

농약은 어떻게 만들어지고 어떻게 없어지나?

농약의 운명

-탄생에서 소멸까지-

㉔

전 재 철

전북대학교 농과대학 교수

4. 활동과 은퇴(작용과 소실)

처리된 농약은 크게 두 방향의 행적이 고려된다. 하나는 식물체로 흡수되는 경우이고 다른 하나는 토양에 처리되었거나 토양에 떨어진 농약성분의 경우이다. 이제부터 식물체 내에서의 토양에서의 행적으로 나누어 하나하나 살펴보기로 한다.

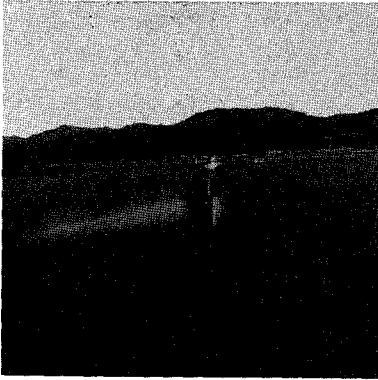
가. 식물체 내에서의 행적

① 흡수

농약의 식물체내 행적은 먼저 식물체 내로의 흡수로 이루어진다. 농약이 작용성을 나타내기 위한 전제조건으로는 작용력을 발휘할 만큼의 충분한 양이 식물체로 흡수되어야 하고, 흡수된 성분은 작용점으로 이행되어야 한다. 식물체로의 흡수경로는

지난호 ㉓에서는 농약의 일생(whole life)중 탄생·성장·외출을 알아보았다. 이번호㉔에는 농약이 식물체 내에서 어떻게 흡수·이행되고 분해되는 지를 살펴보고 다음호 ㉕에서는 토양중에서의 작용과 분해소실 과정을 알아본다.

㉓㉔ 두번에 나누어 심고자 했으나 활동과 은퇴 즉, 작용과 소실 과정을 좀더 자세히 설명코자 3회로 연재하게 되었다. (편집자 주)



잎에서의 살포입자의 차단은 잎이 줄기에 붙어있는 각도와 배열에 좌우된다.

본질적으로 사용농약의 종류에 따라 달라서, 잎이나 줄기를 통하는 경우와 지하부를 통하여 이루어지는 경우로 나눌 수 있다. 대체로 경엽을 통하는 경우는 약제성분의 농도가 지하부에서 접촉되는 약제 농도에 비하여 1,000~10,000배 정도 높은 것이 보통이다. 경엽에 부착된 이러한 높은 농도의 약제 성분은 표피의 큐티클을 가로질러 나타나는 큰 농도 기울기 차이로 말미암아 빠르게 흡수되지만, 토양에 있는 약제성분이 지하부에서 흡수되기까지는 보다 많은 시간이 소요된다.

잎이나 줄기에서 식물체 내로 얼마만큼 흡수되느냐 하는 것은, 먼저 경엽 표면에 의하여 살포된

농약이 어느 정도 차단되어(Intercept), 어느 정도 오래 머물러있게 되며(Retention), 어느 경로를 따르는가(Route)에 달려 있다. 경엽에서의 살포입자 차단은 잎이 줄기에 붙어있는 각도와 배열이 매우 중요하다. 예를 들어 화분과 등의 식물체는 주로 잎이 직립상태로 붙어있기 때문에 농약이 수직방향으로 살포될 때 비교적 적은 양이 잎에 의해서 차단될 뿐이다.

잎표면 왁스입자가 약제차단

한편 살포된 농약이 잎에 머물러 있는 정도는 잎의 특성에 따라 크게 영향을 받는다. 또한 살포기구, 농약의 제형 및 기후조건 등도 많은 영향을 미친다. 잎들은 표면이 왁스 입자(Epicuticular wax)들로 덮혀져 있는 거친 표면을 가지고 있는데 이것이 수분을 배척하는 성질을 나타낸다. 대체로 어린 잎들은 아직 완전하지 못한 왁스성분의 축적 때문에 오래된 잎에 비하여 많은 양의 살포된 농약입자가 머물러 있기 쉽다. 또한 잎 표면에 나있는 털의 존재여부에 따라서도 큰 영향을 받는다.

