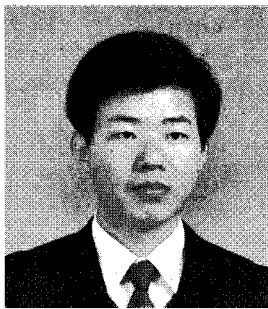


정밀방제기술의 이론적 기초와 작업자의 안전확보방안



이 중 용

전북대학교 농업기계공학과 조교수

농약입자의 경로

일반적인 노즐에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 노즐구멍을 통해 나오는 물기둥이 얇은 막으로 되었다가 작은 입자로 분화됩니다. 생성된 입자는 공기를 타고 이동하다가 목표물에 부착됩니다. 농약입자가 공기중에서 이동할 때, 입자의 운동을 특성지워 보면 세가지 영역이 구분됩니다. 첫째 구역은 층류이동 구역으로 많은 입자가 이동하면서 주변 공기를 꾸준히 입자 무리속으로 끌어들이는 부분입니다. 이곳은 상대습도가 높고 입자와 주변공기의 속도차이가 작기 때문에 입자가 이 영역에 머무르는 동안 입

자의 증발속도는 비교적 작습니다. 그러나 작은 입자나 중간크기의 입자들은 바람에 의하여 이 영역 밖으로 쉽게 날려갑니다. 날려가는 곳은 난류이동 구역으로서 단위체적당 입자의 수가 작기 때문에 상대습도가 주변공기와 비슷합니다. 따라서 입자의 증발속도도 층류이동 구역에 비하여 빠릅니다. 제3의 구역은 난류부착구역으로서 목표물 근처에서는 주변 공기가 난류의 특성을 지니게 됩니다. 층류이동 구역이나 난류이동 구역에 있던 입자가 이 구역에 이르면 목표물에 충돌·부착 하기 때문에 별도로 구분합니다.

대개의 농약은 물에 희석하는데 목표물까지 이동하는 과정에서 농약입자는 9매인 물이 증발

함에 따라서 그 무게가 작아집니다. 표 1에 나타낸 바와 같이 직경이 50마이크론(μ) 이하의 물방울은 공기중에서 빨리 증발됩니다. 이 자료는 물방울을 공기중에서 가만히 떨어뜨리고 증발되는 과정을 기록한 것이므로 층류구역처럼 수많은 입자가 무리져서 이동하는 경우의 증발속도와는 물론 큰 차이가 있습니다. 입자가 완전히 증발되면 고체상의 유효성분만을 가진 경우에 고체입자 결정이 되며 그 형상은 화학적 성분에 따라서 달라집니다. 증발된 입자는 습기가 있는 표면에 붙으면 다시 약효를 발휘하는 경우가 대부분이나 입자의 표면이 건조하기 때문에 부착되어 유지될 확률이 낮습니다.

농약의 비산손실과 작업자 안전성

입자가 난류이동 구역으로 빠져나가는 것을 흔히 비산(drift)이라 합니다. 비산에는 입자비산과 증기비산(휘산이라고도 함)으로 나누는데 여기서는 입자비산에 한정하여 말하겠습니다. 비산된 농약은 주변공기에 의하여 함

그림1. 분무입자의 생성원리와 입자운동의 3영역

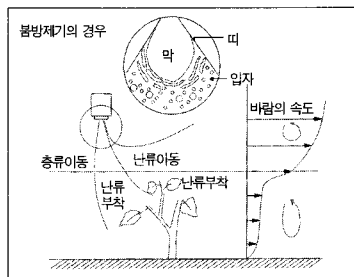


표1. 입자의 직경별 부착특성 및 이동특성

입자 직경 (μ)	낙하 속도 (m/s)	생존 시간 (초)	낙하 거리 (cm)	1/10a살포시 cm^2 당 입자수	지름 1mm인 입자의 부착면적과 같은 부피를 살포할 때, 해당입경의 부착면적비율
5	0.00076	0.04	<2.5	4×10^{10}	40000
20	0.012	0.64	<2.5	23870	2500
50	0.075	3.5	27	1530	400
100	0.279	14.0	384	192	100
200	0.721	56	4263	24	25
500	2.139	400	15250	1.5	4
1000	4.0	1620	>15250	0.2	1

주: 온도 30도, 상대습도 50%의 대기조건

게 이동하면서 작은 고체 결정이 되므로 대개의 경우는 목표물에 부착되지 않습니다. 비산을 줄이는 것은 정밀방제의 중요한 부분의 하나로서 농약의 낭비를 막고 원하지 않는 목표물에 농약이 접촉되는 것을 방지하고 작업자의 안전을 도모하는 수단입니다. 우리나라에서 발생하는 대부분 살포중의 농약중독 사고는 바로 비산된 농약입자가 호흡기나 피부를 통하여 인체에 흡수되어 발생하고 있습니다.

