



殺虫劑의 작용기구와  
사용시 주의점 ④

# 藥劑처리가전 이미 저항성 획득가능

## —해충의 殺虫劑抵抗性

서울대학교 농과대학 교수

최 승 운

### 혼용되고 있는「저항성」개념

살충제가 해충방제에 적극적으로 이용되면서 昆虫系에 각종 異變現象을 자아내고 있음은 주지의 사실이다. 살충제에 대한 해충의 저항성 발달도 그들 중의 한가지 異變現象으로 보아 마땅하다.

이와 같은 해충의 살충제 저항성 문제는 1914년 미국 「캘리포니아」주에서 Melander씨에 의하여 果樹의 작지벌레의 1종이 그 과수원에서 연용해 온 石灰硫黃合劑에 대한 저항성이 발생되었다는 사실이 보고되면

서 관심을 끌게 되었으나 실제 해충방제에서 큰 문제로 부각된 것은 유기합성 살충제가 해충방제에 적극적으로 이용된 이후의 일이다.

1950년대 후기부터 1960년대 초에 걸쳐 WHO(世界保健機構)와 FAO(世界食糧農業機構)는 살충제 저항성 문제에 관한 전문위원회를 구성하고, 금후 이들 저항성 문제의 해결을 위해 여러가지 국제적인 노력을 경주하고 있으며 그뿐만 아니라 세계 여러나라들마다 저항성 해충방제 대책을 세우기에 부심하고 있다. FAO와 WHO의 살충제 저항성의 정

의를 보면 「살충제에 대한 해충의 抵抗性이란, 정상적인 害虫種의 個體群에 있어서 대다수의 해충을 죽일 수 있는 藥量水準에서 보다 많이 살아 남을 수 있는 능력이 그들의 어느 系統에 발달한 것」이라 되어 있다.

그런데 이와 같은 「抵抗性」이라는 말을 잘못 혼동해서 사용되는 일이 종종 있는 것 같다. 즉, 살충제를 뿌려 해충이 죽지 않으면 「抵抗性」이라는 용어를 합부로 사용하고 있는데 그것은 큰 잘못을 저지르기 쉽다. 왜냐하면 살충제를 뿌려 해충이 죽지 않는 이유에는 다음과 같은 세가지 경우가 있기 때문이다.

① 무반응(無反應, Refractoriness) 어느 곤충이 어느 살충제에 대하여 선천적으로 아무런 반응을 나타내지 않는 경우이다.

② 내성(耐性, Tolerance) : 환경조건이나 해충의 態(Stage)에 따라 일시적으로 듣지 않는 경우인데 이것은 유전적인 것은 아니다.

③ 저항성(抵抗性, Resistance) : 대상 살충제를 처음에 사용하였을때는 대상 해충을 잘 죽일 수 있었던 것이 그 살충제를 연용해서 해충의 세대가 되풀이 됨에 따라 점차 살아 남을 수 있는 능력이 그 害虫群에 발달하고 이들 현상이 次代에 유전되는 현상을 말한다.

무반응도 유전적이기는 하지만 저항성의 경우와는 뚜렷이 구분되어야 하며 이들을 혼동해서 사용해서는 안된다.

## 저항성 발생현황과 그 영향

해충의 살충제 저항성 발달속도는 有機合成殺虫劑가 해충방제에 적극적으로 이용되면서 대두된 크나큰 문제이다.

표1에서 보는 바와 같이 유기합성 살충제의 사용전 즉, 1940년 이전에 보고된 저항성 해충의 종류수는 7종에 불과하던 것이 1948년에 이미 배르 증가하였으며 그 후 계속 증가하여 1979년에는 392종이라는 엄청난 수로 증가하였음을 엿볼 수 있다. 이를 좀더 구체적으로 보면 표2에 표시한 바와 같다.

