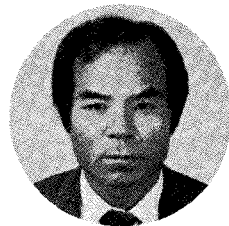


토양환경을 어떻게 보호할 것인가



토양에 처리된
농약의 행적과
환경에 미치는 영향 및
잔류 농약의 경감 대책을
알아본다.



농약연구소 농업연구관
농학박사 이 해 근

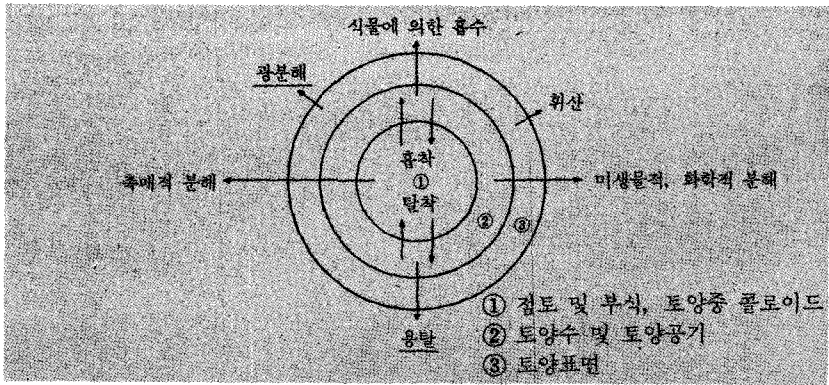
토양중 농약의 행적

토양표면에 낙하한 농약은 대기중으로 휘산하기도 하며 빗물등에 의해서 아래로 이동한다.

토양중 농약은 투여 당시 상태로 그대로 존재하지 않고 <그림 1>에서 보는 바와 같이 여러가지 경로를 통해 분해, 소실되어 중국에는 물이나 탄산가스와 같은, 우리 인간이나 자

연생태계에 전혀 영향이 없는 무해한 물질로 변해 버린다. 또한 토양중의 점토광물이나 부식등의 유기물은 농약을 강하게 흡착하여 증발이나 지하수로의 이동을 억제하고 식물체에 의한 흡수량도 감소시킨다.

토양에 투입된 농약의 주요 행적은 다음과 같다.



〈그림 1〉 토양중 농약의 행적

가. 휘 산

농약이 일단 토양에 투입되면 맨 먼저 야기되는 과정이 휘산이다. 농약성분의 휘산은 농약 그 자체의 증기압에 크게 좌우되며 토양 수분함량, 토양 온도 등에 의해서도 영향을 받는데, 증기압이 높고 토양 수분함량과 토양 온도가 높을수록 농약의 휘산량은 많아진다.

토양으로부터 농약의 휘산은 작물표면으로부터 수분이 증발하는 것과 같은 공증류(共蒸溜)의 형태로 증발하는 것으로 알려져 있다.

나. 광분해

많은 양은 아니지만 살포된 농약의 일부는 태양광선의 자외선에 의해서 분해·소실되는데, 이러한 광화학적 반응에는 탈할로젠화(dehalogen-

ation), 유황산화, 이성질화(isomerization) 등이 있다.

다. 흡 착

살포된 농약의 토양흡착 정도는 부식등의 유기물함량, 점토함량 및 토양의 이화학적 특성에 따라 상이한데, 토양수분이 많을수록 토양미생물 특히 혐기성 미생물의 활동이 왕성한 반면 흡착력은 오히려 그 반대로 감소하고, 토양수분이 적으면 미생물의 활동이 감소되어 흡착정도는 증대된다.

라. 용 탈

토양중의 농약성분은 토양 깊숙히 침투되지 않고 <표 1>에서 보는 바와 같이 그 대부분은 처리층인 표토 즉, 표면으로부터 10cm 정도에 존재하고, 많아도 30cm 정도 깊이 까지는 거의

〈표 1〉 토양중 phorate와 그 대사산물들의 수직 이동성 (1983, 李.)

