



김정한  
서울대 농업생명과학대 교수

### 에너지 대사에 관여하는 살충·살비제

생물이 살아가기 위해서는 에너지가 필요하다. 생물은 에너지 대사 또는 세포호흡이라는 과정을 통해 에너지를 만들고 공급하는데, 이러한 에너지 대사는 포유동물이나 곤충이 섭취한 음식 또는 먹이를 이용해서 생체유지에 필요한 생체에너지인 ATP를 만들고 또한 생체구성 물질을 만들기 위한 중간물질을 생산하는 역할을 한다. 특히 ATP는 에너지 대사의 가장 중요한 생산물로서 생체 생장에 필요한 여러 가지 물질의 생합성, 손상된 부분의 복구, 세포막을 통한 필요한 물질의 운반, 열의 발생, 근육 운동 등에 에너지를 공급하는 역할을 한다. 이렇듯 생명유지의 가장 필수적인 에너지 대사 과정을 간단하게 살펴보자.

# 살충제는 해충을 어떻게 죽이나? (Ⅱ)

생물 생리화학적 기능 신비, 다양 화합물 및 상호작용·반응으로 이루어져  
‘농약’ 생물체 생리화학적 과정 직·간접 관여, 정상작용 무너뜨려 퇴치

생체에 섭취된 탄수화물, 단백질, 지방 등은 각각 포도당, 아미노산, 지방산으로 분해 된 후 아미노산, 지방산은 직접 아세틸-CoA로 전환되고, 포도당은 해당작용(解糖作用)에 의해 피루부산(pyruvate)으로 되었다가 아세틸-CoA로 전환된다. 공통적 중간대사산물인 아세틸-CoA는 구연산회로에 들어가서 전자운반체인 NADH, FADH<sub>2</sub> 및 생체에 필요한 물질의 생합성을 위한 중간물질을 생산하게 된다. NADH는 해당작용에서도 생산되며, 피루부산이 아세틸-CoA로 전환될 때에도 생산되는데 이러한 NADH나 FADH<sub>2</sub>는 전자전달계에서 NAD<sup>+</sup>, FAD로 산화되어 전자(e<sup>-</sup>)가 생산되고, 이 전자들이 전자전달계를 거치면서 최종적으로 산소(O<sub>2</sub>)에 전달되어 물(H<sub>2</sub>O)로 전환된다. 전자전달계를 통한 전자전달은 미토콘드리아 내막(內膜)에서 이루어진다. 이 때 전자전달 복합체(I, III 및 IV)에서 생성된 양성자(H<sup>+</sup>)에 의해 미토콘드리아 내막(內膜)의 외부와 내부 사이에 양성자 농도경사(濃度傾斜)가 생성되고(외부의 농도가 높음) 이를 이용해 ATP합성효소가 ADP를 인산



화(磷酸化)시켜 ATP를 생산한다.

예를 들어 포도당 1분자가 완전히 산화되면 약 30개의 ATP가 만들어지고 지방산 1분자가 완전히 산화되면 106개의 ATP가 만들어 진다. 이렇게 생산된 ATP는 세포가 일을 할 때 에너지를 공급하게 된다. 이와 같이 NADH나 FADH<sub>2</sub>가 산화되면서 인산화 반응에 의해 ATP가 생산되는 과정을 산화적 인산화라 하고 산화 반응과 인산화반응은 양성자 농도경사에 의해서 연결(coupling)되어 있다.

#### **【에너지 대사 관련 효소를 저해하는 살충제】**

Chloropicrin, methyl bromide, metam sodium, dazomet 등은 토양 훈증제로서 선충을 비롯한 토양해충을 죽일 뿐 아니라 병균, 잡초도 제거하기 때문에 토양 소독제로 사용된다. 이 훈증제는 해당작용 및 구연산회로에 관련된 효소(hexokinase,  $\alpha$ -ketoglutarate dehydrogenase 등)에 결합하여 효소 역할을 불활성화시킨다. 이때 metam sodium, dazomet은 토양 속에서 수분에 의해 methylisothiocyanate (MITC)로 분해되고 이 MITC가 약효를 발휘한다.

#### **【전자전달 저해 작용을 하는 살비·살충제】**

천연 살충제 rotenone은 복합체 I을 저해하여 NADH와 CoQ사이의 전자전달 작용을 차단하고 ATP 생성을 저해하여 살충작용을 한다. 이외에도 fenazaquin, pyridaben, fenpyroximate, tebufenapyrad, pyrimidifen과 같은 다양한 구조의 살비제들이 역시 복합체 I을 저해해서 살충작용을 한다고 알려져 있다. 살비제 dicofol과 개미/마퀴벌레 방제용 hydramethylnon은 복합체 III을 저해해서 살충작용을 하고, 저장 곡물 훈증제인 aluminium phosphide(AIP)는 수분에 의해 가수분해 되어 PH<sub>3</sub>를 생산하며 이것은 복합체 IV를 불활성화 시켜 살충작용을 한다.

연탄가스 중에 포함된 일산화탄소(CO)도 복합체 IV를 저해해서 사람에게 소위 '연탄가스 중독'이라는 독성을 발휘한다.

#### **【산화적 인산화를 저해하는 살충·살비제】**

Dinocap, DNOC, binapacryl 등 dinitrophenol계 살비제 및 chlorfenapyr는 전자전달계와 산화적인산화 과정을 연결하는 양성자 농도경사를 파괴하기 때문에 uncoupler(脫共役劑)라고 부르며 따라서 ATP 생산을 저해하여 살비·살충작용을 한다. 살충·살비제인 diafenthion은 ATP 합성효소를 불활성화하여 ATP생성을 차단하여 살충작용을 한다. Cyhexatin 같은 유기주석계통 살비제, 살균제도 산화적인산화 과정을 직접 저해하여 ATP생성을 차단한다고 알려져 있다.

