

유 럽

환경영향평가를 위한 독성시험

이 글은 지난해 농약연구소의 「농약의 안전성 평가기법에 관한 심포지엄」에서 D. Riley박사가 발표한 내용을 농약연구소 李海根박사가 번역한 것이다.

Riley박사는 현재 영국 ICI 농약동북부 독성담당전문가이며, GIFAP(세계농약공업연맹) 환경특별위원회(Environment Task Force)의 의장으로 활약하고 있다.

유 럽공동시장의 구축은 독성시험 방법의 조화, 독성자료의 평가 및 규범(Criteria)의 결정에 커다란 자극제가 되어왔다.

환경영향평가(위해성평가)의 과학적인 근거는 광범위한 생물체에 대한 농약을 포함한 화학물질의 노출과 독성정도를 서로 비교·분석하는 과정이다. 만약에 노출/독성의 비율이 일정한 값을 초과할 경우에는 더 많은 종류의 독성시험을 추가로 수행하여야 한다.

유럽에서도 미국에서도 같이 어떤 농약의 사용여부를 결정할 때에는 반드시 유익성/위해성에 대한 종합 평가 결과에 기초하고 있다. 유럽 국가들은 농약의 환경위해성을 평가하기 위한 다방면의 기술을 개발하여 왔다. 어떤 나라들은 농약을 포함한 화학물질에 대한 시험방법과 기준에 대하여 융통성을 보여온 반면 독일과 같이 보다 정확한 시험방법(Test Protocol)을 규정하고 있는 나라도 있다.

여기서는 환경영향평가에 대한 과

학적인 원리와 그것이 EC등록요구 조건과는 어떠한 연관성이 있는지 알아본다.

1. 환경영향평가의 원리

단계적인 환경위해성 평가의 원리는 1989년 FAO에서 발표되었는데 그 내용은 그림 1과 같다. 농약의 사용 여부 결정은 유익성/위해성의 종합 평가 결과에 기초한다.

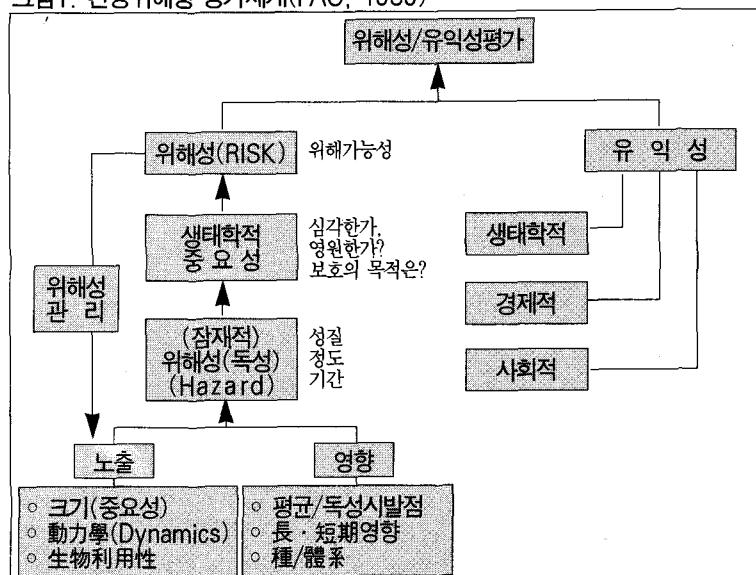
위해성 또는 환경영향 평가시 최악의 노출각본은 폭우 직후 水界가 위해물질에 의해 오염될 가능성을 예측하는 것이다. 이 경우의 위해성 평가는 살포시기와 장소에 따라 발생빈도가 상이하므로 이를 고려하게 된다. 또한 일부 과학자들은 노출과 독성의 기능을 설명하기 위하여 위

해성(hazard)보다는 오히려 위험도(risk)라는 말을 사용하기도 한다. 어떤 때는 hazard와 risk(가능성 요소를 포함시킴)의 개념 간에 차이를 구별하기 어려운데, 여기서는 risk란 말은 노출과 독성을 비교·평가할 경우에 한해서 사용하기로 한다.

