

‘사용방법’대로 적의 사용하면 ‘토양잔류’ 염려할 필요 없어

환경중 가수분해·산화·광화학적 화학반응과 미생물에 의한 생화학반응 통해 분해
토양축적성, 후작물 및 환경생태계에 대한 안정성 자료 심층적으로 검토, 등록 허락



김찬섭 박사
국립농업과학원
농자재평가과

병해충, 잡초의 방제를 위해 사용한 농약은 토양을 비롯하여 식물, 수계, 대기 등에 도달한 후 다양한 경로를 통해서 환경 내에 이동 분포하게 된다. 이때 농약의 이동, 분포, 잔류, 소실의 특성은 농약자체의 이화학적 특성, 농약의 제제 형태, 사용 방법, 대사 및 분해 정도 등과 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라 환경 조건, 즉 기상조건, 토양 조건 등에 따라서도 크게 영향을 받는다. 하지만 농약이 환경에 도달, 이동 분포하는 과정에서 질적, 양적인 변화 없이 모화합물 그대로 잔류, 이동, 분포하는 것이 아니고 여러 가지 화학적, 생화학적, 광화학적 반응 등에 의해 대부분이 대사, 분해되어 소실된다.

그러나 농약의 종류에 따라서는 활성화 되어 독작용이 더욱 강해지는 경우도 있다. 이와 같은 농약의 환경 중 대사 분해 반응은 화학적인 반응과 생화학적 반응으로 크게 구분할 수 있는데 화학적 변화의 대표적인 것은 가수분해, 산화와 광화학적 반응이다. 그리고 순수한 화학적인 변화 외에 토양, 수중의 미생물에 의해 생화학적으로 대사 분해되는데, 사용된 농약의 대부분이 토양으로 이동되는 점을 감안

할 때 토양에서 미생물에 의한 대사 및 분해는 농약에 의한 환경오염의 방지라는 측면에서도 매우 중요한 의미를 가진다. 이들 미생물은 유기화합물을 분해시켜 자체의 생활에너지원으로 이용하고 있기 때문에 농약과 같이 본래 자연계 내에 존재하지 않는 화합물도 분해하여 자신의 에너지원으로 이용할 수 있는 능력을 가지기도 한다. 뿐만 아니라 미생물은 강물, 바닷물, 저니토(底泥土), 동물의 소화기관내에도 왕성하게 번식하고 있어 농약의 대사, 분해에 크게 영향을 미치고 있다. 대사산물은 모화합물보다 양적으로 적으며 생물에 대한 활성도 매우 약화되든가 불안정하여 환경 중에서 쉽게 소실되는 것이 일반적이다. 그러나 농약의 대사 생성물이 독성이나 잔류성이 원래 화합물과 비슷하거나 오히려 증대되는 경우에는 원래 사용한 농약과 마찬가지로 그 대사산물에 대한 독성이나 잔류성에 대하여 추가적으로 고려해야 한다.

1. 농약의 환경 중 동태

가. 토양 중 동태

분무기나 살분기를 통하여 작물, 잡초에 살포된 농약은 미세한 입자로 대기 중에 분출되어 농작물에 부착되게 되는데 이 때 작물체에 부착되는 비율은 농작물의 형태적 특성 및 농약의 제제형태나 살포방법에 따라서 상이하다. 일반적으로, 유지는 살포양의

50%, 분체는 30% 이하가 작물체에 부착되고 나머지는 토양에 낙하하여 혼입되는 것으로 알려져 있으며 토양 살충제, 소독제와 같이 직접 토양에 투입되는 것도 있다. 농작물에 부착된 농약이나 대기 중으로 비산된 농약도 강우 등에 의해 결국에는 토양으로 이동된다. 또한 식물에 흡수, 잔류된 농약은 퇴비, 낙엽, 짚 등의 형태로, 동물체내에 흡수, 농축된 농약도 그 배설물이나 사체로서 토양내로 이동되므로 토양은 농작물 재배기간 중 처리한 농약의 종말 처리장 역할을 한다.

토양 표면에 낙하한 농약은 다시 대기 중으로 증발하거나 바람에 날려 이동되며 식물에 의해 흡수되고, 빗물 등에 의하여 토양 유실과 함께 유출되어 직접 지표수로 이동되거나 토양수에 용출되어 토양 하층으로 이동, 지하수에 도달하게 된다.

