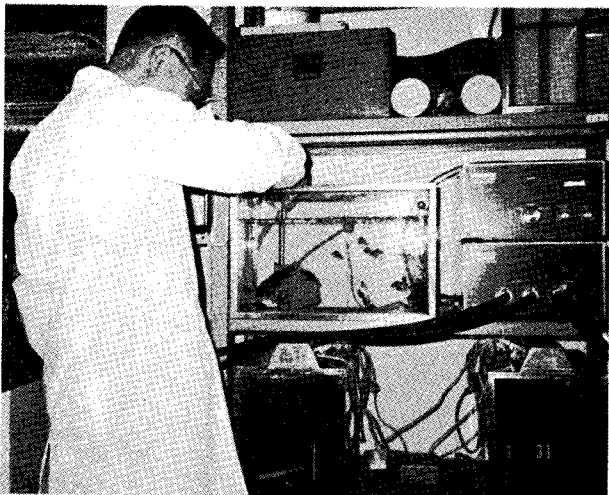


# 생물농축과 수질에 미치는 영향



이 해 근  
농약연구소 농업연구관  
(농학박사)

• 본지 제9권 제5호(1988년 9월호)에 이어 「수질중의 농약 잔류 下」편이 이번호부터 2회로 나누어 연재됩니다.

• 지난 호에는 사정으로 인해 연재가 되지 않아 독자여러분의 문의가 많았습니다. 많은 관심을 보여주시는 독자제님께 사과의 뜻을 전합니다. <편집자註>

## 1. 농약의 생물농축

어류에 대한 농약의 독성을 평가하기 위한 수단으로 생물농축계수를 이용, 농약의 안전성을 평가하는 방법이 선진 외국에서 시도되고 있다.

### 먹이연쇄 통한 농축현상을 의미

농약의 생물농축이란 식품(먹이)연쇄를 통해서 생물에 유해한 화학물질이

나 중금속이 먹이연쇄의 상부로 올라갈수록 농축되는 현상을 말한다. 예로서 수질중 PCBs나 DDT 같은 유기염소계 살충제는 <표1>에서 보는 바와 같이 프랑크톤, 수초, 습지식물→물벼룩→작은 물고기→큰 물고기→조류나 포유동물

의 먹이연쇄와 같은 순서로 농축되어서 최초에는 극미량이지만 최종적으로는 고농도로 농축되어 나타난다. 즉, 생물농축이란 이와같은 위해물질에 의한 독성발현 현상을 말한다.

<표1> 자연생태계에서 먹이연쇄에 의한 DDT의 생물농축

(단위 : ppm)

1 차	2 차	3 차	4 차
수 초 0.08	새 우 0.16	통갈치 2.07	제비 갈매기 4.80
프랑크톤 0.04	소 라 0.26	장 어 0.28	오 리 22.80
	백 합 0.42	잉 어 0.24	갈 매 기 75.5
습지식물	모 기 0.30	송사리 1.24	푸른 백로 3.5
지 상 부 0.33	색 줄 열 0.23	넙 치 1.28	물 수 리 13.8
근 부 2.80	귀뚜라미 0.23	복 어 0.17	가마 우지 26.4

('65, 미국 학술원)

일반적으로 생물농축되기 쉬운 물질들은 생물체내의 갖가지 효소에 의하여 쉽게 분해, 대사되어 무해한 물질로 변하기 어려우며, 환경중에서도 난분해성이고 물에 대한 용해도도 매우 낮다. 또한 동물의 지방조직중에 쉽게 용입되어 거기서 농축되기 쉬운 것으로 알려져 있다.

### 생물농축계수 버농사용 매우 낮아

따라서 어류는 주위 환경인 물에서 보다 고농도의 농약성분(생물 농축되기 쉬운 농약)을 함유하게 되는데, 농약간 생물농축 정도를 비교·평가하기 위해

서는 다음식과 같이 생물농축계수를 측정, 비교해야 한다.