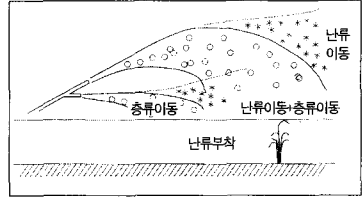
비산을 줄이는 대책은 무엇인가

비산을 줄이기 위해서는 우선 비산되기 쉬운 작은 입자를 발생하지 않는 노즐을 사용할 필요가 있으며 총류구역의 길이를 최단거리로 하는 것입니다. 총류이동구역이 길어지면 입자가 난류구역으로 이동할 수 있는 시간이 길어지기 때문입니다. 우리나라

에서 주로 사용되는 동력분무기는 노즐 몇개로 넓은 면적을 살포하고자 하는데에 초점이 맞추어져 있어서 총류구역이 길기 때문에 입자가 비산할 확률이 높습니다. 분방제기는 식물체 위에서 가깝게 농약을 분사합니다. 동력분무기를 이용하는 경우에 분무입자가 이루는 세가지 구역을 그림 2에 표시하였습니다. 그림 1과 비교하면 동력분무기는 입자의 분사방향이 전방·상향이므로 입자가 공중에 떠 있는 시간이 길기 때문에 비산이 많을 것은 너무도 당연합니다.

또한 동력분무기에서 사용하는 원추형 노즐은 분무되는 입자가 원추를 이루며 분사됩니다. 불행하게도 이러한 노즐들은 압력을 조정하여 평균입경의 크기를 조정할 수 있으나 발생하는 입자의 크기는 아주 작은 입자에서 커다란 입자까지 다양하여 작은 입자들은 분사되어 이동하는 사이에

그림2. 동력분무기를 이용하는 경우 입자 운동의 3영역



비산될 운명에 처하는 것입니다.

평균입경의 개념과 함정

분무기의 압력을 낮추면 입자의 평균크기가 커지고 압력을 높이면 작아지는 것은 중요한 사실입니다. 흔히 이 사실을 가지고 방제기계에서 비산을 막는 것이 쉬운 일이라고 여기기 쉽습니다. 그러나 노즐의 압력에 따라 평균입경을 바꿀 수는 있으나 입경의 범위는 큰 차이가 나지 않습니다. 노즐이 발생시키는 입자들의 크기분포를 나타내는 입경분포도(그림3)를 살펴보면 대개의 노즐들이 측정하기도 힘든 10 마이크로 이하의 입자를 다수 발생시키며 동시에 1mm 또는 그 이상이 되는 크기의 입자까지도 발생시킵니다. 물론 매우 작은 입자가 차지하는 비중은 매우 작으나 비산되어 작업자에게 계속적으로 집적될 수 있다는 것은 매우 중요한 사실입니다.