나. 수계 중 동태

농약의 하천, 호수, 바다 등 지표수와 지하수계로의 유입은 농약 살포시 직접 투하되는 경우와 토양 중 농약의 용출이나 토양 유실에 수반되는 유출에 의한 이동 등에 의해 일어난다.

특히 우리나라와 같이 전체 농약 사용량의 반 이상이 비농사용으로 사용되는 경우에는 논물에 투하된 농약이 지표수와 직결되므로 수계로 농약의 유입은 주목하여야 한다. 수계 중의 농약은 저니토(底泥土, sediment)에 흡착되고 수생생물에 흡수, 농축되기도 하며, 수면에서 증발되어 대기 중으로 이동될 뿐 아니라 지하수에 유입된 농약은 음용수를 통하여 사람을 비롯한 모든 생물체로 이동한다.

다. 대기 중 동태

살포된 농약 중 농작물에 부착되지 않은 농약의 입자는 토양에 직접 낙하하든가 아니면 대기 중에 비산되어 부유(浮遊), 이동되며 농작물, 토양, 수계에 존재하는 농약도 증발하여 대기 중으로 이동되기도 한다. 토양으로부터 증발은 작물 표면에서의 증발과 함께 대기 중으로 손실되는 농약량의 상당부분을 차지

한다. 토양 중 농약의 증발은 대부분이 토양수분의 증발과 함께 공증류(共蒸溜, co-distillation) 상태로 증발한다.

대기 중의 농약은 가스 상태 이외에 부유분진에 부착 또는 흡착되어 고체 상태로서도 존재하는데 그 농도는 매우 낮다. 더욱이 대기는 쉬지 않고 이동하므로 대기 중의 농약은 신속하게 그리고 크게 희석되는 한편 상당히 먼 거리까지 이동하는 특성이 있다. 그러나 온실이나 시설 재배지 같이 밀폐된 곳에서 농약을 살포할 때에는 공간내의 농약이 고농도로 분포될 가능성이 있으므로 주의하여야 한다. 이와 같이 대기 중의 농약은 표류 이동되다가 결국에는 토양 표면에 낙하하게 되는데 입자의 낙하속도는 입자의 반지름의 제곱에 비례하므로 입자가 클수록 빨리 낙하한다. 하지만 입자가 극히 미세하면 낙하하지 않고 대기 중에 계속하여 부유하다가 강우 시 빗물에 씻겨 낙하한다.

2. 토양 중 농약의 잔류

토양 중 농약의 잔류는 농약의 종류 및 토양의 특성을 포함하여 다음과 같은 요인에 의해서 주로 영향을 받으며 이들 각 요인이 개별적으로 관여하는 것이 아니고 상호 관련되어 복합적으로 토양 잔류성에 영향을 미친다. 우리나라에서는 토양 중 농약의 반감기가 180일 이상인 농약으로서, 사용한 결과 농약을 사용한 토양(농경지)에 그 농약이 잔류하여 후작물에 영향을 주는 농약을 '토양잔류성농약'으로 규제를 하고 있다. 현재 우리나라에서 유통되는 농약의 95% 이상이 토양반감기 100일 미만이다.

가. 농약의 특성에 따른 토양 잔류

농약의 물리화학적 특성이나 분자량에 의해서 결정되는 휘발성, 용해성 등은 그 농약의 휘발 및 용탈의 관계가 있을 뿐만 아니라 분해성과도 관계가 있다. 예를 들어 증기압이 높고 수용성이 큰 농약은 대체로 잔류성이 낮고, 난용성이 높고 화합물은 지용성이 커서 토양 입자에 강력하게 흡착되면 미생물에 의한 분해

가 어렵게 된다. 토양 중 농약의 분해는 주로 미생물에 의해 일어나므로 농약의 화학적 안정성은 토양 중 농약의 잔류성과 관계가 깊지만 미생물에 대한 안정성은 반드시 일치하지는 않는다.