화학물질에 대한 생태학적 안전성을 평가하기 위하여는 '생물에 의한 화학 물질의 노출수준과 노출경로' 및 '생물에 대한 화학물질의 독성'이 반드시 고려되어야 한다. 평가결과에 대한 해석은 실재적인 포장경험 또는 포장시험으로 확인되어야만 한다. 시험방법에서 허용될 수 있는 융통성의 정도에 대해서는 현재도 유럽 각국들간에 논란이 많다.

국가들 사이에 독성자료의 상호수

그림1. 환경위해성 평가체계(FAO, 1989)





력을 보장하기 위해서는 반드시 적용되는 시험방법에 대한 어떤 표준화내지 조화가 필요하게 된다. 바꾸어 말하면 과학적인 견지에서 판단해 볼때, 포장지에 표기된 사용방법과 특성을 고려하여 사용한다면 어느 정도의 융통성 발휘는 필요하다고 여겨지는데, 가장 합리적인 타협안이 OECD(경제 협력 개발기구) 협의 지침(Guideline)이다.

금후 마련될 통합 EC의 위해성 평가지침은 그동안의 흐름을 볼때 노출정도와 독성을 비교·평가하는 기법을 마련할 것이 확실시된다.

농약의 안전성평가는 정치적 및 사회경제적인 측면들 보다는 오히려 정확한 과학적인 자료에 근거하여 수행하는 것이 바람직하다.

단계별 시험과정(Tier system)과 농약의 환경안전성을 예측할 수 있는 환경노출자료, 생태학적 자료 등을 이용하는 과정에 있어서 과거 수년 동안에 팔목할 만한 발전이 이루어져 왔다. 여기서는 농약을 포함한 화학물질의 독성과 노출정도를 결정하는 기본원리, 정보의 해석, 단계적 시험방법 및 위해성 평가과정에 대해 설명하기로 한다.

가. 노출경로와 노출수준

화학물질에 의한 노출가능한 경로와 노출기간이 먼저 결정되어야 하는데, 그렇다 하더라도 적절한 독성시험 방법을 고안하기는 거의 불가능하다. 만약 짧은 기간의 노출을 가

표1. 농약을 ha당 0.5kg(주성분)처리한 직후의 전형적인 환경시료중 농도

시험재료	잔류량(ppm)	시험재료	잔류량(ppm)
5% 입제/미끼 *	50,000	엽채류	50
종자소독한 곡류	50~1,000	곡식날알	5
풀	100	토양(10cm깊이)	0.5

* ha당 약 5~100g에 해당

표2. 수서생물에 대한 Cypermethrin의 독성에 미치는 저이토의 영향
(72시간 EC₅₀ µg ai/liter)(자료: Dave Riley, 1990)

수서생물	깨끗한 물	물/토양
<i>Daphnia magna</i> (물벼룩)	1.6	310
<i>Cloeon dipterum</i> (?)	0.01	2.9
<i>Asellus aquaticus</i> (?)	0.01	2.8

정한다면 단기간의 급성독성시험이 이 경우에는 적절한 시험방법이 될 것이다. 예를 들면 어류나 물벼룩에 대한 급성독성은 48시간 EC₅₀을 구함으로써 충분한 평가가 가능할 것이다. 다시 말해서 시험대상 농약의 잔류성이 크다면 장기간에 걸친 시험이 보다 적절한 시험방법이 될 것이다.

장기간에 걸친 독성시험을 수행할 경우 환경중 농약의 농도는 굉장한 차이가 있다. 일부 지역의 환경중 농약의 초기 농도는 표 1에서와 같이 농약이 처리된 종자나 입제 농약의 입자 그 자체를 이용하는 생물은 높은 농도로 노출될 수 있는 반면, 토양서식 생물은 단지 낮은 농도로 노출될 것이다.

덧붙여서 농약의 생물이용성을 고려할 필요가 있는데, 토양이나 水界에서의 흡착은 농약의 이용성과 독학적인 영향을 크게 감소시킬 수 있

다. 이러한 사실은 표 2에서 설명되는데 흡착성이 강한 피레스로이드 계 살충제인 cypermethrin의 독성은 토양의 존재하에서는 크게 감소됨을 알 수 있다. 식물, 지렁이류, 토양미생물과 같은 토양에 서식하는 생물에 대한 흡착의 영향을 고려하기 위하여는 액체 배양액시험에서 보다는 오히려 토양의 존재하에서 시험이 수행되어야만 보다 정확한 자료를 얻을 수 있다.