생물농축계수(BCF)=

$$\frac{\text{어류중 화학물질의 농도}}{\text{시험환경(물)중 화학물질의 농도}}$$

<표2>는 모샘치(Topmouth gudgeon)에 의한 수중농약의 생물농축계수를 나타내고 있는데 농약별로 보면 생물농축계수는 Dieldrin>EPN>Fenitrothion>Thiobencarb>Diazinon 순으로 낮다. Dieldrin과 EPN은 생물농축계수가 매우 높고, 버농사용으로 사용되고 있는 Fenitrothion, Diazinon, Phenthoate, BPMC, IBP등 유기인계 및 카바메이

〈표2〉 수중농약의 생물농축 계수와 용해도 및 분배계수

(일본 농약정보, 81)

농 약	물에대한 용해도 (ppb. 20~25°C)	분배계수 (옥타놀 / 물)	모샘치에 의한 생물농축 계수
Diazinon	40,500	1,386	152
Fenitrothion	38,700	2,767	246
Phenthoate	11,000	781	36
Carbaryl	34,000	197	9
BPMC	89,000	1,500	26
IBP	400,000	1,630	4
Thiobencarb	30,000	2,650	170
Molinate	880,000	1,628	26
Trifluralin*	8,110	9,328	3,142
EPN*	3,113	7,027	2,346
Dieldrin*	468	20,785	4,430

\* 수도용 농약이 아님

트 농약은 매우 낮음을 알 수 있다.

### 분배계수와 正, 급성독성과 負

한편 생물농축계수는 농약의 물에 대한 용해도와, 옥타놀(octanol)과 물과의 분배계수와도 밀접한 관계가 있다. 즉, 물에 대한 용해도가 낮을수록 생물농축계수는 높고 분배계수와는 正(正)의 상관관계가 있어 분배계수가 높을수록 생물농축계수도 높은 경향이다(그림1). 또한 모샘치에 의한 생물농축계수는 잉어에 대한 급성독성과는 負(負)의 상관관계가 있는데 급성독성이 높을수록 생물농축계수는 낮아진다(그림 2).

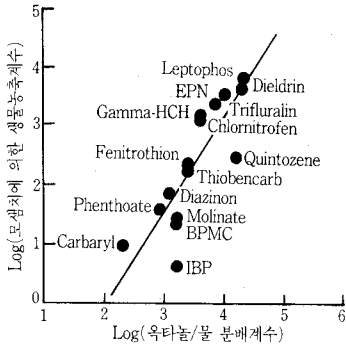
따라서 어류에 대한 생물농축계수를 측정하면 그 농약의 어류에 대한 급성

독성도 예견할 수 있다.

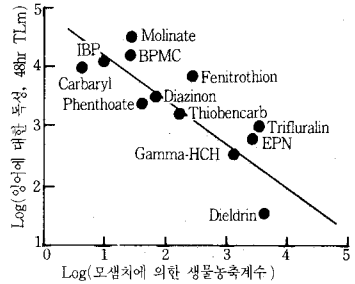
생물농축계수가 어느 정도 이상일 때 생물체 특히, 어류에 악영향을 주는지의 여부에 대해서는 학자들 간에 다소의 견해 차이가 있다. 일본의 Kanazawa는 생물농축계수가 100이상인 화합물은 생물에 대하여 악영향이 클 것으로 예상되기 때문에 보다 자세한 독성시험이 요망된다고 하였다.

생물농축계수와 생물에 미치는 영향을 평가할 수 있는 방법이 현재로서는 설정되어 있지 않지만 어떤 농약이 개발되어 환경내로 도입되기 전에 반드시 후보화학물질의 생물농축을 예견할 수 있는 방법이 모색되어야 할 것이다.

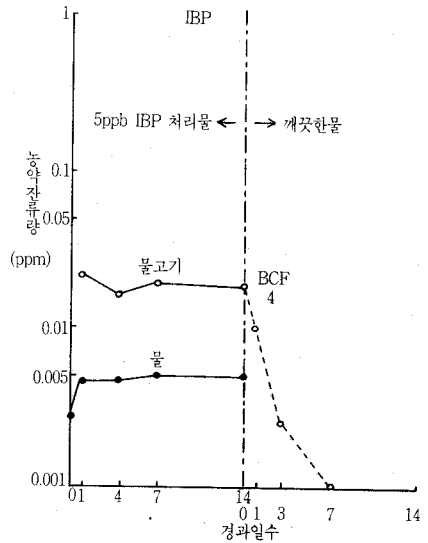
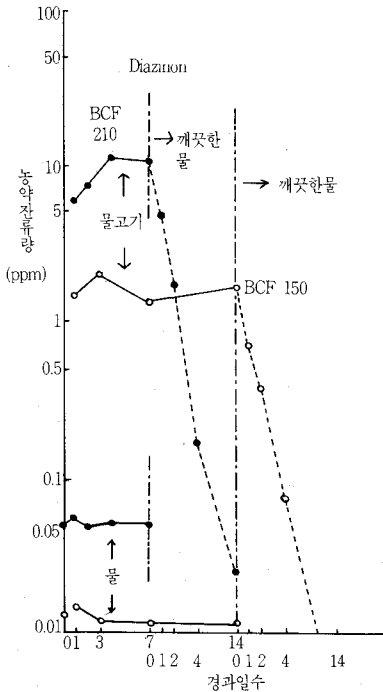
체외배설 수중농도무관 신속감소