나. 농약의 처리방법에 따른 토양 잔류

농약은 입제, 분제, 유제, 수화제 등 여러 가지 형태로 사용되기 때문에 토양 중 농약의 잔류는 이들 제형의 종류에 따라 크게 다르다. 유제나 수화제 같이 액상(液狀)으로 살포하면 분제나 입제와 같이 고상(固狀)으로 처리하는 것보다 토양 입자에 신속하게 도달하여 흡착되게 된다. 이와 같이 농약이 흡착된 토양 입자는 큰 덩어리로 존재하므로 확산에 의한 소실, 미생물 및 광에 의한 분해가 억제된다. 한편 동일한 토양의 경우에도 농약의 처리방법에 따라서 농약의 분해, 소실 정도가 상이하므로 토양 중 잔류기간의 차이를 보이는데 이러한 경우에 처리한 농약의 휘발성이 클수록 현저한 차이를 보여 일반적으로 토양 혼화처리, 토양표면처리, 수면처리의 순으로 잔류된다.

다. 토양조건에 따른 농약의 토양 잔류

농약의 분해속도는 동일한 조건 하에서 시험하더라도 토양의 조건에 따라서 큰 차이를 보인다. 이와 같은 현상은 토양 중 유기물 함량, 중금속 원소의 종류 및 함량, 토양 점토광물의 종류 및 함량, 양이온치환용량, 토양 산도(pH) 등에 의해서 농약의 분해정도가 상이하기 때문이다. 농약 분해에 가장 큰 영향을 미치는 것은 토양 유기물 함량인데, 일반적으로 유기물 함량이 많은 토양에서는 농약을 분해할 수 있는 미생물의 종류가 많을 뿐만 아니라 그 활성이 높아 농약의 분해는 촉진된다. 그러나 부식은 많은 양의 농약을 흡착하는 특성이 있어 오히려 분해가 늦어지는 경우도 있다.

토양의 pH가 높을수록 농약의 분해가 촉진되는 것으로 알려져 있으나 농약의 이화학적 특성에 따라 농

약의 분해에 적합한 pH의 값이 상이하고, 농약의 분해에 관여하는 미생물의 최적 활동 pH와도 관계가 있다.

토성 또는 점토 함량은 일반적으로 농약의 분해 그 자체에는 직접적으로 큰 영향을 주지 않으나 점토 함량이 낮은 사질토양에서는 용탈이 쉬워 포장에서 신속하게 유실되므로 농약 잔류량은 낮아진다. 점토광물의 종류는 농약의 분해에 직접 영향을 주지 않으나 montmorillonite와 같은 2:1 격자형 점토광물, allopane과 같은 화산회 토양은 양이온치환용량이 높으므로 극성이 높은 약제는 흡착되기 쉬워 미생물의 공격이 어려워지고 잔류기간이 길어지는 경우가 있다. 토양 수분은 극단적인 건조 또는 습윤 상태를 제외하는 농약의 잔류성에 크게 영향을 주지 않는다.

라. 기상조건에 따른 농약의 토양 잔류

기온은 지온(地溫)과 밀접한 관계가 있어서 토양 중 농약의 분해의 주역인 미생물의 활성에 영향을 주어 농약 잔류성에 간접적인 영향을 미친다. 또한 기온이 높아지면 토양 표면으로부터 수분의 증발이 많아지므로 이때 농약도 공증류(共蒸溜)에 의하여 휘산(揮散)되므로 토양 중 농약 잔류량을 저하시키는 원인이 된다.

일조(日照)도 기온과 마찬가지로 지온과 관계가 깊으나 일조와 농약 잔류성과의 관계는 지온상승에 의한 간접적인 영향보다 지표면 또는 물의 표면에서의 광분해에 의한 영향이 더 크다.

강우(降雨)는 토양 중 농약 잔류성에 직접, 간접으로 영향을 미치는 매우 중요한 요인 중의 하나이다. 토양 표면의 농약을 토양과 함께 수계 등으로 유출시켜 농약의 토양 잔류를 저하시키기도 하고, 한편으로는 잔류농약을 토양 내부로 침투시켜 고아분해 및 휘산을 방지함으로써 토양 중 농약의 잔류기간을 증대시키는 원인이 되기도 한다. 또한 강우는 토양수분의 공급에 의한 미생물의 활동을 조장시키므로 농약의

분해를 촉진시키며 또한 용탈되기 쉬운 농약을 심층까지 용탈시켜 유실이 조장되므로 토양 내 농약의 잔류량을 감소시킨다.