생물에 의한 농약의 노출경로와 노출수준에 대한 평가는 생물학 특히 먹이 습성이나 행동양상과 같은 사항들을 이해한다면 보다 정확하게 시험수행이 가능한데, 이에는 생물의 노출수준(정도)에 대한 이해를 높일 필요가 있다. 예로서 농작물에 살포된 농약의 익충에 대한 노출경로와 노출수준은 일반적으로 잘 알려져 있지 않으며 현재까지 개발된 수 많은 실내 독성시험의 가치를 심



실내시험 결과를 포장상황에 그대로 적용하기 위하여 유럽에서는 수학적인 모델화 이용이 증가할 것으로 예측된다.

각하게 제한하는 원인이 되고 있다. 환경중 농약의 농도를 추정할 수 있는 어떤 시험방법의 가치는 아직도 입증되지 않은 상태에 있다. 예를 들면 농약의 환경중 농도를 추정하기 위해서 라이시메터(lysimeter)를 이용한 시험결과는 지하수에 존재하는 농약의 농도와 거의 비슷할 것으로 추정되고 있으나 정상적인 포장조건하에서의 용탈수중 농약의 농도와 라이시메터의 바닥으로부터 포집된 물중에서 검출되는 농도를 서로 비교하는 것은 타당성이 희박하다. 지하수식 수생생물(aquifers)에 대해 수행한 시험결과를 외삽할 수 있는 평가방법에 대하여는 현재 까지 의견 일치가 이루어져 있지 않

은 상태인데, 여기에는 농약의 분해, 흡착 및 희석의 영향을 고려할 필요가 있다. 시험연구비용이 비록 1만달러(US\$)밖에 안되는 단순한 실내 용탈시험이 10만 달러 이상 소요되는 복잡한 라이시메터연구 만큼 아주 유용한 경우도 많다.

실내시험 결과(자료)를 포장상황에 그대로 적용하기 위하여 유럽에서는 수학적인 모델화 이용이 점차 증가할 것으로 예측되며 나아가서 개선보완된 모델의 정당화에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다.

나. 환경 생물에 대한 독성

독성시험방법은 노출수준의 측정/평

가를 위한 시험방법 보다 일반적으로 더 많이 발전되었다. 이들 시험방법은 물고기, 무척추 수서생물, 조류(藻類), 식물, 포유동물, 새, 곤충, 지렁이와 같은 토양 유충과 토양미생물을 포함한 생물체 전반에 걸쳐 이용가능하다.

실험대상 생물은 실내에서의 사육이나 실험이 용이한 생물이 자주 채택된다는 사실에 주목해야 한다. 아마도 그 극단적인 예가 물벼룩인데, 물벼룩은 번식이 아주 빨라 2~3일 이내에 번식연령에 도달하기 때문에 급성 및 번식독성시험에 아주 유용하고 편리한 생물이 되고 있다. 알곳에도 이러한 특징 때문에 이를 물벼룩은 멸종의 위기를 당하지 않는 생물 중 하나인데, 그 이유는 첫째로 생존 물벼룩은 매우 빠른 속도로 번식할 수 있다는 점과, 둘째로 자유롭게 유영하는 물벼룩의 성충이 전부 죽는다해도 이들 성충보다 내성이 훨씬 더 강한 卵(ephippia)의 부화로부터 빨리 재생할 수 있기 때문이다. 그러므로 물벼룩은 보다 광범위한 생물에 대한 화학물질의 독성을 평가하는데 유용한 지표생물(Indicator)이 되고 있다.