노즐에서 발생하는 입자는 너무 작아서 크기를 셀 수 없는 경우가 많기 때문에 사회에서 흔히 사용하는 평균의 개념을 사용할

그림3. 분무입자 직경의 크기별 체적과 갯수

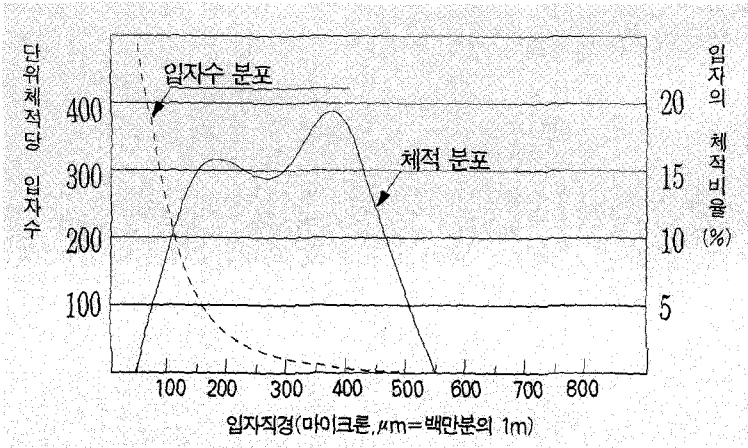
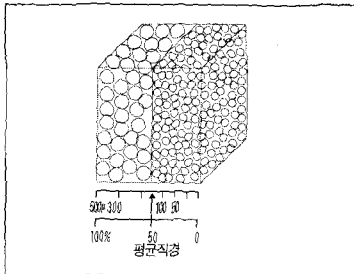
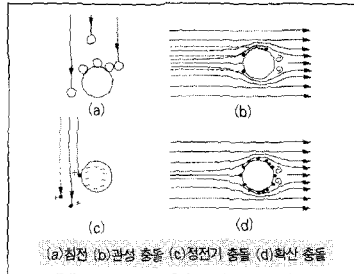


그림4. 방제기술에서 평균직경의 정의



수 없습니다. 가령 사과와 평균 무게를 측정하고자 하면 측정할 대상의 숫자가 정해져야 합니다. 그러나 방제기에서는 작은 입자가 많아서 그 개수파악이 안됩니다. 따라서 이론적으로는 입자직경의 평균을 구할 수 없습니다. 최근 침단장비를 이용하는 경우에도 그 문제는 여전히 남아 있습니다. 따라서 방제기계에서는 부피를 가지고 평균입경을 정의합니다. 가상적으로 입자를 큰 것부터 나열하여 작은 입자의 부피부터 큰 입자의 부피를 더하여

그림5. 분무입자의 목표물 충돌방법



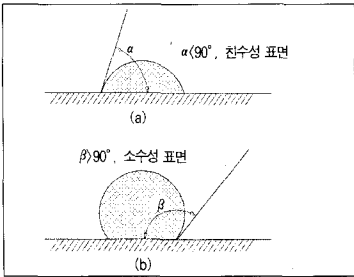
가다보면 그 부피가 본래 살포한 부피의 1/2이 되는 경우가 있기 마련입니다. 이 순간 더했던 입자의 직경을 흔히 평균직경이라고 합니다(그림 4). 따라서 이 크기만으로는 입자의 분포를 잘 알 수가 없으며 평균입경이 크다고해도 비산할 수 있는 입자의 숫자는 무수히 많은 것입니다.

살포된 입자 얼마나 부착하나

입자가 목표물까지 충돌했다고 반드시 부착되지는 않습니다. 그

림 5는 입자가 목표물에 충돌하는 과정의 종류를 나열한 것입니다. 첫째는 침전으로서 중력에 의하여 목표물에 부착하는 것인데 이 방법으로는 목표물의 반대편에는 도저히 부착되지 않습니다. 둘째는 관성충돌입니다. 커다란 입자는 바람의 영향을 작게 받아서 쉽게 목표물에 도착하지만 자체가 가지고 있는 중량과 속도에 의하여 목표물에 충돌하여 작은 방울로 나누어져 반사되는 경우가 많습니다. 물론 튕겨서 생겨난 작은 입자가 다시 부착될 수 있으나 부착될 확률은 작습니다. 1~50마이크론 범위의 작은 입자는 관성충돌시에 부착될 가능성이 상대적으로 높으며 목표물 뒷면에 부착될 확률도 비교적 높습니다. 셋째는 정전기 충돌로서 전하(電荷)를 띤 입자가 지면에 연결된 목표물에 정전기 현상으로 이끌리는 것을 말하며 이것은 특별한 노즐에서만 적용됩니다. 넷째는 확산충돌입니다. 1 마이크로 이하의 입자들은 자체의 무게가 워낙 가볍기 때문에 공기와 다름없이 이동하다가 표면에 부착되는 것으로서 목표물의 후면에도 부착될 확률이 높습니다. 앞 뒷면의 별래에 농약을 뿌린다면 커다란 입자로 살포할 경우 위에서 살포해서는 목표물에 도착할 확률이 지극히 낮습니다. 이런 경우에는 작은 입자를 이용하여 확산충돌이나 관성

그림6. 분무입자와 목표물 표면간의 접촉각



층들을 이용해야 합니다.