토양깊이(cm)	토 양 중 잔 류 량 (ppm)					
	P=S, S	P=O, S	P=S, SO	P=S, SO ₂	계	비율(%)
0~10	0.41	불검출	5.12	5.27	10.80	85
10~20	0.02	"	0.74	0.91	1.67	13
20~30	불검출	"	0.07	0.18	0.25	2
소 계	0.43	불검출	5.93	6.36	12.72	100

*처리후 90일, 10a당 주성분으로 4kg 처리

P=S, S : phorate, P=O, S : phoratoxon

P=S, SO : phorate sulfoxide, P=S, SO₂ : phorate sulfone

이동하지 않는다. 토양중 농약의 이동성은 농약의 종류와 토양조건에 따라 상이하나 보통은 물에 대한 용해도가 높을수록 하부로의 이동은 더욱 촉진되는 경향이이다.

마. 식물에 의한 흡수

토양중 농약의 일부는 식물의 뿌리에 의해 흡수되어 줄기나 잎으로 나아가서 수확물에까지 이동된다. 농약이 흡수, 이행되는 정도는 농약의 종류, 식물의 종류와 생육시기 등에 따라 다르고 토양의 이화학적 성질에도 영향을 받는다. 지방질을 함유하고 있는 평지, 겨자, 당근같은 식물은 토양으로부터 DDT 등 잔류성이 매우 큰 유기염소계 농약까지 흡수한다고 알려져 있다.

농약의 식물에 의한 흡수는 주로 침투성 농약에 의해서 야기되며, 옥수수나 알팔파등 작물에 재배되는 토

양에서보다 휴한지에서 잔류량이 높게 검출되는 것은 그 좋은 예이다.

또한 농약의 식물체내 흡수율은 환경요인과도 밀접한 관계가 있는데 유기인계 농약의 흡수는 암조건보다 광조건하에서 보다 신속하게 야기되며, 식물체의 큐티클층이 습윤한 상태에서는 더욱 현저하게 촉진된다고 한다. 토양으로부터 농약의 흡수는 토양의 수분함량과도 밀접한 관계가 있는데, 작물의 위조점이나 담수조건보다는 포장용수량 상태에서 현저하게 증가하고 토양의 무기, 유기성분과도 관계가 있다.

바. 생물학적 분해

토양중 농약의 분해에서 가장 중요한 것은 토양미생물의 역할이다. 토양에는 대단히 많은 종류의 미생물이 존재하는데 이들이 분비하는 여러가지 효소에 의해서 농약은 대사,

분해된다. 예컨대 토양중 잔류성이 매우 큰 것으로 알려진 DDT, BHC 등의 유기염소계 농약도 *Aerobacter* 등의 토양미생물에 의해서 분해되며 Hephachlor도 곰팡이와 세균 또는 방선균에 의해서 분해된다. 또한 diazinon, parathion 등 유기인계 농약과 carbaryl, carbofuran 등 카바메이트계 농약은 주로 혐기성 미생물에 의해 쉽게 분해되는 것으로 알려져 있다.

토양미생물에 의한 생물학적 분해 기구로는 탈알킬화(dealkylation), 탈할로겐화, 가수분해, 산화, 환원 등이 있다.

사. 화학적 분해

대부분의 농약은 pH가 높을수록 쉽게 가수분해 되는데 예로써 parathion은 가수분해로 인해 p-nitro phenol을 생성하면서 무독화되고 수분이 많을 때는 분자구조 중의 nitro기가 환원되어 amino parathion을 생성하면서 무독화 된다. 또한 carbofuran은 수산화되어 3-hydroxy carbofuran을, 산화에 의해 3-Keto carbofuran을, 가수분해되어 carbofuran phenol을 생성하면서 점차 생리활성이 낮은 물질로 변하여 중극에는 무독화 된다.

한편 atrazine제초제는 강산성일때 쉽게 분해되는 것으로 알려져 있다.

화학적 분해기구로는 가수분해, 산화, 환원, 수산화, 탈염소화 등이 있다.

토양환경에 미치는 영향

농약은 강력한 생리활성 물질이기 때문에 여러가지 생물상에 대하여 정도의 차이는 있으나 영향을 미치며 토양의 화학성에도 영향을 준다.

가. 토양미생물에 대한 영향

(1) 토양미생물상의 변화

농약을 표준량으로 살포하면 토양 미생물상에 큰 변화는 없는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 살포초기에는 토양미생물의 수가 다소 감소하나 어느 정도 시일이 경과하면 원상태로 회복된다고 한다. 예로서 벼 농사에 많이 사용되고 있는 입제농약(IBP, carbofuran, butachlor)의 경우를 보면 사상균은 거의 영향이 없었으며, 세균과 방선균의 생육은 초기에는 변화가 없거나 다소 억제되었으나 60일 이후에는 오히려 증가하는 경향이였다('80, 농업기술연구소).

