

② 작용기작과 경제성



이 글은 일본關西대학 松中昭一 박사의 논문을 번역한 것으로 지난호에 계속됩니다.

작용기작(作用機作)

제초제의 작용기작을 이해하는 것은 다음과 같은 실용적인 자료를 얻기 위해 중요하다.

- ① 효과적인 사용방법의 개발
- ② 작용점(作用點)을 선발수단으로 이용한 새로운 제초제 개발
- ③ 동물에 대한 독성정도의 추정 및 환경에 미치는 영향의 예상.

작물에 대한 제초제의 안전사용이라는 관점에서 보면 작물과 잡

초의 선택성이 매우 중요하지만 오늘날에는 인간과 잡초의 선택적 독성 또한 중요하다. 여기에서는 일본에서 개발된 제초제들의 작용기작의 변화에 대해 동물에 대한 독성의 관점에서 설명하고자 한다. 일반적으로 최신 농약의 개발은 낮은 독성, 적은 약량, 고도의 선택성, 낮은 생산비, 그리고 적당한 잔류효과에 초점을 맞추고 이루어져 왔다.

대체로 농약의 작용은 급성독성에 의해 발현되는데 이 독성은 작

용기작과 직접적인 관련을 가지고 있다.

1. 페녹시(phenoxy)계 제초제

2차 세계대전중에 발견된 2,4-D는 화본과 작물과 광엽잡초사이의 선택성으로 근대 제초제시대의 효시가 되었다. 이들 페녹시계 제초제의 작용기작에 대한 연구는 오랫동안 이루어져 왔지만 생화학적인 면에서 아직도 결론을 내리지 못하고 있다.

페녹시계 제초제는 식물고유의 홀몬작용으로 제초효과를 나타내며 동물에 대한 독성이 낮은 것으로 생각되지만 실제로는 2,4-D의 LD₅₀(쥐의 경구 급성 독성)이 375mg/체중kg으로 비교적 독성이 높은 편이다.

2. 어독성이 강한 PCP

이미 설명한 바와 같이 PCP는 벼농사에서 피를 방지하는데 효과가 있어서 입제 제형의 개발과 함께 1964년에는 PCP의 사용면적이 100만 ha이상에 달하였다. 그러나 많은 비가 내린 뒤에는 대단히 심한 어독성이 나타났으며 1970년대 초에는 그 이용이 급격히 줄어들

었다. PCP는 2,4-dinitrophenol (DNP)와 마찬가지로 호흡과정의 산화 인산화반응을 심하게 저해하는데 필자의 실험결과에 위하면 PCP는 20μM의 농도에서 벼 뿌리의 호흡을 70% 정도나 촉진시킴으로써 DNP보다 10배나 강한 활성을 나타내었다. PCP에 의한 ATP 생성의 억제에는 ADP 생성을 증대시키고 이는 산소의 흡수, 즉 호흡을 증대시키게 된다.

산화 인산화작용의 억제기능 때문에 PCP, DNOC, dinoseb, io-xynil, bromoxynil, 그리고 유기주석 제초제들을 양어지역 가까이에서 사용해서는 안될 것이며 앞으로 이러한 제초제의 사용은 감소할 것이다.

3. DE(diphenyl ether) 및 유사 제초제

PCP에 의한 어독성이 큰 문제로 대두되었지만 이미 농가는 제초제의 사용을 중단할 수가 없었기 때문에 일본 농약업계는 저독성인 벼농사용 제초제의 개발을 계속하여 MCPA, dichlobenil, chlothiamid, propanil 그리고 디페닐에테르계(nitrofen 및 chlor-

nitrofen) 제초제들이 등록되었다. 그러나 제초제간의 경합에 의해 여러가지 제초제가 도태되고 현재는 chlornitrofen과 나중에 개발된 chlomethoxynil 및 bifenoxy 등의 DE계 제초제들이 벼농사의 잡초방제에 이용되고 있다.