표 1. 연도별 저항성 해충의 증가추세

연	도	저항성 해충 수	누 종 류 수
1908		1	1
1928		4	5
1938		3	7
1948		7	14
1954		11	25
1957		51	76
1960		61	137
1963		20	157
1965		28	185
1967		39	224
1975		81	364
1979		28	392

■ 살충제 작용기구와 사용시 주의점 ■

표 2. 藥劑抵抗性 害蟲의 種類(FAO, 1979)

殺虫類의 目名	살충제 類型						위생농업 해충곤충	계
	·DDT	환상 Diene	상유 인	기 제	카바메 이트제	기 타		
응애목(Acarina)	23	15	40	7	19	15	38	53
이목(Anoplura)	5	3	2	1	—	5	—	5
딱정벌레목(Coleoptera)	28	54	24	9	16	—	63	63
집게벌레목(Dermaptera)	1	—	—	—	—	—	1	1
파리목(Diptera)	93	102	41	7	4	111	24	135
하루살이목(Epheroptera)	2	—	—	—	—	—	2	2
노린재목(Hemiptera)	5	12	3	—	—	5	10	15
매미목(Homoptera)	10	11	31	5	4	—	43	43
벌목(Hymenoptera)	1	1	—	—	—	—	2	2
나비목(Lepidoptera)	34	35	27	15	4	—	58	58
털이목(Mallophaga)	—	2	—	—	—	2	—	2
메뚜기목(Orthoptera)	3	1	1	1	—	3	—	3
벼룩목(Siphonoptera)	5	5	1	—	—	5	—	5
총채벌레목(Thysanoptera)	3	2	—	—	2	—	5	5
	213	243	170	45	49	146	246	392

즉, 유기합성 살충제 중 가장 일찍부터 사용한 有機塩素系殺虫劑에서 가장 많은 종류의 해충이 저항성 해충으로 보고되었고 다음이 有機燐劑 Carbamate劑의 순이다. Carbamate系殺虫劑에서 가장 적은 수를 보인 이유는 이 계통의 살충제들이 가장 늦게 개발되었고 나아가 이들 살충제는 選擇毒性和 通用範圍가 좁은데 있다고 본다.

탈락된 유기염소계에서 多發

표2에서 보듯이 현재까지 보고된

저항성 해충의 종류수는 農林害蟲에서 246종, 衛生害蟲에서 146종, 도합 392종에 달하며 이밖에 보고되지 않은 것이 많을 것으로 보아 실제 저항성 해충 수는 이보다 훨씬 많을뿐만 아니라 앞으로 계속 해충방제에 살충제가 뿌려질 것을 생각하면 계속 늘어나 방제를 요할 정도의 주요 해충은 기존 살충제들에 대하여 모두 저항성을 나타낼 가능성도 없지 않다고 본다.

저항성해충 방제문제에 우리들이 받고 있는 경제적 손실은 엄청나게 커서 수치로 표현하기는 어려울것 같

다. 한가지 예를 들면 1972년 미국에서 해충방제에 소요된 살충제의 비용은 백만불이라 하는데 적어도 그 비용의 반정도는 저항성 해충방제를 위해 藥劑撒布量과 藥劑撒布回數의 증가에 있었던 것으로 분석, 평가되고 있다. 여기에다가 한가지 살충제 개발에 소요되는 비용이 매년 증가하여,

1個品目 開發에 약 2,500만불 소요되는데 새로 개발된 품목이 交叉抵抗性 때문에 사용해 보지도 못한채 살아져 가는 손실까지 포함시켜 생각한다면 저항성 문제는 결코 소홀이 다룰 문제가 아니라 고 본다.

## 저항성 발달과정과 유전인자

왜 이와 같은 저항성이 발달하는가? 여기에 관한 학설은 前適應說(Pre-adaptation hypothesis)과 後適應說(Post-adaptation hypothesis) 두 가지 학설로 집약되고 있는데 前適應說이라고 하는 것은 곤충의 집단 중에는 살충제 사용과는 관계없이 이미 저항성 개체가 섞여 있어 살충제를 사용한 결과 저항성 개체만이 살아 남아 저항성을 나타낸다는 설이고, 後適應說은 곤충의 집단은 동일한 반응을 나타내는 個體들인데 살충제를 사용함으로써 저항성이 증대한다는 설이다. 즉, 전자는 살충제가 淘汰劑(Selective agent)로서 작

용한 것을 의미하고 후자는 突然變異劑(Muta genic agent)로서 작용한 것을 의미하는 데 해충의 저항성 문제는 前適應說을 믿는 사람이 많고 또한 그 실에도 많다.