#### **생장조절에 관여하는 살충작용**

#### **【곤충의 탈피저해작용을 하는 살충·살비제】**

곤충은 포유동물과 상이하게 큐티클 성분으로 이루어진 독특한 외피를 갖고 있는데, 키틴은 큐티클의 구성성분으로서 왁스 및 경화단백질과 함께 곤충 몸체내로 유해물질의 침입이나 물 등의 유효물질 유실을 방지하는 역할을 한다. Diflubenzuron, flufenoxuron을 비롯한 ureas계통 살충제는 해충 또는 응애의 키틴 생성을 저해해서 탈피(脫皮)할 때 새로운 외피의 형성이 불가능해지고 외피가 연약해져서 탈피, 용화(踊化), 번데기화가 불가능해지며 외부 환경 특히 건조에 대한 저항력이 저하되어 해충이나 응애가 죽게 한다. 최근에 동부한농에서 세계 최초로 개발한 살충제 bistrifluron도 동일한 원리로 살충작용을 하는 것으로 알려져 있다.

#### **【곤충의 호르몬작용을 저해하는 살충제】**

곤충 애벌레의 탈피와 변태는 필수 성장과정

으로서 나비, 나방, 파리, 벌, 딱정벌레처럼 완전 변태(알 → 애벌레 → 번데기 → 성충)를 거치는 곤충이 있고 멸구·매미충류, 메뚜기, 진딧물, 응애처럼 불완전 변태(알 → 애벌레 → 성충)를 거치는 종류도 있다. 이러한 곤충의 탈피와 변태는 곤충의 호르몬인 탈피호르몬(ecdysone)과 유약(幼弱)호르몬(juvenile hormone)의 상대적 농도에 의해 결정되는데, 유약호르몬은 애벌레 상태에서 여러 탈피과정을 거치는 동안 유충상태를 유지 시킨다. Methoprene 등과 같은 유약호르몬 유사체 살충제를 살포하면 해충의 유충상태가 연장되어 정상적 성장과정을 거치지 못하고 해충이 죽음에 이른다. 이와 같은 키틴생합성 저해제와 곤충 유약호르몬 유사체는 IGR(insect growth regulator, 곤충성장조정제)계라고 하며 제 3세대 안전성 살충제로 인정되고 있다.

**기타**

**【해충의 세포를 파괴하는 살충제】**

여름철에 상한 음식을 먹으면 식중독 미생물 독소에 중독되어 고생하는 것과 유사하게, 곤충도 특정 미생물에 의해 중독되어 죽는다. 곤충에 병을 일으키는 이러한 세균은 *Bacillus*

**살충제는 해충을 어떻게 죽이나?(II)**

*thuringiensis*(Bt)로서 해충 방제에 사용되고 있고 흔히 비티(Bt) 살충제, 미생물살충제라고 하며 나방, 모기, 딱정벌레 등에 살충효과가 있다. 이러한 비티류 미생물은 포자형성기에 델타 엔도톡신( $\delta$ -endotoxin)이라는 단백질을 생성하는데, 곤충이 이 미생물을 먹으면 곤충 장기 내의 소화액과 단백질 분해효소에 의해  $\delta$ -endotoxin이 분해되어 살충성의 작은 펩티드가 생성되고 이것이 세포막을 파괴하여 경련/마비 및 섭식중단을 일으켜 해충을 죽게 한다. 이러한 미생물 살충제도 IGR계통의 살충제와 유사하게 사람과 곤충의 생리생화학적 차이를 이용하여 해충을 방제하는 안전성 살충제의 대표적인 예라 하겠다.

**【산화효소계에 작용하는 협력제】**

화합물 자체로는 살충작용이 없지만 살충제와 섞어서 함께 사용하면 살충제의 효과를 훨씬 상승시키는 화합물이 있는데 이를 협력제(synergist)라고 한다. Piperonyl butoxide, sesamex와 같은 물질이 여기에 속하는데, 파라치온과 같은 일부 유기인계 살충제나 DDT와 함께 사용하면 저항성인 해충에도 효과가 크게 상승함으로서 증명이 되고 있다. 또한 피레스로이드 살충제와도 자주 혼합하여 사용된다. 현재 일반적으로 인정된 협력제의 작용기작은 다른 살충제처럼 직접 효소나 생리작용을 저해하는 것이 아니라 살충제와 함께 사용되면 살충제보다 더 쉽게 산화효소계(mixed function oxidase)에 의해 산화되기 때문에 살충제의 산화대사/무독화 작용이 지연되어 살충제 단독으로 사용할 때 보다 그 약효가 상승된다고 알려져 있다. Y

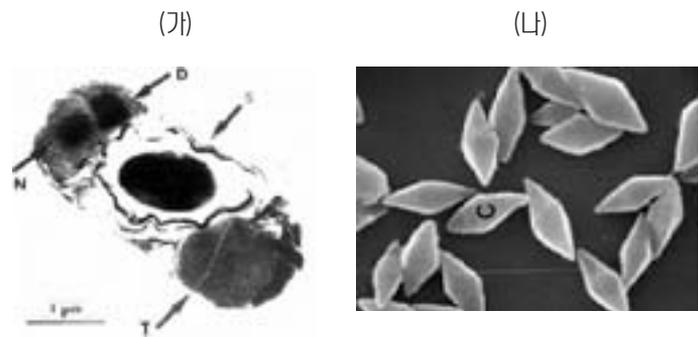


그림 4. (가) *Bacillus thuringiensis* 세균[(S; 포자) (N, D, T;  $\delta$ -endotoxin)], (나) *Bacillus thuringiensis*에서 분리된  $\delta$ -endotoxin 결정