Oxadiazon은 DE에 비해 화학구조상으로 아주 다르지만 작용기작이 비슷하다. 이 밖에도 그림1

에 나타낸 바와 같이 복잡한 화학구조를 가지고 있으면서 작용기작이 DE와 비슷한 제초제들이 많이 있다. 이 제초제들은 모두 광(光)이 있는 조건에서 식물에 대한 약해증상으로 지상부에 갈색 반점을 나타내고 동물에는 독성이 낮은 특징을 가지고 있다. 또한 몇가지 제초제는 ha당 사용약량이 성분량으로 10~100g에 지나지 않아 매

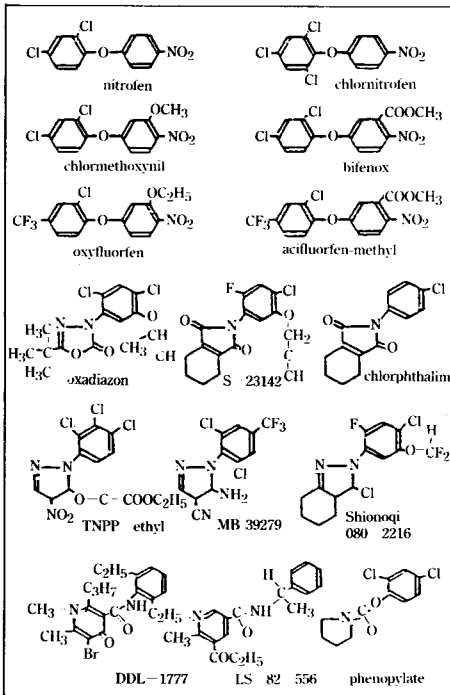


그림1. Diphenylether와 관련된 제초제

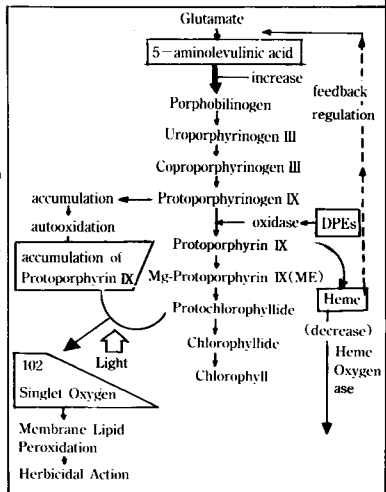
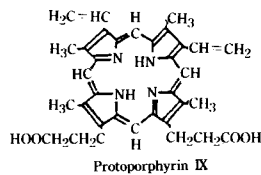


그림2. Tetrapyrrole의 생합성과정 및 (Matsunaka, 1990) Diphenylether계 제초제의 작용점

우 강력한 제초활성을 가진 것들이 있다.

20여년의 연구끝에 이제 DE계 제초제의 작용기작이 밝혀졌는데 다음과 같이 설명된다. glutamate로부터 tetrapyrroles을 거쳐 엽록소나 heme(색소성분)이 생합성되는 과정에서 DE 또는 유사한 제초제들은 protoporphyrinogen IX 산화 효소의 작용을 억제하여 protoporphyrinogen IX의 축적을 야기시킨다. 그림2에 나타낸 바와 같이 protoporphyrinogen IX가 자동산화과정을 거쳐 tetrapyrrole의 일종인 protoporphyrin IX의 상태로 축적되고 이렇게 축적된 물질은 활성산소를 발생시켜 막지질(膜脂質)의 과산화 현상을 일으켜 제초활성을 나타낸다.

광이 있는 상태에서 제초활성을 나타내는 이들 제초제의 급성독성은 표3에 나타낸 바와같이 매우 낮다. 그러나 생쥐의 미토콘드리아로부터 분리된 protoporphyrinogen 산화 효소의 작용을 억제한다는 사실이 최근에 보고된 바 있다. 우리의 실험결과에 의하면 동물체내에서도 tetrapyrrole이 약간 축적되는 사실이 관찰되었으나

광반응(光反應)이 일어날 수 없고 빨리 대사가 진행되어 이로인한 독성은 인정할 수 없었다.

4. 광합성작용의 억제

제초제가 광합성작용을 억제하는 작용점(作用點)은 두가지인데 그 하나는 광합성에 있어서 전자전달체계이고 다른 하나는 광합성 색소(色素)의 생합성(生合成)과정이다. 전자전달체계는 에너지인 ATP를 생성하고 NADPH로 환원시키는 힘을 이용하여 탄산가스를 고정시킨다.

전자전달체계에 관한 생화학연구결과 화학물질에 의한 여러가지 작용점이 있다고 알려져 있으나 실제로는 B-단백질이라 불리는 물질과 제초제 성분이 결합하는 작용점만이 유일한 작용점이다. 이 특수 단백질은 photosystem II의 특정위치에 있으며 353개의 아미노산으로 구성되어 있다. 벼농사용 제초제 중에서는 simetryn과 prometryn이 전자전달 체계의 억제작용을 하는데 고온조건에서 simetryn에 의해 벼에 약해가 나타나는 것도 이와같은 작용기작에 의한 것으로 보인다.