前適應說은 뿌러지는 살충제가 淘汰壓(Selective pressure)으로서 작용하는 것인데 도태압이 강할 수록 저항성 발달속도가 빨라지는 것을 크게 강조하고 이 前適應說을 지지하는 사람이 많은 이유는 다음과 같다.

① 실내의 곤충을 몇세대 계속 살충제로 도태해도 저항성이 증대하지 않는데 비하여 같은 종의 곤충이라도 포장에서는 저항성이 크게 증대하고 있다. 이것은 실내충에는 저항성 유전인자를 지닌 개체가 없으나 野外圃場에서의 곤충 중에서는 저항성 유전인자를 지닌 개체가 섞여 있기 때문인 것으로 해석되고 있다.

② 집파리의 경우 親系統에서 얻은 개체들을 한쪽은 DDT로 도태시키고 다른 쪽은 羽化가 늦은 個體를 선발한 결과 兩系統 똑같이 같은 정도의 저항성이 발달한다.

③ 살충제를 전혀 사용하지 않은 곳에서도 저항성 개체가 낮은 비율로 자연계에 존재하고 있다.

④ 亞致死藥量(Sublethal dose)에서 몇세대에 걸쳐 처리해도 저항성 발달이 인정되지 않고 있다.

⑤ 집파리를 DDT로 계속 누대처

리해서 突然變異를 유발하려 하였으나 무처리와 하등의 차이를 인정할 수 없다. 그렇다고 해서 後適應說이 완전히 부정된 학설은 아니며 또한 그를 완전히 부정하기에는 실험적 立證이 결여되어있다. 그리고 病原菌을 재료로 하였을 때는 오히려 後適應說을 믿는 사람이 많다.

저항성 形質은 유전자의 지배를 받는 것인데 곤충의 집단중 저항유전자는 對立遺傳子(allele)로 존재하며 이 對立遺傳子는 突然變異에 의해서 발생한다고 볼 때 後適應說도 성립될 가능성도 있다.

일반적으로 저항성 발달속도는 淘汰歷이 높으면 높을 수록 빠르다고 하는데 그 밖에도 저항성 유전자의 수, 유전자의 優性度, 環境抵抗, 自然淘汰 등 복잡한 관계가 있으므로 저항성 발달속도는 그 집단이 갖는 遺傳變異(Heritable variance)의 폭과 淘汰의 強度(Selective intensity)에 의해서 결정되는 것으로 보아야 옳을 것 같다.

그러므로 저항성을 다루는데는 반드시 유전학적 연구가 따라야 하며 유전학적 정보를 정확히 입수함으로써 저항성에 관한 문제를 보다 정확히 파악할 수 있을 뿐만 아니라 저항성 해충방제를 위한 새로운 살충제 개발에도 크게 기여할 것으로 전망된다.

## 유전된다는데 異意는 없어

살충제 저항성은 유전적이라는 데는 이의가 없다. 유전적이라고 하면 여기에는 이들을 지배하는 遺傳子가 있을 것은 뻔한 이치이다. 저항성이 발달한 경우 그것이 單一遺傳子를 지배하는 遺傳(Monogenic inheritance)인지, 아니면 複數遺傳子를 지배하는 遺傳(Polygenic inheritance)인지에 대한 문제가 있다. 저항성의 유전은 單一遺傳子에 의한다는 보고가 많고 複數遺傳子에 의한다는 보고는 적으나 이들은 해충의 종류 또는 살충제의 종류에 따라 다르게 나타날 가능성이 많기 때문에 單一遺傳子說만을 고집하기는 어렵다.

아직 살충제 저항성과 관련된 유전학적 연구는 초기 단계이기는 하지만 앞으로 이분야의 연구가 활발히 이루어지고 보다 많은 정보가 쌓인다면 저항성 해충방제에 지대한 공헌이 될 것으로 본다.