〈그림1〉 모샘치에 의한 농약의 생물농축계수와 분배 계수(옥타놀 / 물)와의 관계



〈그림2〉 잉어에 대한 농약의 금성독성치와 모샘치에 의한 생물농축계수



〈그림3〉모샘치에 의한 diazinon과 IBP의 흡수 및 배설 (BCF: 생물농축계수)

〈그림3〉은 농약이 함유된 물에 노출된 어류체내의 농약농도는 빠른 시일내에 평형에 도달하며, 또한 생물농축계수는 수중농도와는 큰 차이없이 거의 일정함을 알 수 있다. 한편 어류에 의해 흡수된 농약성분의 체외로의 배설은 농약의 종류나 수중농도에 관계없이 비교적 신속하게 그리고 일직선으로 감소함을 알 수 있다.

즉 diazinon의 경우 10 혹은 50ppb가 처리된 물에 어류를 노출시키면 어체중 농도는 3~4일 후에 평형에 도달하여 2ppm(10ppb 처리구) 혹은 11.3ppm(50ppb 처리구)에 이르렀는데 이때의 생물계수는 170~210으로 큰 차이가 없었다. 또한 농약을 함유하지 않은 깨끗한 물에 어류를 옮기면 어체중 농약농도는 신속하게 일직선으로 감소하였음을 알 수 있다.

## 2. 水中 잔류 농약이 일반 수질에 미치는 영향

### 가. 맛과 냄새

유기농약은 보통 천연수중에 1ppt~0.1ppm의 농도로 검출된다. 사람에게 의해 직접적이고 쉽게 인지(認知)되는 관심은 수질에 대한 영향으로서 어떤 증거는 경험적인 관찰이나 감각에 의한 실험실적 연구로부터 수집된다. 즉, 음료수에는 화학물질에 의한 맛과 냄새가 없어야 하는데 2,4-D나 2,4,5-T의 제품

중 불순물인 염소화 Phenol의 냄새와 맛은 지하수에서 수년간 유지되는 경우도 있다. 또한 *r*-BHC는 0.02ppm의 농도에서 받아들일수 없는 맛을 내게 된다는 보고도 있다.

### 시판농약 냄새문제 염려없어

水中 유기농약의 맛과 냄새의 시발점(threshold)이 되는 값에 대한 명백하고도 신빙성이 있는 자료는 드물지만 7명으로 구성된 심사단의 관능시험결과 BHC는 수중농도가 1.8ppm 일때 냄새를, 0.8ppm 일때 맛을 내는 시발점이라고 보고한 바 있다. 순수한 rotenone은 13.8ppm, toxaphene은 5.2ppb가 냄새유발 농도이며, 제품의 경우는 더 낮아서 7~23ppb(rotenone, toxaphene)인 데 이는 여러종류의 용매 탓이라 하였다.

2,4-D 제품의 맛과 냄새의 성질에 영향을 주는 인자는 모화합물의 분자량, 제조시 불순물(2,4-DCP) 그리고 제품중 용매라고 한다. 〈표3〉은 2,4-D 유기ester 제품의 냄새유발 농도와 냄새수 및 냄새형태를 보여주고 있는데, 시판되는 액상과 입제농약은 제품중 용매 탓으로 순수한 ester보다도 더 낮은 냄새유발 농도를 갖는다. 순수한 ester는 냄새유발 농도가 3.3~5.0ppm으로서이는 포장살포량이 1.0ppm이나 그 이하가 되기 때문에 모화합물은 냄새문제를 야기할 가능성은 거의 없다.