다. 결과의 해석과 정당화

시험결과가 올바르게 해석될 수 있고 해석의 결과가 포장경험이나 포장시험에 의해 정당화될 수 있을 정도의 만족스러운 노출시험이나 독성시험 방법은 아직 개발되지 않은 상태에 있



표3. 농약이 조류(鳥類)에 미치는 영향연구에 소요되는 비용

연구형태	성인남자의 노력(년)	비용(US\$)
실험실(2종 LD ₅₀ +2종 식이 LD ₅₀ +1종 번식독성)	1	100,000
소규모 포장시험	2~5	200,000~500,000
대규모 다방면 포장시험	>20	>2,000,000

표4. 평균직경 49μm인 농약살포액의 노출시간별 날아다니는 꿀벌과 정지해 있는 꿀벌의 날개와 몸체의 농약 부착량 비교(μg/꿀벌) *

노출시간 (초)	날아다니는 꿀벌		정지해 있는 꿀벌	
	날개	몸체	날개	몸체
10	1.3	7.8	0.3	3.6
20	0.9	12.3	1.9	6.9
30	1.3	17.4	2.0	9.1

* T. Holt(ICI 미발표자료)

다. 초기 해석은 항상 환경추정농도(EEC:Estimated Environmental Concentration)와 독성치 또는 생물에 의한 농약의 1일섭취량(mg/kg 체중/day)을 서로 비교·평가하는데 기초하고 있다. 조류(鳥類)나 포유동물에 대한 농약의 위해성평가는 이러한 방법으로 수행되고 있는데, 다음과 같은 경우에는 위해성이 없는 것으로 추정될 수 있다.

조류나 포유동물에 대한

농약의 위해성 평가

- 환경추정농도(EEC) < 1/5 LC₅₀
- EEC < 만성무영향수준
- 1일섭취량(mg/kg/일) < 1/5 LD₅₀

여기서 LC₅₀은 공시동물중 50%가 치사되는 식이 섭취 농도이며 LD₅₀은 50%가 치사되는 1회 투여 경구약량이다. 또한 만성무영향수준은 식이섭취시험에서 얻은 화학물질

(농약포함)로 인한 악영향이 전혀 관찰되지 않는 약량수준이다. 농약으로 인한 조류나 포유동물의 사고 건수와 검색(monitoring)을 통한 조사결과 등을 포함한 농약사용에서 얻은 지금까지의 경험으로 미루어 볼때, 위에서 언급한 평가기준은 농약이 정상적으로 사용될 경우에는 합리적인 판단기준이 된다는 사실을 입증해주고 있다. 수서 생물에 대해서는 EEC(환경추정농도)가 LC₅₀ 값의 1/10이하이면 위해성이 없는 것으로 추정할 수 있다. 다만, 이 경우에는 더 높은 안전계수가 적용될 때도 있는데, 그 이유는 수서생물은 조류나 포유동물의 경우처럼 농약이 처리된 특정 지역을 이동하여 빠져나올 수 없으며 또한 대체먹이감을 구할 수도 없으므로 위해물질에 대한 그들의 노출을 쉽게 제한

할 수 있기 때문이다.

만약 EEC값이 위에서 언급한 평가기준보다 더 높으면, 포장조건에서의 노출수준과 독성을 평가하기 위한 추가 독성 시험을 수행할 필요가 있다. 만약 시험설계가 정밀하게 작성되고 특별하게 한정된 의문점에 대하여만 답변하는데 그 목적이 있다면 이들 시험은 보통은 상대적으로 적은 규모로 수행될 수 있지만 그렇지 않을 경우는 수십만 달러의 비용이 들게 될 것이다. 미국의 규제 당국자들은 다방면에 걸친 모든 형태의 포장 시험성적을 요구하고 있지만, 일반적으로 볼때 이러한 요구사항은 정당화되지 못하고 있다. 따라서 그러한 광범위한 시험은 해당 농약의 안전성을 종합평가하는데 다소 공헌한다기 보다는 오히려 막대한 자원만 낭비하는 결과를 초래하게 된다(표 3). 그러므로 유럽에서는 그러한 종류의 시험연구에는 거의 연구비를 지원하지 않는다.