농약이 목표물 표면에 부착하는 것을 좌우하는 중요한 요소는 방제물 표면의 거칠기와 표면에 있는 털의 크기 및 물과 표면과의 표면장력 등이 있습니다. 대부분의 식물은 표면에 털이 있고 물을 배척하는 왁스(wax)층이 있기 때문에 물에 혼합한 농약을 배척하는 성질이 있습니다. 대부분의 작은 입자는 왁스층에 도달하기 전에 표면에 있는 작은 털에 붙어있기 때문에 일단 부착되었다가도 다시 떨어져 나가거나 완전히 증발되어버려 바람에 의해 유효성분이 가루가 되어 떨어 집니다. 이런 이유로 약제효과를 높이기 위해서는 건조한 표면보다는 축축한 표면이 유리합니다. 그러나 물기가 느껴질 정도의 상태에서는 약제입자가 흘러내릴 가능성이 높아집니다. 또한 표면과의 표면장력이 작은 경우에는 입자가 표면에 퍼질 수 있으나(그림6 a), 큰 경우에는 입자가 둥글게 모양을 유지하므로 떨어질 염려가 있습니다(그림6b). 농약살포시 전착제(붙어서 넓게

표2. 물방울 입자가 잎 표면과 이루는 접촉각

식물명	잎의 윗면	잎의 아랫면
유카리나무	170°	170°
수선화	142°	142°
거품장구채 (비누패랭이)	100°	106°
벚나무류	90°	93°
국화류	90°	90°
참질경이	74°	39°

퍼지게 하는 첨가물)를 함께 혼합하는 이유가 여기에 있습니다. 입자의 종류별 잎의 위·아래면에서 접촉각의 크기를 표 2에 나타내었습니다. 식물에 따라서는 입자를 배척하는 성질이 강하여 잎이 강하게 흔들리면 부착되었던 입자가 다시 떨어지는 경우도 많이 있습니다.

입자의 부착과정에 재미있는 현상이 있습니다. 목표물에 따라서 특정한 크기의 입자가 집중적으로 부착된다는 점입니다. 이러한 현상은 살충제에서 특히 뚜렷하게 나타나는데 이것은 살포대상물의 표면형상과 그 성질에 기인합니다. 이 사실을 주목한다면 특정한 크기 이외의 입자들은 부착효율이 현저히 낮으므로 비록 목표물 근처에 간다하더라도 대부분 손실된다는 점을 알 수 있습니다. 여기에서 작목별, 병해충별, 제형별, 작용기작별 정밀방제기술을 개발할 수 있다는 가능성이 발견됩니다. 제 1보에서 소개했던 네덜란드의 다년차식물 보호계획도 세부사항을 살펴보면

필자가 제시하는 이 가능성에 근거를 두고 추진되는 것입니다.

부착되면 모두 약효를 내는가

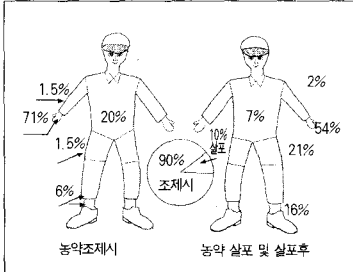
표면에 부착된 입자는 증발하는 동안에 방제목표물 내부로 침투하여 방제효과를 나타냅니다. 많은 농약은 농약입자가 성공적으로 목표물에 부착되었다 하더라도 목표물 내부로 흡수되어야 그 효과가 발휘됩니다. 식물체나 곤충 표면에 쉽게 흡수되기 위해서는 대상물체의 특성과 상태에 영향을 받습니다. 약제의 농도가 높으면 농도차이에 의한 흡수효과가 물론 높아집니다. 농약조제시 소금 등을 섞어서 농약의 농도를 진하게 하는 것도 흡수효과를 높이는 한 방법입니다.

흔히 토양에 살포하는 제초제는 효율이 매우 높기 마련이나 올해같이 가뭄이 심한 경우에는 농약이 식물체 뿌리로 전달되는 과정에 필수적인 토양수분이 작아서 약효가 나지않는 경우도 발생합니다. 결론적으로 말하면 농약입자가 분사되어 약효를 발휘하기까지 과정을 생각해 볼때 실제로 약효를 발휘하는 농약의 양은 살포량에 비하여 매우 낮을 수 밖에 없습니다.

균등살포는 왜 중요한가

앞에서는 입자 하나의 이동과

그림7. 농약접촉의 신체부위별 발생률



부착, 흡수과정을 살펴보았습니다. 그렇다면 수많은 입자를 어떻게 살포해야 할까? 정밀방제에서는 입자가 목표물에 집중되는 것이 중요합니다.