표3. 주요제초제의 작용기작 및 급성독성

* mouse

작용기작 : 작용점	제초제	급성독성 (rat : mg/kg)	
산화 인산화 작용의 억제	PCP	210	
	DNOC	40	
	ioxynil	110	
호르몬성 생육장해	2,4-D	375	
	MCPA	700	
광의 필요 : 과산화물의 생성 : 활성산소의 생성	paraquat	150	
	diquat	231	
	chlornitrofen	10,800*	
	chlomethoxynil	33,000	
	bifenox	6,400	
	oxadiazon	1,800	
광합성 : 전자전달체계 : 백화현상 : 생합성	simetryn	750	
	simazine	5,000*	
	atrazine	3,080	
	diuron(DCMU)	3,400*	
	bromacil	5,200	
	pyrazolate	9,550	
	pyrazoxyfen	1,690	
	methoxyphenone	4,000	
	아미노산 생합성 : EPSP 합성효소 Acetolactate 합성효소 Glutamine 합성효소	glyphosate	10,000
		bialaphos	7,300
glufosinate		1,600	
chlorosulfuron		5,900	
bensulfuron-methyl		11,000	
생육억제 : Thiocarbamates : Chloroacetamides	pyrazosulfuron-ethyl	5,000	
	thiobencarb	1,900	
	molinate	700	
	butachlor	3,300	
	pretilachlor	6,099	

한편 많은 제초제들이 잎의 색소형성에 영향을 주는데 pyrazolate는 엽록소의 생합성을 직접저

해 하며 또 다른 제초제들은 carotenoid의 생합성을 저해함으로써 광에 의해 엽록소가 분해되도록

한다. thiobencarb의 탈염소화작용을 억제하는 해독제로 개발된 벼농사용 제초제인 methoxyphenone은 바로 이와같은 작용기작을 가지고 있다.

일반적으로 광합성을 저해하는 제초제들의 경우에는 동물에 광합성 기능이 없기 때문에 동물에 대한 독성이 표3에 나타난 것과 같이 매우 낮게 나타난다.

5. 아미노산 생합성의 억제

제초제에 따라서는 필수아미노산의 생합성과정이 매우 중요한 작용점이 되기도 한다. 필수아미노산은 인간체내에서는 합성될 수가 없으므로 아미노산의 합성을 저해하는 작용기작을 가진 제초제들은 동물에 대한 독성이 낮을 것으로 예상할 수 있다. glyphosate는 방향족 아미노산의 생합성에 관여하는 enolpyruvylshikimate-3-phosphate(EPSP) 생합성 효소의 기능을 저해하고 bialaphos와 glufosinate는 glutamine 합성효소의 기능을 억제함으로써 잡초에 독성이 강한 암모니아가 식물체내에 축적되도록 한다.

sulfonylurea나 imidazolinone

제초제들은 valine, isoleucine, 또는 leucine같은 아미노산의 생합성을 억제 하는데 작용점은 acetolactate 합성효소이다. chlorosulfuron을 사용한 우리의 실험 결과를 보면 0.001 ppm의 농도에서 담배세포배양을 했을 때 그 발육이 억제를 받았으나 햄스터쥐의 조직배양을 한 경우에는 100ppm의 농도에서도 부작용을 일으키지 않았다. 표3에 제시한 것처럼 이 계통에 속하는 제초제들은 동물에 대한 독성이 매우 낮으며 특히 sulfonylurea계 제초제들은 대단히 높은 생화학적 활성을 가지고 있으므로 극히 적은 약량으로 약효를 낼 뿐 아니라 이는 바로 자연환경에 투입되는 물질의 양이 그만큼 적다는 의미를 갖기도 한다.

6. 기타 제초제

thiocarbamate와 chloroacetamide계 제초제들의 두드러진 제초작용은 잡초의 위축성 기형화이다. thiocarbamate계에 속하는 제초제는 thiobencarb, molinate, esprocarb 등이 있고 chloroacetamide계에는 butachlor, pretilachlor 등이 있다. 이들은 벼농사용

제초제로서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 이러한 제초제들은 지질과 isoprenoid의 합성을 억제하며 조효소-A를 필요로 하는 다른 대사과정을 저해한다고 하나 자세한 것은 아직 밝혀지지 않았고 동물에 대한 독성도 비교적 낮은 편이다(LD₅₀; thiobencarb : 1900, butachlor : 3300mg/kg). 동물체내에서도 이들 제초제에 의해 활성산소의 생성이 서서히 진행되어 강한 급성독성을 나타내는데 이는 diphenyl ether 및 그와 관련된 제초제에 의해 생성되는 독성이 낮은 산소와 그 경우가 다르다.

