



김정한  
서울대 농업생명과학대 교수

## 2. 병원균의 생체성분의 생합성에 관여하는 살균제

### 2.1 핵산 생합성을 저해하는 살균제

핵산은 탄수화물, 단백질, 지방과 함께 생물유기체를 구성하는 대표적 4대 물질 중의 하나로서 유전물질인 DNA(Deoxyribonucleic acid)와 유전정보를 처리하는 과정에 관여하는 RNA(Ribonucleic acid)를 구성하는 물질이다. 따라서 핵산은 DNA와 RNA를 통칭하며 유전 정보의 저장, 전달에 관여한다고 간단하게 이해하면 된다. DNA는 유명한 이중 나선 구조로 되어 있고 세포 분열 과정 중 복제되어 동일 유전 정보를 다음 세대에 전달한다. RNA는 DNA의 정보에 따라서 RNA 중합효소에 의해 합성되며 mRNA(전령 RNA; DNA에서 단백질 합성기관인 리보솜-ribosome-으로

# 살균제는 작물병균을 어떻게 죽이나? (Ⅱ)

‘핵산 · 단백질 · 세포벽 · 지질 및 세포막 · 멜라닌 · Sterol’ 생합성 저해  
Iprobenfos, Probenazole 등 작물 자체가 병균저항성 갖는 보약작용도



유전정보를 전달), rRNA(리보솜 RNA; 리보솜을 구성하는 RNA), tRNA(운반 RNA; 아미노산을 리보솜으로 운반) 등 중요한 3종이 있다.

Hymexazol, octhilineone이 DNA/RNA의 합성을 저해하는 살균제로 제안되었고, metalaxyl, furalaxyl, benalaxyl 등의 phenylamide계와 oxadixyl, ofurace 살균제는 rRNA를 합성하는 RNA중합효소-I을 저해한다. Ethirimol, dimethirimol, bupirimate 등 hydroxyaminopyrimidine계 살균제는 핵산을 구성하는 여러 성분의 기반이 되는 화합물인 퓨린(purine)의 대사 과정 중의 ADA(adenosine deaminase)효소를 저해하여 관련 핵산의 생성을 저해한다. Oxolinic acid는 DNA topoisomerase-II(DNA gyrase, 위상 이성화효소)를 저해하여 살균 역할을 하는데 이 효소는

DNA를 절단하여 다시 이어주는 활성을 갖고 있고, DNA의 환상 구조를 변형시켜 초(超)나선 구조를 만든다.

## 2.2 단백질 생합성을 저해하는 살균제

단백질의 생합성은 리보솜이라고 불리는 세포과립 상에서 이루어진다. 리보솜은 rRNA와 리보솜단백질(예: 30S, 50S 보조단위)로 이루어져 있다. 리보솜에서는 mRNA의 단백질 합성 암호를 근거로 tRNA가 아미노산과 결합하여 aminoacyl tRNA로 되어 아미노산들을 운반하고 peptidyl transferase라는 효소가 이것들을 차례차례 중합 연결시켜서 단백질을 합성한다. 합성의 시작은 아미노산 중 메티오닌(methionine)이 일반적이며, 합성을 끝내는 부분에서는 아미노산이 결합되지 않는 특정한 정지 암호를 가진 tRNA가 들어오면서 아미노산 중합반응에 의한 단백질 합성이 끝나게 된다. 단백질 생합성을 크게 △합성개시 △펩티드(아미노산 중합체) 신장 △합성종료의 3기로 구분한다.

단백질 생합성을 저해하는 살균제로 대표적인 것이 농업용 항생제이다. kasugamycin과 streptomycin은 단백질 생합성 초기 단계에 작용하는 것으로서 리보솜 단백질 30S 보조단위와 결합하여 개시복합체의 형성을 저해한다고 알려져 있다. Streptomycin의 경우 mRNA의 정보를 오판하도록 하는 효과도 있다. Oxytetracycline은 aminoacyl-tRNA가 리보솜에 결합하는 것을 차단하여 살균작용을 하고, blasticidin-S는 peptidyl transferase의 작용을 저해하여 단백질 사슬의 신장을 저해하는 것으로 알려져 있다. 항생제와는 다른 anilinopyrimidine계 살균제인 cyprodinil, mepanipyrim, pyrimrthanil 등은 메티오닌 생

합성을 저해하여 근본적으로 단백질 합성을 차단하는 것으로 제안되었다.