그러나 입자를 하나씩 집어서 원하는 곳에 가져다 놓을 수 없기 때문에 우리는 수많은 입자를 발생시켜 확률적으로 목표물에 도달할 수 있는 가능성을 높이고자 합니다. 표 1에 단포당 1리터의 약을 뿌리는 경우 입자의 크기에 따라서 단위면적당 부착될 수 있는 입자의 갯수와 직경이 1mm인 입자를 다른 크기로 살포할 경우 같은 부피의 농약으로 몇 배 넓은 면적을 덮을 수 있는지를 계산하여 나타내었습니다. 비산이 큰 문제가 되지 않는 범위에서 입자의 직경을 작게하여, 가능한 넓은 면적을 뒤덮음으로써 약효와 목표물에 도착시키는 확률을 최대화할 수 있습니다.

작업자 안전과 약효의 극대화

이상에서 깊이는 없지만 살포 기술의 핵심적인 사항을 설명드

렸습니다. 농약을 살포하는 목적이 식물보호라면 ① 목표물에 잘 부착되는 특정 크기의 입자를 ② 균등히 살포하는 것이 중요합니다. 이 목적은 대개의 경우 작은 입자를 이용하면 달성됩니다. 그러나 이 목표를 극대화하면 작업자가 위험하게 됩니다. 비산을 최소화하고 더 나아가 부착을 극대화하는 크기의 입자만을 발생시켜 방제한다면 우리는 작업자 안전과 식물보호의 두 목표를 달성할 수 있습니다.

접촉사고 유형에서 보는 교훈

작업자 안전성을 위주로 정밀방제기술을 검토하는데 있어서 중요한 기초자료는 농약접촉사고의 유형과 그 원인을 분석하는데 있습니다. 덴마크의 한 연구소의 발표에 의하면 분방제기를 사용하는 경우 농약접촉사고의 90%가 농약을 조제하거나 농약통에 담은 과정에 발생하며 10%만이 실제로 방제하는 과정에서 발생한다고 합니다(그림 7). 조제나 농약을 담은 과정에서 농약이 접촉하는 주요부위는 손이 71%, 상반신 20%, 정강이부분 6%, 팔과 넓적다리 부분이 각각 1.5%였습니다. 방제작업시에는 45%의 경우는 방제기와 노즐을 세척할 때 손에 접촉하며, 넓적다리는 21%로서 손을 바지에 닿기 때문에 접촉되며, 정강이부분

은 16%로서 살포 직후에 작물 사이를 걸어다니다가 농약을 묻히고, 농약이 묻은 기계를 조작하다 손에 접촉하는 경우가 9% 정도 발생하며 2%는 팔에 접촉됩니다. 농약은 직접 인체에 비산되어 접촉하지 않더라도 많은 경로를 통해서 작업자를 위협한다는 사실을 알 수 있습니다.

농약정보지 94년 5·6월호에 실린 일본과 중국의 농약중독 사고를 보면 살포 작업시 사고를 당하는 경우가 일본은 47.8%, 중국은 67.3%로서 덴마크의 자료와 좋은 대조를 이룹니다.

첫째, 방제작업의 승용화가 농약사고를 대폭적으로 줄인다는 사실을 유추해 낼 수 있습니다. 살포시 농약사고가 일어나는 비율이 일본과 중국에 비하여 덴마크에서는 매우 낮습니다. 선진 농업국 농민의 인식과 세심한 주의도 일부의 원인이 되겠으나 근본적인 차이는 승용작업과 보행작업의 차이로 판단됩니다.

둘째, 작업자 안전에 대한 인식의 차이를 알 수 있습니다. 덴마크에서는 농약접촉 자체에 초점을 맞추는데 비하여 중국이나 일본의 자료는 농약중독사고에 초점이 맞추어져 있습니다. 필자의 경험으로 방제기의 문제점을 파악하기 위해 농약중독에 대한 경험을 농민에게 설문조사하면 대부분이 없다고 합니다. 농약살포후에 머리가 아프고 힘이 없어