바람은 직접적으로 토양, 특히 표토를 다른 곳으로 이동시킬 뿐만 아니라 토양수분의 증발을 조장시키는 역할을 하므로 토양 중 잔류농약의 손실을 가속화시킨다.

마. 농작물 재배방법에 따른 토양 잔류

작물의 종류, 생육상태, 잡초의 유무, 농약 살포 전후의 기경(起耕)상태, 시비 및 유기물시용, 관개(灌溉) 등에 따라서 사용한 농약의 토양 잔류성이 영향을 받는다. 또한 농작물의 재배방법은 토양조건과 밀접한 관계가 있으므로 토양의 이화학적이 특성에 따라 잔류성이 결정된다.

3. 환경행적 평가

농약이 살포되는 농경지에 대해서는 농업의 지속가능성을 보장하고, 주변 환경으로 이동에 의한 토양, 수계 및 대기 오염의 방지를 목적으로 농약의 등록단계와 사용단계에서 환경행적 평가를 실시하고 있다.

가. 농약성분별 평가

토양행적 평가에서는 농약의 토양 호기대사, 토양 혐기대사, 토양 광분해, 국내 토양잔류(실내, 논/밭) 시험성적을 검토하여 농약의 분해경로, 주요 분해대사물질과 분해속도(반감기 등)를 결정하고, 토양 흡착/탈착, 토주용탈 시험성적을 검토하여 농약성분과 주요 생성물질의 이동성을 파악하고 흡착계수를 결정하고 있다.

수중행적 평가에서는 농약의 가수분해, 수중광분해, 물-저니토 분해 시험성적을 검토하여 농약의 물에서의 분해경로, 주요 분해성생물질과 분해속도(물 중 반감기 등)를 결정하고, 수질오탁성, Microcosm study 등 수생태계 분해 시험성적과 국내 수중잔류 시험성적에 의하여 물 환경에서의 종합적 분해 및 분

포 양상을 파악하고 있다.

행적평가 과정에서 결정된 농약의 토양과 수중 분해 및 이동특성, 환경, 기상, 영농 시나리오를 예측모델에 입력하여 지표수와 지하수에 대한 예상농도를 산출하여 환경생물과 음용수 영향 평가를 실시하고 있다. 음용수에 대해서는 ADI에 근거하여 산출한 잠정 음용수를 잔류기준과 물 중 예상농도를 비교하여 안정성을 확인하고, 환경생물에 대한 독성 수치와 비교하여 평가하고 있다.

나. 국내시험성적에 의한 농약제품별 평가

국내 토양 2종으로 논밭을 구분하여 실내와 포장에서의 시험한 토양잔류성적을 검토하고 있으며 포장에서의 토양반감기가 180일을 초과하는 농약은 등록을 보류(토양잔류성 농약이라 함)하거나 토양축적성, 후작물 및 환경생태계에 대한 안정성 자료를 심층적으로 검토하여 안정성이 확보될 경우에만 등록을 허락하고 있다. 국내 토양을 사용하여 시험한 토양 반감기가 30일 이하인 농약성분은 전체의 72%이고 반감기가 100일을 초과하는 경우는 1%를 넘지 않으므로 대개의 경우 사용방법대로 농약을 적절하게 사용하면 농약에 의한 토양잔류문제는 염려할 필요가 없다. 예로서 반감기 100일인 농약은 사용 후 100일이 지나면 처음 농도의 1/2로 줄어들고 200일이 경과하면 다시 1/2의 절반으로 줄어들어 1/4 수준이 되므로 1년이 경과하면 1/10 수준으로 줄어들게 된다. 물론 이것은 실험에 의한 성적이므로 재배방법, 기후, 토양 등 여러 요인에 의하여 차이가 날 수는 있다.

그리고 수계오염가능성이 높은 벼 재배용 농약과 어독성이 강한 농약에 대해서는 잉어에 대한 어독성과 물 중 예상농도를 비교하고 필요시에는 시험성적으로 평가하여 물 중 반감기가 7일 이하이거나 농약 살포 후 7일차 농도가 잉어의 어독성보다 낮은 경우만 등록을 허락하고 있다. ㉔