## 2.3 세포벽 생합성을 저해하는 살균제

식물 병원균의 대부분인 사상균의 세포벽은 키틴이 골격으로 되어 있으나 식물세포는 셀룰로오스로 되어 있다. 따라서 키틴 생합성 저해제는 작물에는 영향을 미치지 않고 병원미생물만을 선택적으로 공격할 수 있다. Polyoxin은 병원균 세포내에서 생합성 되는 키틴 생합성 전구체와 화학적 구조가 유사하고, 키틴 생합성 효소인 chitin synthetase에 대한 친화도가 원래의 전구체보다 보다 강하기 때문에 효소와 강한 결합을 형성하여 원래의 전구체가 결합하지 못하고 키틴이 생성되지 않아 세포벽 형성이 이루어지지 않는다.

대부분의 농업용 항생제가 단백질 합성 저해제인데 반하여 validamycin은 inositol과 구조가 유사하여 trehalase 및 inositol 생합성을 저해하여 다당류 생성과 세포벽 생합성에 영향을 미친다고 알려져 있다.

## 2.4 지질 및 세포막 생합성을 저해하는 살균제

Iprobenfos, edifenphos 등의 유기인계와 isoprothiolane 등은 균체 내 세포막에 다량으로 존재하는 인지질중의 하나인 phosphatidyl choline의 생합성관련 효소인 phospholipid N-methyl transferase를 저해함으로써 병원균의 포자발아 및 균사성장을 저해한다. 같은 유기인계이지만 tolclofos-methyl은 지질 과산화를 일으켜 살균작용을 하는 것으로 제안되었으며 동일한 작용을 하는 것들로서 chloroneb, dicloran, PCNB, etridiazole 등을 포함시키고 있다. Iprodione, procymidone, viclozoline 등의

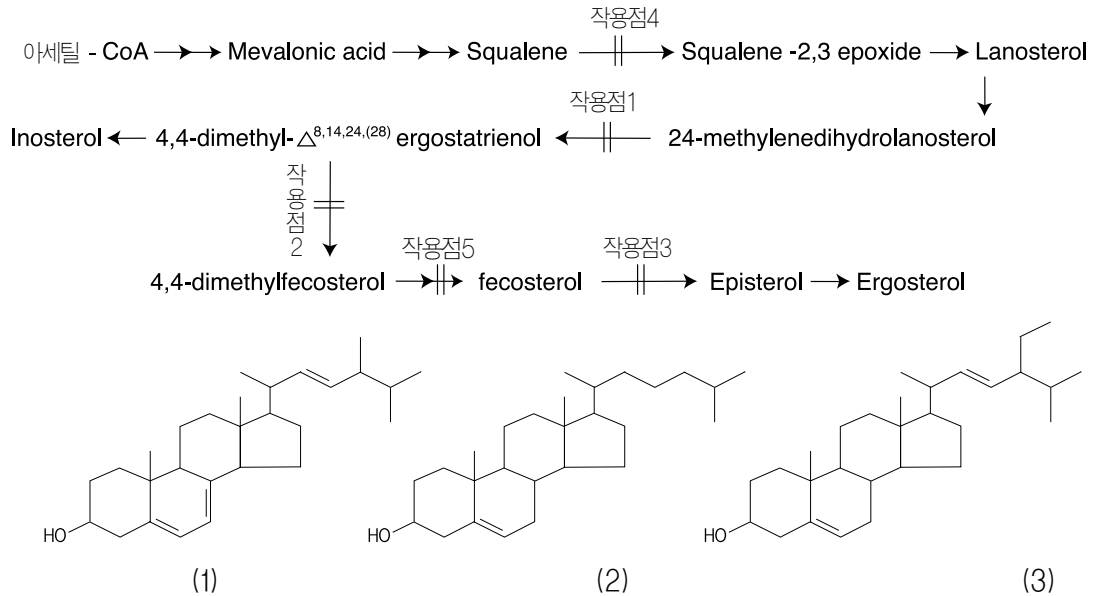


그림 1. Ergosterol 생합성 과정(작용점) 및 (1) Ergosterol(미생물 sterol)  
(2) Cholesterol(동물 sterol) 및 (3) Stigmasterol(식물 sterol) 구조

dicarboxamide계도 지질과산화와 관련된 NADH cytochrome C reductase가 작용점으로 제안 되었다.

### 2.5 멜라닌(Melanin) 생합성을 저해하는 살균제

일반적으로 갈색 색소로 알려진 멜라닌은 병원균에서는 균 포자가 발아해서 침입균사를 형성하고 식물세포 속으로의 침입단계에 중요한 역할을 한다. 따라서 멜라닌 생합성을 저해하면 병원력을 강하게 저하시킨다. Fthalide, tricyclazole, pyroquilon등 살균제는 멜라닌 생합성 과정에서 환원반응효소를 저해하고 carpropamid, fenoxanil, diclocymet은 탈수반응효소를 저해한다.