## 저항성의 생리·생화학적작

살충제 저항성 기작은 比較生理學 生化學的 側面에서 중점적으로 연구되어왔다. 모든 종류의 살충제에 대해서 저항성이 해충방제에서 문제시 되고 있는 현시점을 감안할 때 개개 살충제의 抵抗性機構를 밝히는 일은

물론 이것을 통일성 있게 정리, 종합하는 일은 급후 저항성 대책을 수립하는 데 있어서 극히 중요한 과제라 본다. 그럼에도 불구하고 이들 연구는 극히 일부분만이 다루어져 왔고 또한 아직 불분명한 점이 많으며 게다가 연구자에 따라 상반된 결과도 있어 약제저항성의 기작을 명확히 기술하기는 어렵다. 그래서 여기서는 다만 지금까지 연구된 분야를 나누어 개략적인 요점만을 제시코자 한다.

**(1) 피부투과성 · 축적 · 배설차이**

살충제의 皮膚透過性은 곤충의 방어기구로서 중요한 갈림길이 되는 것만은 사실이다. 그런데 많은 종류의 곤충류와 각종 살충제에서 감수성 계통의 곤충보다 저항성 계통의 곤충에서 살충제의 피부투과성이 크게 낮다는 사실이 보고되고 있다. 한편 감수성 계통의 곤충피부에 비하여 저항성 계통의 곤충피부에서 단백질과 脂質의 함량이 높았다는 보고가 있는데 이것은 저항성 계통에서 피부의 硬化가 보다 빨리 진행됨을 말한다.

저항성 기작을 설명하는데 있어서 살충제의 피부투과성 저하는 다른 저항성 기작, 특히 解毒分解와 관련시켜 볼때 중요한 의의를 지녔다고 본

다. 즉, 단위시간당 살충제의 透過量이 적어 곤충측에서 볼 때 해독분해의 속도에 영향을 끼칠것은 뻔하다.

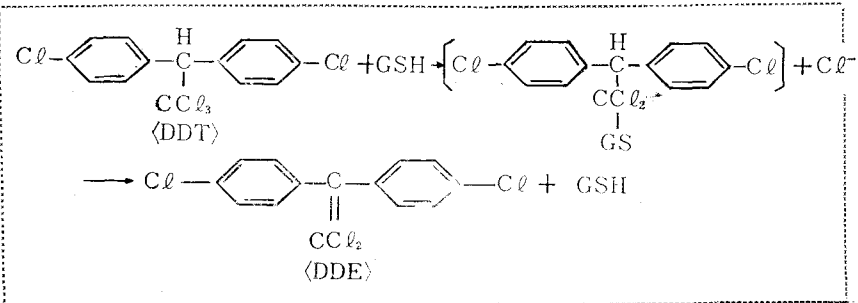
한편 유기염소계 살충제와 같이 脂質에 대하여 分配性이 높은 화합물은 지방체와 같은 조직에 축적되므로서 無毒化되어 저항성을 나타내는 기작도 생각해 볼 수 있으나 이와같은 문제와 관련시킨 연구는 별로 없다. 그리고 감수성 계통과 저항성 DDT 모기에서 지방함량에 차이가 없었다는 보고도 있어 저항성과 관련시켜 말하기보다는 耐性과 (Tolerance) 관련시킨 연구보고가 많다. 저항성 계통의 집파리나 바퀴에 있어서 살충제의 代謝物이 감수성 계통에 비하여 대량 排泄된다는 사실은 잘 알려져 있지만 일반적으로 볼 때 排泄의 차이만을 가지고 저항성기작으로 다루기에는 아직 미흡한 점이 많다.

**(2) 해독분해 정도의 차이**

살충제의 저항성 기작을 해명하는데 살충제의 解毒分解(代謝)가 중요한 것이라 지적되어 많은 연구가 이루어져 왔다.