〈표3〉 2,4-D 제품의 냄새 유발농도와 냄새수 및 형태

(Aly & Faust, '64)

제 품	Ester (%)	냄새유발(25±2°C)		냄새 형태
		냄새수	농도(ppm)	
Isopropyl ester	98.5	6	3.3	화학적
Butyl ester	98.9	5	4.0	"
Isopropyl, liquid	47.0	80	0.06	기름성 석유
Butyl, liquid	39.0	200	0.02	기름성(oily)
Butoxy ethanol, granular (2,4-D acid로서)	20.0	250	0.04	곰팡이가 썩는 냄새

**냄새유발농도 대부분 1.0ppm이하**

Sigworth('65)는 “비교적 순수한 화합물” 26종과 5종의 시판 살충제 및 제초제를 대상으로 60°C에서 냄새유발 농도와 냄새의 성질을 조사한 결과 냄새유발 농도는 유기염소제(15종)는 0.13~12.0ppm, 유기인제(6종)는 0.2~1.0ppm, phenylalkyl acid(6종)는 3.1ppb~3.13 ppm 및 어독성농약(4종)은 4.0 ppb~0.36 ppm이었다. 31종 화합물 중 26종이 1.0 ppm 이하의 냄새유발 농도를 가지며 냄새의 성질은 흙냄새, 곰팡이가 썩는 냄새, 탄화수소 냄새, 요

드프롬 냄새, Chlorophenol 냄새 등이라고 보고하였다.

한편 Cohen 등('61)이 조사한 바에 의하면 parathion원제는 3ppb 농도에서, 탄화수소 용매는 16 ppb에서 냄새를 유발하였는데 이들 용매는 농약제품에 90%까지 함유되기도 함으로 냄새의 근본원인인 화학물질 못지않게 중요하게 여겨지고 있다(표4).

**나. 각국의 수중잔류 허용기준**

많은 종류의 유기농약은 수질환경에서는 생물학적인 분해가 쉽게 일어나지

〈표4〉 수중에서의 수중 살충제와 제품중 용매의 냄새유발 농도(Cohen 등, '61)

화합물(농약)	냄새유발농도(ppm)*	화합물(제품구성성분)	냄새유발농도(ppm)*
Parathion(원제)	0.003	Sulfoxide(협력제)	0.091
" (순수화합물)	0.036	Aerosol OT (유화제)	14.6
Endrin	0.009	용매 1	0.016
Lindane	0.330	2	13.9
		3	0.090

\*실온에서 8인으로 구성된 심사단에 의해서 판정

않기 때문에 상당기간 잔류할지도 모른다. 따라서 과학자와 일반대중은 물(음료수)이나 식품으로 부터 섭취하게 되는 미량의 잔류농약에 우리 인간이 오랜기간 동안 노출된다는데 관심을 표명하게 되나, 실제로는 음료수중 미량의 잔류농약이 우리 인간에게 어떤 생리적인 악영향을 끼쳤다는 연구 보고나 사례는 거의 없다.

만약에 우리가 세심한 주의를 기울여서 농약을 사용한다하더라도 미량의 농약성분이 수원(水源)에 유입될 가능성은 있기 때문에 공중보건과 상수도취급관리들은 이들 잔류농약을 제거할 수 있는 지식이나 시설을 갖추어야 한다. 이는 음료수중 화학물질의 농도는 마땅히 극소화 되어야 하기 때문이다.

**허용한계 너무낮아 위해가능성없어**

우리나라에서는 아직 음료수질중 잔

류농약에 대한 법적 규제조치를 취하고 있지는 않지만 WHO, EEC, GIFAP (국제농약제조업자협회)와 같은 국제기구나 미국, 호주 등에서는 음료수중 농약잔류허용기준을 설정, 운용하고 있다.

미국의 경우에 공중보건위원회(US Public Health Service '62)를 설립, 음료수중 잔류농약의 허용기준치를 제정코자 하였으나 당시로서는 인용할 수 있는 자료나 정보가 부족하여 기준치를 제정하지 못하였지만 활용가능한 자료를 근거로 하여 볼때 어떤 알려진 건강위해를 구성하기에는 수질중 잔류농도가 너무 낮다고 생각하였다(Nicholson, '67). 그러나 국가상수도공급 기술자문소위원회는 수질중 잔류농약을 극소화하기 위해서는 가장 낮은 실제 잔류수준에서 허용한계수준이 설정되어야 한다는 견지에서 <표5>와 같이 허용한계치를 설정한 바 있다(1962).