농약의 식물체 내로의 흡수경로는 크게 두가지로 구분된다. 식물

의 지상부는 거의 전체가 큐티클로 덮혀 있는데, 그 조성과 두께는 식물종에 따라 다른 것은 물론 식물체의 전 생육기간을 통해서도 다르다. 이 큐티클은 본질적으로는 물과는 친화력이 없는 비극성의 왁스 성분과 극성의 큐틴으로 구성되어 있다. 전자는 친유성 농약 성분의 흡수 경로이고, 후자는 친수성 농약 성분의 흡수 경로이다. 그러나 실제로 후자의 경우에는 상대습도가 높은 조건하에서만 큰 의의가 있다. 연구 보고에 따르면 경엽표면의 농약 농도의 약 1%만이 식물체 내로 흡수되어 이용된다고 한다.

토성과 유기물이 중요한 인자

식물체 지하부중 농약흡수의 주요부위는 뿌리이다. 뿌리를 통해서 흡수되는 농약은 논외의 경우에는 말할 것도 없고, 밭의 경우에도 먼저 토양중에 용해되지 않으면 안된다. 토양 용액중의 농약의 농도와 이들의 식물체로의 흡수 이용에 있어서 중요한 인자로는 토성과 토양유기물 함량이다. 토양은 모래, 미사, 점토의 상대적 함량비로 나타내기 때문에 토양중 용액의 이동 및 용액의 재분배는

이 토양에 의해서 크게 조절된다고 할 수 있다. 또한 토양중 유기물은 농약을 토양 용액중에서 흡착하여 이동량을 감소시킴으로써 식물체가 이용할 양을 줄여주기 때문에 지하부 흡수에 사실상 큰 영향을 미친다. 흡수 기작으로는 몇몇 특수한 경우를 제외하고는 대체로 지하부의 조직 중 죽어있는 세포를 통한 수동적 확산(Passive diffusion)에 의하여 이루어진다고 믿어지고 있다.

② 이행

식물체 내로 흡수된 농약의 유효성분은 이들이 작용을 나타내어 할 장소로 이동되지 않으면 안된다. 식물체 내의 이동로는 근본적으로 두가지로 나누어진다. 즉 식물체의 죽어있는 세포(Apoplast)들을 통하는 경우와 살아있는 세포(Symplast)들을 통하는 경우이다. 전자는 물관이나 세포벽들로 구성되어 있는 반면에 후자는 체관이나 세포질들로 이루어진 부분이다.

뿌리를 통해서 흡수된 물이나 무기양분들은 물관을 통해서 운반된다. 마찬가지로 대부분 뿌리에서 흡수된 농약성분 또한 이러한 경로를 통해서 지상부로 옮겨진다. 따라서 물관을 통한 이

동 정도는 식물체외의 환경인자에 의하여 크게 영향을 받게된다. 즉 물의 기공을 통한 소실에는 광, 온도, 습도 또는 풍속이나 토양중 수분정도 등이 영향을 미치기 때문에 결국 뿌리에서 물관으로 옮겨와서 지상부 윗쪽으로 이동하여 가는 농약의 이동정도는 앞에서 물의 증산속도에 의하여 지배받는다고 할 수 있다.

물의 증산속도에 좌우돼

물관을 통해서 이행되어 온 농약성분은 일차적으로 계속 성장중에 있는 잎으로 배치된다. 만약 농약성분이 광합성에 영향을 미치는 제초제와 같다면 곧 바로 여기에서 약제로서의 활성을 나타낼 수 있겠지만 그렇지 않고 성장억제에 관여되거나 하는 약제라면 당연히 이동후에 성장점으로서의 재배치(재분배)가 따라야 할 것이다. 이런 경우에는 체관을 통한 이행이 이루어진다.

경엽으로 흡수된 농약성분 또한 쓰여져야 할 곳으로 이행된다. 일반적으로 광합성에 의하여 만들어진 광합성 산물(Source)은 체관을 통해서 생장이 이루어지는 곳이나 저장되는 장소(Sink)로 이동되는

데, 농약성분도 체관을 통한 source에서 sink로 이동되는 것으로 생각하고 있다. 즉 활발하게 작용을 계속하고 있는 잎에서 흡수된 농약성분은 생장이 진행중인 어린 잎이나 생장이 멈춰지고 오히려 영양분을 필요로 하는 오래된 잎으로는 이동이 이루어지지만 어린 잎이나 오래된 잎에서 흡수된 농약성분이 활발하게 작용을 계속하는 잎으로는 이동되어 가지 않는다. 물론 농약중에는 특별하게 잎에서 이행이 이루어지지 않고 흡수된 부위에 머물면서 작용성을 보이는 경우도 있다. 예를 들면 paraquat나 diquat와 같은 제초제들은 잎의 접촉 부위를 급속히 건조시키기 때문에 식물 조직의 파괴에 따라 이동로가 없어지는 셈이 된다.