(2) 무기영양 세균에 대한 영향

벼농사용 농약 처리로 초산환원균이나 탈질균의 활성에는 큰 변화가 없었으나 암모니아 산화세균과 아조산 산화세균에는 다소 영향을 주는

것으로 알려지고 있다.

(3) 질소 고정균에 대한 영향

Parathion은 *Azotobacter* sp. 의 생육에 영향이 없었으며 Dimethoate는 *centrosema*의 뿌리혹 생성을 다소 감소시켰다. 또한 논토양에 Chlorpyrifos(그로포) 처리시 초기 3주 동안에는 호기성 비공생(非共生) 질소 고정균의 수에 변화가 없었으나 9주 후에는 다소 감소한다고 하였다.

(4) 미생물의 호흡에 미치는 영향

어떤 살충제는 토양미생물의 호흡에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데 diazinon과 carbofuran은 농도와 비례해서 토양미생물의 호흡으로 인한 산소소비가 증가하고, 선택 독성을 가진 어떤 살충제는 미생물의 탄산가스 생산을 저해한다고 한다.

(5) 기 타

가) 유허산화

어떤 농약은 유허산화에 영향을 끼치는데 예로서 Chlorpyrifos는 담수 후 3개월까지는 황산염 환원균의 수를 크게 증가시키지만 carbofuran, diazinon, Etoprofos(에토프)는 사양토에서 유허산화에 영향이 없었다.

나) 무기인의 수용화

Carbofuran은 수용성 PO_4 의 변화에 영향이 없었으나 Chlorpyrifos는 호기성 인(燐)용해 미생물의 수를 약간 감소시켰으며 담수 점질토

에서는 혐기성 인용해 미생물의 수를 오히려 증가시켰다.

다) 셀룰로스의 분해와 철침전

Chlorpyrifos는 논토양에서 셀룰로스(cellulose)분해와 철침전 미생물의 수를 다소 증가시켰다.

라) Aflatoxin의 생성저해

DDVP는 곡류(밀, 옥수수, 쌀)에서 *A. flavus*와 *Fusarium roseum*에 의해 강력한 발암물질로 알려진 Aflatoxin의 생성을 저해시켰으며 또한 chlorpyrifos는 합성배지 중에서 토양사상균의 일종인 *A. parasiticus*에 의한 Aflatoxin 생성을 저해하였다.

마) 미생물 효소 활성

Endosulfan (지오릭스)은 *Bacillus subtilis*, *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens* 등의 NADH(환원된 Nicotinamide Adenine Dinucleotide) 산화효소 활성을 30~90%까지 저해하였다는 보고도 있다.

바) 미생물의 영양이용

어떤 토양미생물은 농약을 분해하여 영양원이나 에너지원으로 이용하기도 하는데, 세균의 일종인 cocoidal rod는 diazinon을 분해하여 분자구조 중의 질소를 영양원으로 이용하는데 그 선호성은 유허>인>탄소>질소원의 순서이었다.

나. 토양의 균소동물에 대한 영향

토양에서의 균소동물은 식물체의 유기, 무기성분 분해에 관여하며 토양구조개선에도 일익을 담당하고 있다. 따라서 토양에 서식하는 미세동물의 양과 질에 변화를 일으켜 중국에는 토양의 비옥도 면에도 변화를 가져오기도 한다.

〈표 2〉는 토양중 농약이 지렁이류(earthworms)에 미치는 영향을 나타낸 것인데, diazinon과 dalapon은 아무런 영향을 주지 않았으나 그외

농약은 토양내 지렁이의 수를 다소 감소시켰다.

또한 농약은 토양서식 미세동물에도 영향을 주는데, 농약에 의해 교란된 토양생물상이 무처리 수준으로 원상회복되는데는 상당한 기간이 소요됨을 볼 수 있다(표3 참조).