저항성과 관련시킨 代謝研究는 DDT-脫鹽素酸酵素(DDT-ase), 加水分解酵素인 Phosphatase·Carboxy-

■ 살충제 작용기구와 사용시 주의점 ■



[그림 1. DDT의 분해]

terase·Mutant Aliesterase 등 Glutathion S-轉移酵素(Glutathion S-transferase, GSH S-轉移酵素) 및 酸化酵素 (Mixed-function oxidase) 등을 중심으로 다루어지고 있다.

DDT저항성 집파리에 있어서 DDT-ase에 의하여 DDT는 쉽게 DDE로 無毒化된 것은 이미 잘 알려진 사실이다. (그림1참조)

곤충의 加水分解酵素가 저항성을 나타내는 데 있어서 중요한 역할을 하고 있다는 사실은 유기인제 살충제에서 잘 알려져 있다. 유기인제 살충제는 일종의 인산에스테르로서 트리에스테르(Triester)인데 비하여 생물체 내에서 발견된 인산화합물은 모노에스테르(Monoester)과 디에스테르(Diester)이다. 이들 살충제의 P-O-C나 P-S-C 등의 開裂에 의한 Diester의 생성은 인산에스테르 加水分解酵素에 의하여 촉매되는 것으로 생각된다. 이때의 加水分解酵素는 Phosphatase가 관계하게 되는데 감수성 계통에서

보다 저항성 계통에서 Phosphatase의 활성이 높기 때문에 유기인제는 저항성 계통에서 쉽게 無毒化되고 만다.

Carboxyester基를 지닌 Malathion에 있어서는 加水分解酵素 Carboxyesterase가 저항성 발현에 중요한 역할을 한다. 즉, 저항성 해충들에서 Carboxyesterase의 함량이 높고 감수성 곤충에서 그것이 낮다.

유기인제 저항성 집파리는 감수성 계통에 비하여  $\alpha$ -naphthyl acetate-methyl butyrate와 같은 에스테르의 分解酵素 Aliesterase의 활성이 낮음을 확인, 보고한 예도 있다. 이것은 Aliesterase가 살충제의 해독분해 효소로 변하였기 때문인 것으로 해석되는데 이것을 Mutant aliesterase說이라 부르고 있다. 그러나 유기인제 저항성 곤충 모두가 Aliesterase활성이 낮다는 것은 아니다.

애벌구나 꿀동매미충의 저항성 계통에서는  $\beta$ -naphthyl acetate 분해 환

성이 높은 것으로 보고 되고 있다. Aliesterase라고 불리우는 효소는 몇 가지 효소가 모인 것이기 때문에 저항성에 관여하는 효소가 감수성계통에 있어 어느 효소의 突然變異에 의한 것인지는 앞으로 심오한 검토가 필요할 것으로 본다.

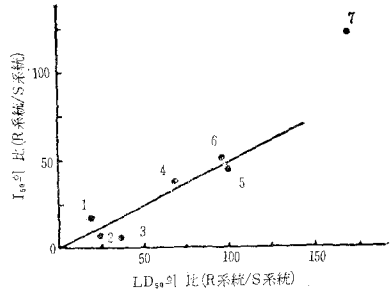
한편 유기인계 살충제의 Alkyl基를 Glutathion으로 轉移시키는 작용을 지닌 GSH S-轉移酵素의 존재는 저항성과 관계가 있어 Diazinon이나 Azinphos methyl 저항성 집파리에 있어서 GSH S-轉移酵素의 높은 活性이 보고되고 있다.

酸化酵素(Mixed-function Oxidase)가 각종 살충제에 관계하는 효소로서 살충제 저항성과 깊은 관련이 있는 것으로 보고되고 있으나 아직 확증은 내리지 못하고 있다.