화분과잡초를 선택적으로 살초하는 cyclohexanediones나 aryloxyphenoxy 프로피온산계의 제초제들은 지방산(脂肪酸)이나 flavonoid의 생합성과정에 공통으로 관여하는 carboxylase 효소의 작용을 억제한다. cyclohexanedione에 속하는 제초제로는 alloxidim, sethoxydim, clethodim 등이 있고 aryloxyphenoxy 프로피온산계에 속하는 제초제로는 dichlofop-methyl, fluazifop-butyl 또는 quizalofop-ethyl 등이 있다.

단자엽식물에 존재하는 효소들은 이들 제초제에 대해 감수성이 매우 높지만 광엽잡초에 있는 효소들은 내성(耐性)을 가지고 있다. 일반적으로 이러한 계통에 속하는 제초제들의 동물독성은 역시 낮는데 그 이유는 밝혀진 바가 없다.

앞으로는 특히 동물에 대한 독성을 고려하여 더욱 이상적인 제초제들이 개발될 것이며 그러한 새로운 제초제의 작용기작을 이해하는 일이 더욱 중요하다. 한편 제초제의 작용기작 및 선택성에 관한 기초연구는 고등식물의 정상적인 생화학분야를 발전시키는데 기여하게 될 것이다.

경 제 성

일본에 있어서 벼농사에 소요되는 ha당 노동력은 1949년에 비해 지난 40년간 1/4이하로 줄어들었는데 이와 같은 노동력절감은 주로 농작업의 기계화와 제초제의 사용으로 이루어졌다. 또한 같은 기간동안에 현저한 노동력절감과 함께 벼의 수량은 ha당 3톤에서 5톤으로 증가하였다.

먼저 얘기한 바와같이 잡초방제에 있어서 노동력의 절감은 제초제가 도입되면서 시작되었는데 잡초방제와 관련된 비용을 산출하는 방법은 다음과 같다.

- 인력제초시 소득 = $YP - LW$
 - 제초제 사용시 소득 = $Y'P - (C + SW)$
 - 인력제초에 대한 제초제 이익 = $(L - S)W - C - (Y - Y')P$
- 단, Y = 인력제초시 수량(톤/ha)
 P = 현미의 가격(US\$/톤)
 L = 인력제초노동(시간/ha)
 W = 임금(US\$/시간)
 Y' = 제초제 사용시 수량(톤/ha)
 C = 제초제의 가격(US\$/ha)
 S = 제초제 사용 노동(시간/ha)
- 현재 쓰이고 있는 제초제들은 벼의 생육에 거의 피해를 주지 않으며 수량에도 영향을 미치지 않으므로 $(Y - Y')$ 은 0이 된다. 결국 제초제 사용에 의한 이익은 $(L - S)W - C$ 가 되는데 여기에서 L 과 W 가 커지고 S 와 C 가 적으면 그 값이 커지게 되며 이것은 바로 오늘날 일본의 상황과 일치한다.
- 1988년도의 실제값을 각기 공식에 대입하여 제초제사용의 이득을

산출하면 다음과 같다.

- $L = 506$ 시간/ha(1949년도의 인력제초시간)
- $S = 32$ 시간/ha(1988년전국평균)
- $W = \text{US\$ } 6.9$ (¥960)/시간
- $C = \text{US\$ } 210$ (¥29,500)/ha

따라서 제초제 사용의 이득 = $(L - S)W - C = \text{US\$ } 3,060$ /ha. 이 금액을 일본전국으로 환산하면 211만 ha에 대해 64억 6천만 US\$(1US\$ = ¥140)에 달한다.

쌀의 생산과 가격을 유지하기 위한 정부의 세제(稅制)상 지원정책은 이제 국제농업경제상황의 변화에 따라 달라져야 할 것이다. 그러나 농촌노동력 부족은 더욱 심화될 것이고 제초제의 경제적 중요성에는 변함이 없을 것이다. 제초제는 금전적인 소득증대 효과뿐만아니라 무더운 여름에 논의 인력제초에 대한 정신적, 육체적 고통으로부터 농민들을 해방시키는데 크게 공헌하였다. 이렇게 절감된 농업노동력은 오늘날의 일본을 만들어낸 산업근대화에 활용되었으며 앞으로는 환경적으로 안전한 제초제를 개발하는데 더욱 힘을 쏟아야 할 것이다.

<번역> 이계홍/한국사이나미드 상무이사(農博)