③ 분해

식물체 내에서의 농약의 소멸은 분해과정을 통하여 본래의 화학구조로부터 다른 형태로의 변형을 의미한다. 식물체 내로 들어온 농약이 대사를 받게 되면 그 화학구조가 변형되는데 이러한 과정은 크게 다섯 가지 형태로 구분지을 수 있다. ① 활성기의 치환 ② 측쇄의 변형 ③ 환(環)의 개열 ④ 탄소-질소 및 탄소-유황 결합의 절단



식물체 내에서 농약은 분해·불활성화 등 대사과정을 거쳐 약제로서의 일생을 마감한다.

⑤ 대사산물과의 결합이 그것이다. 이러한 구조변형은 결국 여러 형태의 대사결과로서 Simabukuro 등(1981)은 농약이 생체내(동물과 식물)에서 불활성화되어 가는 단계로 3단계를 제시하였다. 즉 제1단계로 산화, 환원 및 가수분해를 2단계에서는 결합반응으로 진행된다고 하였다. 더욱이 식물체 내에서는 동물체 내에서의와 달리 제3단계로 제2결합반응이 더욱 진행되는 차이가 있다고 하였다.

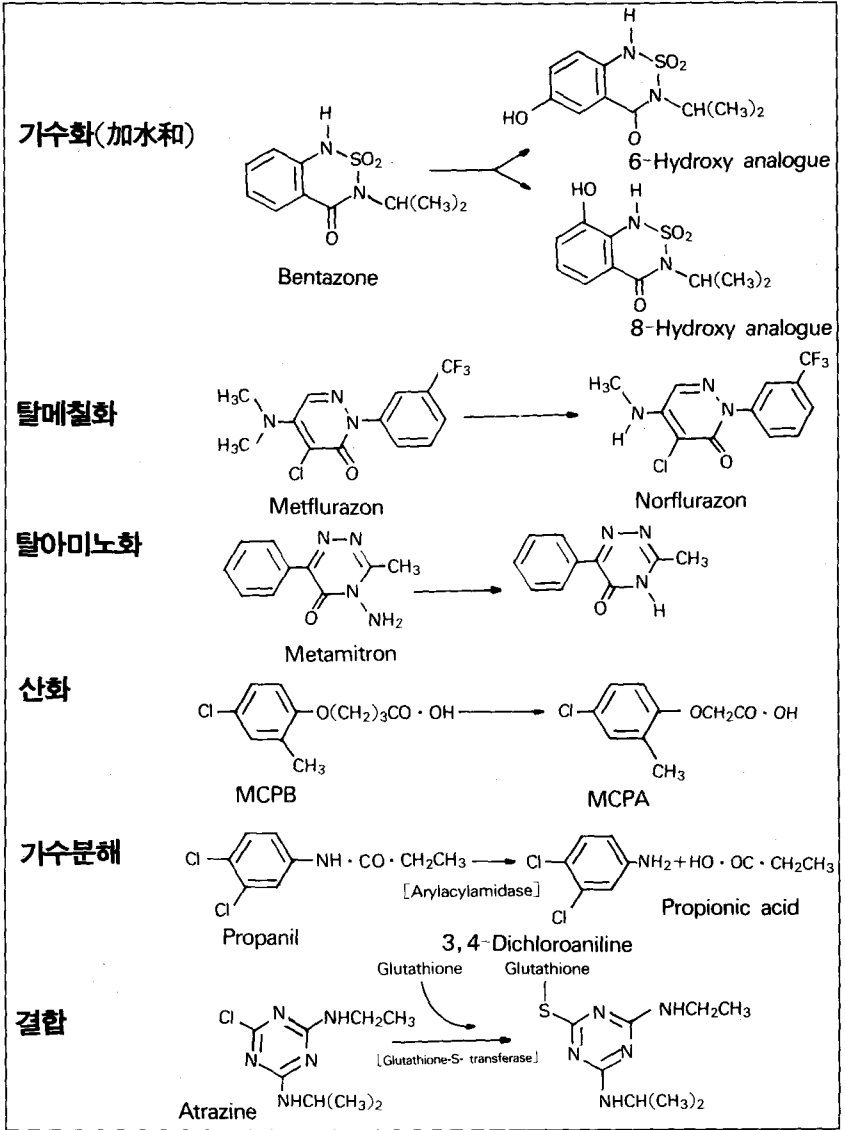
여러가지의 농약중 제초제는 살충제나 살균제와는 달리 식물체를 대상으로 처리된다. 따라서 식물체 내에서의 작용성으로 인한 살초효과를 기대하는 목적으로 부터 식물체 내에서의 행적이 가장 많이