### (3) 作用点의 감수성 저하

유기인계와 카바메이트계의 작용점이 Acetylcholinesterase(AChE)의 阻害에 있음은 잘 알려진 사실이기 때문에 저항성과 관련된 연구도 AChE와 관련시켜 연구되어 왔다. 그 한 가지 예로서 끝동매미충에 대한 카바메이트계 저항성 연구결과를 들 수 있다. 즉, Propoxur에 대한 끝동매미충 감수성 계통의 ChE I<sub>50</sub>值(50% 阻害 값)는  $1.3 \times 10^{-6}M$ 인데 비하여

저항성 계통에서는 그 값이 115배인  $1.5 \times 10^{-3}M$ 이었다고 한다. 한편 7종의 카바메이트계 살충제에 대한 저항성 정도(감수성·저항성 계통의 LD<sub>50</sub>비)와 ChE감수성 정도(감수성 저항성 계통의 I<sub>50</sub>비)의 사이에 고도의 상관성이 성립됨을 볼 수 있다(그림 2참조).



[그림 2] 끝동매미충에 있어서 抵抗性程度와 ChE의 感受性程度와의 相關

1. MTMC
2. MPMC
3. Hydroi
4. Carbanolate
5. Carbaryl
6. MIPC
7. Propoxur

### (4) 저항성 해충방제의 금후대책

앞에서 이미 지적한 바와 같이 살충제에 대한 해충의 저항성 발달은 살충제에 의한 해충방제에 있어서 크나큰 장벽일 뿐만 아니라 이의 대책이 마련되지 않는 한 경제적 손실은 더욱 더 커질 것이고 새로운 살



■ 살충제 작용기구와 사용시 주의점 ■

충제 개발은 어려운 지경에 빠질 것은 자명하다.

현재로서의 저항성 문제 해결의 대책 으로서는 다음과 같은 몇가지 점을 지적 할 수 있을 것 같다.

① 非交叉抵抗性을 나타내는 新殺虫劑의 선발, 개발 및 그들의 이용

② 저항성 해충에 대해서도 解毒되지 않는 관련화합물의 탐색과 이용

③ 저항성 해충방제를 위한 새로운 協力劑의 개발과 이용

④ 協力作用을 나타내는 混合劑의 개발과 그들 약제의 輪用

살충제를 이용한 해충방제 자체가 淘汰를 거듭하는 결과가 되므로 어떠한 殺虫劑가 나와도 저항성 문제는 계속될 일을 생각하면 다시 원점에 이르는 감이 든다.

미국캘리포니아대학교수 Georgian는 野外圃場에 있어서 살충제 저항성 발달과 확대를 지배하는 요인으로서 遺傳的 要因(Genetic factors), 生物的 要因(Biological factors) 및 防除的 要因(Operational factors) 등 세 가지 요인으로 대별하고 있다.

유전적 요인으로서의 抵抗性 遺傳子의 頻度, 數, 優性度, 遺傳子의 發現性과 相互作用, 다른 살충제에 의한 淘汰兵否, 저항성 유전자의 환경적응성을 들 수 있고, 생물적 요인으로서의 增殖(년간 世代數, 세대 당 산란수, 生殖方法)과 行動(격리, 이동성, 이주성, 식성의 범위 등)을

들 수 있다. 그리고 방제적 요인으로서는 살충제의 종류와 특성, 살충제의 사용방법(처리약량, 淘汰壓, 처리방법, 처리횟수등)을 들 수 있다.

저항성 문제의 해결은 어느 개개인의 수준보다는 차원을 달리하여 昆虫生理學·生化學·遺傳學·生態學·毒物學 등 다방면에 걸친 여러 과학자들의 共同研究가 요구되며 나아가 국제간의 협력과 정보교환이 보다 진밀하게 이루어져야 할 커다란 과제라 본다. <끝>

## 영농성공사례 모집

KBS주관, 본협회 협찬  
최우수작에 경운기 1대

한국방송공사(KBS)는 농약공업협회의 협찬으로 '81영농성공사례를 모집한다.

오는 11월 말까지 모집하게 될 영농성공사례는 예심과 본심을 거쳐지게 되며 12월 22일 시상식을 갖게 된다.

그런데 올해 영농성공사례에 당선된 작품에는 ▲최우수(1명)작=경운기 1대 ▲우수작(2명)=고성능동력분무기 1대 ▲가작(3명)=동력살분무기 1대 ▲장려상(5명)=카셋트라디오 1대씩을 농약공업협회에서 시상하게 된다.