어떤 시험/위해성평가 과정도 아직은 만족스러운 것이 없는데, 그 이유는 노출평가 또는 포장경험/시험으로 얻은 결과에 대한 정당성 여부가 부족하기 때문이다. 예를 들면, 야생동물의 주요 먹이源이 되는 해충의 천적 같은 익충에 대한 농약의 독성을 평가하기 위한 수많은 종류의 시험방법이 개발되어 왔으나 이들 시험방법들은 포장조건에서 이들 생물에 대한 농약의 안전성을 평가하는데는 효용가치가 그다지 크지 않다고 여겨진다. 그 이유

표 5. 살충제의 살포율과 꿀벌 독성치와의 비교

살충제	접촉 LD ₅₀ ($\mu\text{g}/\text{꿀벌}$)	살포율(g/ha)	비율
Pirimicarb(피리모)	50	140	3
Phosalone(포사론)	8.9	460	52
Cypermethrin(피레스)	0.056	25	450
Dimethoate(디메토)	0.12	350	2,900
Triazophos(아조포)	0.055	400	7,300

는 노출수준에 대한 지식의 결핍과 포장경험/포장시험의 결과와 더불어 실내시험 결과에 대한 해석에 정당성을 부여하지 못하기 때문이다.

2. 단계적 시험/위해성 평가과정(예)

가. 꿀벌

꿀벌에 의한 농약의 두가지 주요 노출가능경로로는 꿀벌에 적접살포로 인한 피부접촉노출과 농약이 살포된 농작물 사이로 먹이를 찾아다니는 동안 섭취하는 경구노출이다. 접촉에 의해 노출되는 동안에는 꿀벌의 날개보다는 물체에 훨씬 더 많은 살포액이 집착하게 된다(표 4). 그러므로 실내독성실험에서는 꿀벌에 직접 살포하기 보다는 적절한 용매에 용해한 농약을 한방울씩 떨어뜨리는 방법이 훨씬 더 정확한 약량수준으로 몸체에 처리할 수 있다.

농약의 농도는 시간의 경과에 따라 감소하므로 노출정도는 살포하는 동안과 살포직후에 가장 크며 초기 노출은 살포율에 비례한다. 곤충생장조정제 형태의 농약에 대하여는 숨어 있어서 유판으로는 잘 보이지

않는 꿀벌 유충의 노출을 고려할 필요가 있다. Robust시험방법은 접촉노출과 경구노출경로 양자모두를 고려하여 개발된 시험방법인데, 유충에 대한 시험방법은 현재 개발중에 있다. 가장 좋은 노출평가는 농약의 살포율과 독성치를 이용, 다음식에 의거 위해성비율을 계산하여 수행하는 것이다.

$$\text{위해성 비율} = \frac{\text{살포율(g주성분/ha)}}{\text{LD}_{50}(\mu\text{g주성분/꿀벌})}$$

경험상 여러종류의 농약에 대한 영향을 놓고 볼 때, 꽂이 피는 농작물에 농약이 살포될 경우 위해성비율이 50이하이면 그 농약은 꿀벌에 안전한 것으로 평가되며 그 비율이 2,500 이상이면 위해할 것으로 추정된다. 이들 값 사이의 위해성비율 때문에 꽂이 피는 농작물에 농약이 살포될 경우 그 농약이 안전할 것인지의 여부를 결정하기 위하여는 포장시험이 추가로 필요한 경우도 있다. 표 5는 수종 살충제에 대해 조사한 위해성비율을 나타내고 있다.

살포율에 대한 독성치의 비율을 이용하면 농약의 독성치만을 이용하는 것보다 농약의 안전성에 대한 훨

씬 더 좋은 예전을 유도해낼 수 있다. 예로서 같은 pyrethroid계 살충제는 실내시험에서는 꿀벌에 대한 독성이 강하게 나타나지만, 일반 포장에서는 꿀벌독성 문제는 야기되지 않는데, 그 이유는 실제 포장에서는 매우 낮은 비율로 살포되며 또한 광분해 등으로 신속하게 분해·소실되기 때문에 꽂이 피는 농작물에 까지도 안전하게 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

과학자들은 수년동안 국제적인 차원에서 공동 노력을 기울여온 결과 신빙성 있는 시험방법 개발과 단계별 시험과정 및 위해성평가 기법을 마련하였다. 꿀벌연구로 부터 얻은



꿀벌 연구로부터 얻은 결과는 농약포장지 표기내용에 그대로 적용된다.

결과는 농약포장지 표기내용에 그대로 적용되는데, 예로서 만약 그 농약이 꿀벌에 안전하지 못하다면 그 농약은 “꿀벌이 먹이를 찾았다는 꽃피는 농작물에는 사용하여서는 아니된다”라는 내용이 반드시 포장지에 포함되어야 한다.