쉬는 것은 당연한 것이라는 인식입니다. 치명적인 것만이 사고이고 만성적이고 누적되는 것에 대한 두려움을 농민들이 가지고 있지 않습니다. 미국에서는 RPA-R(Rebuttable Presumption Against Registration) 프로그램에 의하여 기존의 등록된 모든 살충제의 만성적인 노출에 대한 위험성에 비중을 두고 재평가하고 있음을 주목할 필요가 있습니다. 작업자 안전과 농약접촉을 줄이는 것은 불가분의 관계입니다. 농약의 접촉경로는 잘 아시는 바와 같이 구강을 통한 것과 피부를 통하는 것, 호흡기를 통하는 것이 있습니다. 이 중에서 호흡기를 통한 접촉이 가장 급성적인 농약중독 현상을 유발한다는 것은 잘 알려진 사실이나 피부를 통한 접촉은 대부분의 농민이 무시하고 있는 실정입니다. 우리 몸은 부위별로 농약을 흡수하는 속도가 다릅니다. 팔목을 기준으로 하면 얼굴과 목부분은 3~6배정도 농약의 흡수속도가 빠릅니다. 특히 사타구니는 11.8배에 달합니다. 이 속도는 농약을 마시는 경우보다도 더 흡수속도가 빠른 것입니다.

작업자의 안전성 확보

필자는 작업자 안전성을 확보하는 것이 농약을 둘러싼 많은 문제를 해결하는 첩경이라는 것

을 제 1보에서 주장하였습니다. 그렇다면 어떻게 작업자 안전성을 확보할 것인가? 첫째는 농약이 인체에 무해하도록 개발하는 일입니다. 둘째는 살포기계의 승용화입니다. 살포기계를 승용화한다는 것은 분방제기의 사용을 동시에 의미합니다. 우선 승용화하면 작업자가 안전캡(safety cab) 안에 있으므로 비산으로부터 안전합니다. 또한 앞에서 설명한대로 분방제기는 동력분무기와 달리 비산에 대한 위험성이 작습니다. (참고로, 여기서 동력분무기라 칭하는 것은 펌프의 종류를 뜻하는 것이 아니고 분무부에 두세개의 노즐을 부착한 살포기계를 의미하며 동력분무기에 사용되는 펌프는 분방제기에서도 그대로 이용할 수 있음을 밝힙니다.) 셋째로 농약을 취급하는 과정을 통제하는 것입니다. 통제하기에 편한 시설을 마을마다 설치하면 통제중에 당할 수 있는 사고의 확률을 낮출 수 있으며 제 2보에서 말씀드렸듯이 환경보호 차원에서도 여러가지 유익한 부수적 결과를 기대할 수 있습니다. 넷째로 작목별, 병해충 종류별, 제형별, 작용기작별 살포방식을 개발하는 연구에 투자해야 합니다. 적절한 노즐의 선택과 적정압력의 선택, 노즐의 최적상태유지 적합한 살포장치의 선택 등을 통하여 작업자 보호, 식품안전성 확보, 환경보존과 식물보호의 네가지 목표를 가장 현실

성 있게 모두 이룰 수 있습니다.

연재를 마치며

1보에서는 농약을 둘러싼 환경보호, 식물보호, 식품안전성, 작업자안전성 문제를 해결하는 방안을 말씀드렸습니다. 농약의 개선을 위해 노력하는 한편 농약에 대한 인식을 바꿀 수 있는 기회를 일반에 제공해야 하는데 그 첩경이 바로 농민이 안심하고 농약을 살포할 수 있게 하는 것이라고 말씀드렸습니다. 2보에서는 구체적으로 정밀방제를 어떻게 추진할 것인지에 대하여 큰 효과가 기대되는 방제기계의 승용화와 농약을 조제하는 시설의 필요성, 취급을 통제하는 것 등을 몇 가지 강조하여 말씀드렸습니다. 3보에서는 협의의 정밀방제기술에서 고려되는 중요한 이론과 정밀방제가 가능하다는 근거를 제시하였습니다. 아쉬운 것은 제가 정밀방제의 가능성을 보이는 많은 자료를 모아왔으면서도 체계적으로 정리하지 못하였다는 점과 노지재배 관점에서 연재해왔다는 점입니다. 이후에 정밀방제의 가능성을 체계적으로 설명하고 시설원예나 시설축산에서의 방제에 있어서 어떻게 정밀방제를 이룰 것인지 연구하고자 합니다. 그동안 관심을 가지고 체계 연재를 주셨던 모든 분께 감사드립니다. **농약정보**