전달을 한다는 의미이다. 그런데 유기인계 살충제와 카바메이트계 살충제는 이 효소와 아세틸콜린이 결합하는 결합 자리에 결합하고 따라서 효소는 아세틸콜린과 결합하지 못하여(그림 3-b와 3-c) 신경전달을 끝낸 아세틸콜린을 제거하지 못하고 아세틸콜린 수용체에 과다하게 축적되어 신경전달이 과해서 경련, 기능마비를 일으켜 해충을 죽게 한다.

다행이도 우리에게는 부주의와 사고에 의해 다량의 유기인계/카바메이트계 살충제에 중독되었을 때 치료할 수 있는 해독제가 있는데 아트로핀(atropine)이 그것이다. 해독제인 아트로핀은 아세틸콜린과 경쟁적으로 아세틸콜린 수용체에 결합하여 과량의 아세틸콜린에 의한 자극을 차단하여 해독작용을 한다. 