다. 토양의 화학성 변화

농약을 표준량으로 처리했을때 토양중 pH와 산화환원전위(Eh)에는 변화가 거의 없었으며 치환성 석회, 고토, 칼리 함량에도 변화가 거의 없

〈표 2〉 농약이 지렁이류에 미치는 영향

살충제	처리약량 (kg/ha)	반응*	제초제	처리약량 (kg/ha)	반응*
Carbaryl	2, 2	-	Atrazine	9, 0	-
Carbofuran	2, 2	-	Dalapon	21, 4	0
Diazinon	4, 5	0	Monuron	11, 2	-
Disulfoton	9, 0	-	DNOC	4, 0	-
Malathion	0, 2	-			

*0: 무영향, -: 數的 감소

〈표 3〉 농약에 의해 교란된 토양생물상이 무처리 수준으로 회복되는데 요하는 시간

('67~'69, Edwards등)

농약	토양생물	회복기간
D-D 혼중제	톡톡이목류	2년 이상
D D T	포식성 응애류	4년 "
Aldrin	총 생체중	6년
Simazine	톡톡이목류	5개월

었다.

농업기술연구소의 보고('80)를 보면 IBP, carbofuran 및 butachlor는 암모니아화작용($\text{NH}_4\text{-N}$ 의 생성)에는 변화가 없었으나 diazinon은 peptone의 첨가로 증가하였다. 또한 질산화작용에 대해서는 대부분의 살충제가 정도의 차이는 있으나 토양 미생물의 질산화작용을 억제하는데, 이는 토양 및 농약의 종류, 사용량 등에 따라 상이하다.

EDB나 D-D같은 토양훈증제는 토양미생물의 질산화작용을 억제한다는 보고도 있다.

탈질작용을 일으키는 미생물의 활성은 살충제 처리로 억제된다고 한다.

탈질화작용 저해제로서 diazinon을 논에 처리시 첨가된 질산염의 탈질화작용 억제로 벼의 질소흡수량을 증대시키고 나아가서 벼생육을 조정하여 수량을 증대시켰다는 보고도 있다.

농약이 토양에 투입되면 어떤 종류의 생물에 어느정도 또한 얼마의 기간동안 영향을 미치게 되며 작물재배상 또는 환경보존상 불리한지 어떤지는 현재로서는 설명하기 어렵다. 그러므로 앞으로는 이에 대한 연구가 더욱 많이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

토양중 잔류농약의 경감대책

농약의 안전성과 관련한 환경중에서의 동태파악은 사용농약의 최종잔류물과 그 행방을 추적하는 과정으로 요약될 수 있으나 환경내에 도입된 화학물질의 인위적인 제거방법의 모색은 농약에 의한 부(負)의 효과를 극소화 시킨다는 의미에서 매우 중요하게 여기고 있다.

가. 잔류성이 적은 농약선택

토양내에서의 잔류성이 적을수록 연용에 의한 토양집적농도가 낮아질 수 있으므로 가급적 잔류성이 적은 농약을 선택하여 사용토록 한다.

나. 농약흡수 식물재배

토양중 잔류농약의 생물학적인 제거방법은 토지 활용성의 증대와 더

〈표 4〉 작물재배로 인한 토양중 atrazine 농도 감소

작 물	잔 류 량(ppm)		
	처 리 농 도(ppm)		
	1	2	4
무 재 배	0.28	0.47	1.04
옥 수 수	0.03	0.09	0.17
Johnson grass	0.03	0.06	0.16
수 수	0.17	0.15	0.31

('66 Sikka 등)

불어 잔류농약의 경감축진이라는 측면에서 볼때 매우 중요하다. 당근같이 흡수력이 강한 식물을 재배하면 DDT나 BHC같은 농약성분도 흡수하는 것으로 알려져 있다.

또한 옥수수는 simazine과 atrazine을 흡수하여 비활성물질로 변환시키는데, 옥수수, 수수 및 Johnson grass의 토양중 atrazine 제거율은 <표 4>에서와 같이 모두가 잔류분제거에 효과가 있었고, 처리량의 25% 이상이 흡수에 의해 토양으로부터 이탈되었다. 이와같이 농약성분을 잘 흡수할 수 있는 식물을 재배함으로써 토양중의 잔류농약을 감소시킬 수 있다.

다. 유기물 첨가

토양에 유기물을 사용한다는 것은 토양의 흡착력을 증가시키고 아울러 토양미생물의 활성을 증대시켜 토양중 잔류농약의 분해를 촉진시킨다. <표 5>에서 보는 바와 같이 토양에 벧짚을 첨가함으로써 토양중 농약의 분해가 촉진되었는데, 이러한 효과는

실균토양에서는 볼 수 없는 것으로 보아, 유기물 그 자체에 의해서 농약이 분해되는 것이 아니고 유기물에 의한 농약분해 미생물의 활성증대에 그 원인이 있음을 입증하고 있다.