나. 지렁이류(Earthworms)

1) 1단계

토양배지(Soil medium) 시험은 고유독성시험(예로써, 여지上에서 농약에 토양서식 생물을 노출시키는 시험)보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있는 시험방법인데 그 이유는 토양 배지 시험은 지렁이류에 의해 소모된 토양의 농약흡착과 농약의 이용성에 미치는 토양의 흡착영향이 함께 고려되기 때문이다. 지렁이류에 대한 시험에서 제1단계는 OECD 지침 207(1987)에 따라 인조토양을 이용하는 실험실 시험인데, 이 지침에 의하면 14일 동안의 노출기간에 공시한 지렁이중 50%가 치사되는 토양(건물重) 중 농도(LC₅₀)가 결정된다. 여기서 구한 LC₅₀ 값이 100mg/kg 토양보다 더 큰 값을 가지면 그 농약은 위해성이 없는 것으로 평가할 수 있는데, 이러한 경우에는 더 이상의 시험은 필요치 않다.

LC₅₀값 보다 더 낮은 값을 갖는 농약에 대한 위해가능성은 앞서 설명한 방법에 따라 그 농약의 토양중 농도를 측정함으로써 평가되는데, 여기서는 1.5kg/l의 밀도를 가진

2.5cm 表土中에 시험대상 농약이 균일하게 분포한다는 가정하에 수행된다. ha당 주성분으로 1kg의 농약이 살포되면 토양중 농도는 2.7mg/kg토양이 된다.

EEC(환경추정농도)를 평가하기 위하여는 식물의 잎이나 줄기로 인한 토양 표면의 덮음 정도(plant cover)가 또한 고려되어야 하는데, 그 이유는 토양표면이 식물에 의해 덮이게 되면 토양중 농약의 농도는 상대적으로 감소하기 때문이다. 식물이 토양표면을 완전히 덮을 경우에는 처리된 농약의 약 절반 정도만이 궁극적으로 토양에 도달한다고 가정하는 것이 합리적이다.

만약 LC₅₀/EEC의 비율이 10보다 더 크다면 더 이상의 시험은 필요치 않으며 그 비율이 10보다 작으면 임시~중간평가가 수행된다. 다음으로 아외에서의 위해가능성이 배제될 수 없다면 추가로 시험이 수행되어야 하는데, 이에는 2단계의 실내시험이나 또는 그 대신 직접 포장시험(3단계)으로 진행하게 된다.

2) 2단계

이 시험은 실제로 기대되는 농도에 대한 亞致死 영향을 구명하기 위해 수행된다.

지렁이류의 번식에 미치는 영향에 대한 실내시험은 또한 이 단계에서 유용할지 모르나 현재로서는 표준화된 시험방법이 개발되어 있지 않은 상태이다. 인지할 수 있는 영향이 관찰되지 않거나 또는 그 영향이 내

성적이라면 더 이상의 실험은 필요치 않다. 만약 더 이상의 시험이 요구된다면 포장시험(3 단계)으로 진행시킬 필요가 있다.

3) 3단계(포장시험)

포장시험은 어떤 특정 제형의 농약을 이용, 최대 추천비율로 살포하여 시험이 수행된다. 그러한 시험에 대한 표준화된 지침은 아직 개발되어 있지 않으나 Edwards & Brown (1982)과 Heibach(1990)에 의해 제시된 시험방법중 적절한 것을 선정, 이용하면 가능하다.

농약정보

농사속담

가을 곡식은 재죽하지 않는다

작물의 결실기인 가을에는 기온이 지나치게 높지 않으면서 적산온도(積算溫度)가 높고 일조시수(日照時數)가 길면 길수록 곡식이 충실히 익으로 거울이 늦게 올수록 수량을 높일 수 있다는데서 유래된 말

섬에 담아 보아야 풍년을 안다

농사란 마지막 수확때까지 정성을 다해 가꾸어야 한다. 다된 농사라도 추수기의 방심으로 실농(失農)을 할 수 있기 때문이다. 끝까지 최선을 다해 농사일을 해야 한다는 뜻.