<표5> 표면수중 농약의 허용한계수준(mg / l)

(미국, 1962)

농 약	허용 기준	농 약	허용 기준
Aldrin	0.001	Methoxychlor	1.0
Chlordane	0.003	Toxaphene	0.005
DDT	0.05		
Dieldrin	0.001	유기인+카바메이트	0.1
Endrin	0.0005		
Heptachlor	0.0001	2,4-D	0.02
Hep. epoxide	0.0001	2,4,5-TP	0.03
Lindane	0.005	2,4,5-T	0.002

즉 당시로서 가장 많이 사용되고 있는 농약을 3群(유기염소계, 재초제 및 유기인계와 카바메이트를 포함한 콜린 에스테르계 저해 농약)으로 분류하여 허용한계수준을 설정하였는데 이들 값은 장기간에 걸쳐 섭취되더라도 우리 인간에게 생리적인 악영향을 초래하지 않는 수준이라 하였다.

유기 농약은 일반적으로 수질중에서는 2 ppm 이하로 검출되기 때문에 이들 허용한계수준은 너무 낮아서 어떤 급성적인 위해가능성은 없으며, 1 인당 정상적인 하루 섭취량인 2.2l 섭취시 하등의 문제가 없다고 하였다.

ADI에 평균체중, 1일소비량 고려

호주에서는 식품표준규격으로서 음료수중 잔류농약의 허용기준을 농약별로 설정 운용하고 있다(표6).

〈표7〉은 WHO 등 국제기구와 최근 미국 환경보호청(US/EPA)이 설정한 음료수질중 농약의 잔류허용기준과 설정방법을 비교한 것이다. WHO는 해당 농약에 대한 1일섭취허용량(ADI)의 백분의 일을, GIFAP(국제농약제조업자협회)는 백분의 십을, US/EPA는 백분의 이십을 적용하고, 여기에 체중(70 kg)과 하루소비량(2l)을 고려하여 계산하고 있다.

예로서 US/EPA의 경우 통상의 산업물질과 농약에 대하여 최대허용한계(Maximum Contaminant Limits와

〈표6〉 수중 농약에 대한 수질중 잔류허용기준(mg / l)

(호주, 식품표준 규격, 1983)

농 약	수질중 잔류허용기준	농 약	수질중 잔류허용기준
Alachlor	0.01	Diazinon	0.01
Azinphos-methyl	0.01	Fenitrothion	0.06
Butachlor	0.03	Paraquat	0.04
Chlorpyrifos	0.002	Parathion	0.03
2,4-D	0.01	Thiobencarb	0.04

〈표7〉 음료수중 잔류허용기준( $\mu\text{g} / \text{l}$ )

구 분	WHO	EEC	GIFAP	US/EPA	호 주
적용방법	ADI의 $\frac{1}{100}$ 고려	개개농약 0.1 총량으로 0.5	ADI의 $\frac{10}{100}$ 고려	ADI의 $\frac{20}{100}$ 고려	농약별로 설 정
〈예〉					
Parathion	1.75	0.1	17.5	35	30
Paraquat	0.7	0.1	7.0	14	40



★생물농축과 수질에 미치는 영향★

Health Advisories)를 설정하고 있는데, 성인의 경우 체중 70kg, 1일소비량 2l (체중 10kg의 어린이인 경우는 1l)을 적용, 다음의 일반방정식에서 허용한계 (Health Advisories, HA)를 계산하고 있다.

$$HA = \frac{20}{100} \times ADI(\text{mg/kg/day}) \times \frac{70\text{kg}}{2l}$$

여기서 ADI =  $\frac{\text{NOEL(최대무영함수준, mg/kg/day)}}{\text{UF(불확실성 인자)}}$

예로서 1일섭취허용량이 0.005 mg/kg/day인 Parathion의 경우 음료수질 중 허용한계(HA)는

$HA = \frac{20}{100} \times 0.005 \text{ mg/kg} \times \frac{70\text{kg}}{2l}$   
 $= 0.035 \text{ mg/kg(ppm)}$ 으로서  $35 \mu\text{g/kg}$  (ppb)가 된다. WHO의 음료수질중 허용한계(Guideline Level)는 ADI의 백분의 일을 적용, 같은 방법으로 계산하면 1.75 ppb가 되고 GIFAP의 경우는 ADI의 백분의 십을 적용하므로 17.5 ppb가 된다.

한편 서독을 비롯한 EEC 국가들의 허용한계는 개개농약의 경우는 0.1 ppb, 검출되는 모든 농약의 잔류량 총량으로 0.5ppb를 허용한계로 설정하고 있다.

- 다음호에는 수질중 잔류농약의 분해·소실 및 제거에 관한 내용이 소개됩니다.