### 2.6 Sterol 생합성을 저해하는 살균제

Ergosterol은 대부분의 사상균 세포막 구성성

분의 한가지로서 생합성이 저해되면 세포막의 견고성이 상실되고 세포막 투과성의 변화가 초래되어 살균작용을 나타내게 된다. Ergosterol 생합성 저해제들은 SBI(sterol biosynthesis inhibitor)라고 하며 DMI(C14 demethylation inhibitor)계와 morpholine계를 비롯한 여러 종류가 있다. DMI계는 ergosterol 생합성 과정 중 중간체의 메틸기를 이탈시키는 반응을 하는 효소(작용점 1, 그림 1)를 저해하고 SBI의 대부분을 차지한다. Pyridine계(pyrifnox), piperazine계(triforine), pyrimidine계(fenarimol, nuarimol), imidazole계(imazalil, prochloraz, oxpoconazole, triflumizole 등), triazole계(triadimefon, triadimenol, propiconazole, hexaconazole 등)가 여기에 속한다. 반면에 morpholine계(tridemorph, fenpropimorph), piperidine계(fenpropidin, piperalin) 및

## 살균제는 작물병균을 어떻게 죽이나?(Ⅱ)

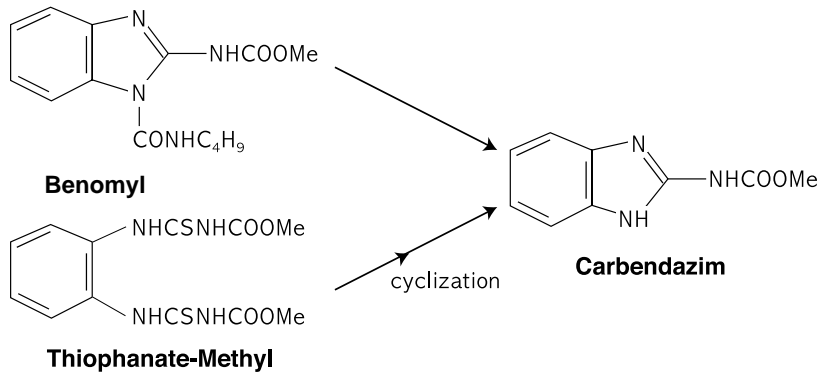


그림 2. Benomyl 및 thiophanate-methyl 의 carbendazim으로의 전환


spiroxamine은 DMI와는 다르게 중간체의 환원 반응효소(작용점 2, 그림 1) 및 이성질화효소(작용점 3, 그림 1)를 저해한다. 이외에도 pyributicarb(이 약제는 현재 제초제로 쓰이고 있다)는 squalane의 산화반응효소(작용점 4, 그림 1)를 차단하고, fenhexamid는 4,4-dimethylfecosterol이 fecosterol로 전환되는 다단계 반응 중 케톤 환원효소(작용점 5, 그림 1)를 저해한다.

### 3. 병원균의 세포분열에 관여하는 살균제

세포분열(mitosis) 시 염색체 이동에 필요한 방추사(spindle)는 여러 개의 미소관(microtubule)으로 이루어져 있다. 이 미소관은 보조 단위인  $\alpha$ -tubulin과  $\beta$ -tubulin이 결합하여  $\alpha$ ,  $\beta$ -dimer로 되고 이것들이 모여서 생합성된다. Benomyl, thiabendazole, carbendazim 등의 benzimidazole계 및 thiophanate-methyl 살균제, 그리고 diethofencarb, zoxamide 살균제는  $\beta$ -tubulin에 결합하여  $\alpha$ ,  $\beta$ -dimer로 되는 것을 저해하여 세포내의 미소관 형성을 막는다. 이러한 저해 효과로 세포분열시 방추사(spindle) 형성이 저지되고 딸 염색체의 분열이 저해되는 것이

다. 이들 약제는 엽면이나 환경 중에서 carbendazim으로 변환되어 살균효력을 발휘한다(그림 2).

### 4. 작물 병균에 대한 작물의 저항성을 증가시키는 살균제/약제

살균제 중에는 작물 자체가 병균에 대하여 저항성을 갖게 하는 '보약' 작용을 하는 것들도 있다. 주로 항균성 물질의 분비나 축적을 촉진하는 작용을 하는데 iprobenfos, probenazole등이 알려져 있다. 살균제는 아니지만 벼에 규산염(珪酸鹽, silicates)을 사용하면 도열병, 호마엽고병에 대한 저항성이 증대되는 것으로 알려져 있다. Acibezolar-S-methyl은 이 방면의 전문 약제로서 작물의 salicylic acid 분비를 촉진하여 병균 저항성을 갖게 한다. 

#### 바로 잡습니다

「생활과 농약(8월호)」 자문위원칼럼⑩ 24쪽 내용 중 iprodione, procymidone, viclozoline 그리고 및 "thiazole계 살균제인 ethazol과 tricyclazole은 토양 속에서 isothiocyanate나 dithiocarbamate를 생성하고 동일한 살균작용을 한다"는 삭제합니다.