라. 활성탄등 흡착제의 첨가

활성탄은 용적에 대한 표면적이 넓기 때문에 음료수, 공기, 제당, 담배 등의 흡착제로서 용도가 다양하다. 활성탄등 흡착제의 개발은 농약사용후 작물재배시기의 단축, 농작물에 의한 농약의 영향 경감, 불합리한 농약사용으로 인한 잔류분의 제거등 현대 농업에 있어 실용가능한 연구분야라 할 수 있다.

마. 토양반응조절

농약의 토양잔류성은 토양의 pH에 따라 상이하다. 일반적으로 토양 pH가 높을수록 즉, 알칼리성일수록 농약분해는 신속하게 야기된다고 언급한 바 있다. <표 6>은 토양중 PCNB의 분해에 미치는 석회시용의 효

<표 5> 유기물 첨가에 따른 토양중 농약의 잔류성

('79~'81, 농기연)

구 분	토 양 중 농 약 의 반 감 기 (일)		
	Diazinon	Butachlor	Nitrofen
대 조	13.1	35.7	31.2
벧 짚	10.5	28.5	26.2

〈표 6〉 석회시용에 따른 토양중 PCNB의 분해

(’83, 농약연구소)

처 리 수 준	토양중PCNB의반감기(일)
석회 무처리	47
석회 중화량 처리	33
석회중화배양처리	30

과를 본 것인데, 석회처리로 토양중 PCNB의 반감기가 석회무처리에 비해 15일 정도 단축되었음을 알 수 있다.

바. 토양미생물 이용

토양에서 농약의 분해에는 토양미생물이 가장 주요한 인자로 작용하므로 농약분해력이 우수한 미생물을 선발하고 강화배양등을 통하여 특정 농약을 선택적으로 분해할 수 있는 미생물의 선발, 육성은 유전공학기법의 도입과 함께 활용가능성이 매우 높을 것으로 생각된다.

〈표 7〉은 농약연구소에서 수행한 시험결과인데, 토양중 PCNB와 En-

dosulfan의 분해력이 우수한 토양미생물(fungi)을 선발, 강화배양을 통해 농약분해력이 크게 증대되었음을 보여주고 있다. 즉 공시한 3균주들의 농약분해력은 PCNB의 경우는 대조에 비해 43~61%, Endosulfan은 25~35% 증대되었음을 알 수 있다.

사. 속분해성 농약 및 미생물 농약개발 등

소기의 목적을 달성한 후에는 환경중에서 신속히 분해되는 농약을 개발한다든가, 생리활성이 매우 높아 소량의 약량으로도 충분한 약효를 기대할 수 있는 농약의 개발이 요구되고 있다. 현재는 이러한 농약의 개발에 주력하고 있는 것이 세계적인 추세이다. 또한 이용율을 증대시키기 위한 제제기술의 개선, 작용점에서의 유효성분의 침투와 전이를 증진시키는 데 가장 적합한 농약부제(副劑)의 선발과 제제방법 등에 대한 연구로

〈표 7〉 강화배양균주(fungi)의 농약분해력 (처리 30일 후)

(’83, 농약연구소)

PCNB		Endosulfan	
균 주	분해력(%)	균 주	분해력(%)
대 조	18	대 조	14
PF-16	61	EF-20	39
PF-21	79	EF-23	42
PF-25	65	EF-24	49

농약사용량을 줄일 수 있다.

토양환경에 영향이 적은 미생물농약 및 천연산물을 이용한 농약을 개발, 보급하는 것도 토양환경을 보호할 수 있는 수단이 될 것이다.

아. 재배방법 개선 등

작부체계 개선, 물관리, 피복, 담수(澆水), 시비관리 등을 통해 병·해충 및 잡초의 발생량을 감소시킬 수 있으며, 따라서 농약사용량도 줄

일 수 있다.

적기 적량 살포등 농약의 적절한 처리방법이나 휘산에 의한 손실을 극소화함으로써 농약사용량을 감소시킬 수 있을 것이다. 또한 관개를 하거나 작물을 재배하지 않는 휴한기간중 깊게 경운을 한다면 심경의 효과는 물론, 나아가서 잔류농약이 많은 량의 토양과 혼합됨으로써 토양 혼합희석 효과를 얻을 수 있다.

이
리

지난 호(1988. 3월호)에 게재한 "토양중 농약잔류㉑"를 ㉒으로 바로 잡습니다.