또 광범위하게 연구되어 있기 때문에 이제부터는 제초제의 경우를 예로 들어 분해되거나 불활성화되어 약제로서의 일생을 마감하는 대사경로를 알아본다.

제초제불활성화, 수화로 시작

식물체 내에서의 제초제의 대사는 다양한 종류의 효소에 의하여 그 작용이 촉매된다. 제초제의 불활성화는 보통 초기에 수화(Hydroxylation)가 이루어져 분자가 보다 수용해성으로 되고 이어서 당(糖) 또는 아미노산과 결합된 후 식물 세포중의 액포로 배설된다.

이러한 수화는 microsome 내의 mixed-function oxidase(MFO)에 의하여 촉매되는데 bentazone, 2, 4-D, diclofop 등의 대사에서 볼 수 있다. Sulfonylurea의 chloresulfuron도 이러한 수화가 초기에 진행되지만 오히려 수화된 대사 중간산물은 활성을 가지고 있고, 이 단계를 거친 후에 더욱 당결합(Glycosidation)이 이루어짐으로써 불활성화에 도달된다. 또한 탈메틸화(Demethylation) 작용도 MFO에 의하여 진행되는데 광합성 저해제인 phenylurea의 diuron은 초기의 탈메틸화, 수화 그리고 당결



식물체 내에서 일어나는 제초제의 주요 대사

합의 과정을 거쳐 불활성화 된다.

트리아진계의 탈아미노화

탈아미노화(Deamination)는 triazine계의 metribuzin, metamitron 등에서 일어난다. 이 작용은 peroxisome에 존재하는 deaminase에 의하여 촉매되는 불활성화이다. 동일 triazine계의 atrazine은 옥수수내에서 세계의 아미노산 결합체인 glutathione과 결합되어 불활성화 된다. 이 작용에는 glutathione-S-transferase(GST)가 촉매한다. GST의 촉매에 의한 불활성화에는 diphenylether, chloroacetanilide 및 몇몇 sulfonylurea 화합물도 포함되어 있다. Tricarbamate계의 EPTC는 glutathione 결합에 앞서 산화효소에 의하여 황산화물(S-oxide)이 생성되는데 오히려 이 산화물은 본래의 유효성분보다 제초활성이 더 강한 것으로 알려져 있다.

가수분해에 의한 분해의 대표적인 예는 propanil에서 나타난다. propanil은 벼의 체내에 흡수된 후 acrylamidase에 의하여 3,4-dichloroaniline과 propionic acid로 분해되는데 이들 두 화합물 모두

제초활성은 없다. 가수분해 작용은 특히 ester 화합물에서 많이 나타난다. aryloxyphenoxypropionic계의 fluazifop-butyl, benzoylpropethyl이나 imidazolinone계의 imazamethabenz-methyl 등은 가수분해되어 산(acid)으로 되지만 이 경우 오히려 본래의 화합물보다 식물체 내의 이동성도 높아지고 독성도 증대된다.

산화(Oxidation)는 식물체 내에서 일어나는 보편적인 반응중의 하나로 지방산의 베타 산화가 제초제의 분자에서도 일어난다. 즉 phenoxy계의 2, 4-DB나 MCPB의 측쇄에 있는 두개의 탄화수소가 떨어져 나가게 되어 각각 2, 4-D와 MCPA가 된다. 이러한 대사도 비제초 활성분자가 대사에 의하여 활성을 갖는 화합물로 변형되는 경우이다.

유기화합물이 완전히 분해되면 궁극적으로는 물과 탄산가스로 변화되어야 하지만 생체내에서 이러한 단계들을 거쳐 농약이 완전히 분해되는 것은 매우 드문 것으로 완전 분해에 이르는 운명에 대하여는 거의 알려져 있지 않다.

〈다음호에 계속〉