

화학물질의 환경화학적 시험 방법과 환경독성학적 평가

김 용 화*

Environmental Chemical Test Methods and Environmental Toxicological Assessment of Chemicals

Yong-Hwa Kim

서 론

화학 및 화학공업의 진보에 따라서 새로운 화학 물질의 생산은 날로 증대되고 있다. 거의 전세계의 화합물을 망라하는 잡지인 Chemical Abstract 에 의하면 현재 800만 화합물이 제조되었고 매주 8천 종이 새로운 물질로 등록되고 있음을 나타내고 있다. 물론 여기에 등록되는 물질중에서는 문헌상으로 사장되는 것이 대부분이지만 공업적으로 제조되어 사용되는 화합물은 일본이 4만 5천, 미국이 6만 5천이라고 추산되며 1983년도 우리나라 환경청에서 국내에서 사용되는 화학 물질은 10,000 여종이라고 집계하고 있다.^(1,2)

이러한 화학물질의 홍수속에서 인체 및 환경의 안전을 기하기 위한 노력은 1960년대 선진국에서는 인명피해가 수반되는 사고 후에 국가적인 차원에서 법률 제정을 통한 규제방법으로 되고 있어서 대부분 사후대책에 그치고 있는 실정이었다. 따라서 목적에 따라 대기보전, 수질보전, 농약, 약품, 식품에 대한 개별적인 법령이 제정되어 화학물질의 위험성을 방지하려는 노력이 경주되었다. 그러나 다양한 법률의 실시에도 급속도로 생산, 소멸하는 화학 물질에 의한 피해를 예방하지는 못하므로 급기야 근본적인 대책이 마련되었으며 이것이 미국의 'Toxic Substances Control Act' (1976)⁽³⁾이며, 일본의 '화학물질의 심사 및 제조 등의 규제에 대한 법률' (1973)⁽⁴⁾이었다. 이 법률의 주

요한 골자는 화학 물질이 사용되기(제조되기) 전에 그 위험성을 평가하여 사고를 미연에 방지하려는 것이다. 환경오염에 직접 관여되는 사건은 아니지만 이러한 접근방법의 성공적인 실례는 1961년 미국 FDA의 Frances Kelsey가 Thalidomide의 미국 내 판매를 위하여 제출된 독성자료의 미비점에 대한 검토를 이유로 미국 내 사용을 보류하고 있던 중 이에 대한 제도적 장치가 소홀했던 유럽 및 일본에서 기형아 출산 문제가 발생하여 미국 내에서는 이에 대한 사고를 예방할 수 있었다.⁽⁵⁾

기존 화학물질과 신개발 화학물질 중 환경에 유출될 가능성이 있는 화학물질의 인체 및 환경생물에 미치는 위험성을 평가하여 화학물질에 의한 피해를 사전에 극소화하기 위한 체계적인 노력이 환경독성학적인 접근 방법이라 생각된다.

화학물질의 환경에서의 위험성은 Shires 와 Stephenson⁽⁶⁾이 그림 1 과 같이 자세하게 분석하고 있다. 이러한 견해는 Ware가 그의 농약에 관한 저서⁽⁷⁾에서 hazard(유해성) 와 toxicity(독성)를 설명하면서 유해성은 독성과 그 물질이 대상 유기체에 노출될 가능성에 의해서 결정되는 것으로 설명하는 것의 일목요연한 표현이라 하겠다. 그는 좋은 실례로서 담배 두개피에 들어있는 알칼로이드인 니코틴은 그 자체로서 인체에 급성독성을 나타낼 수 있지만 담배를 피울때 니코틴이 타서 없어지므로 급성독성에 관한 한 위험성은 적은 것이라고 설명하고 있다.

*한국화학연구소 안전성연구센터 환경독성연구실

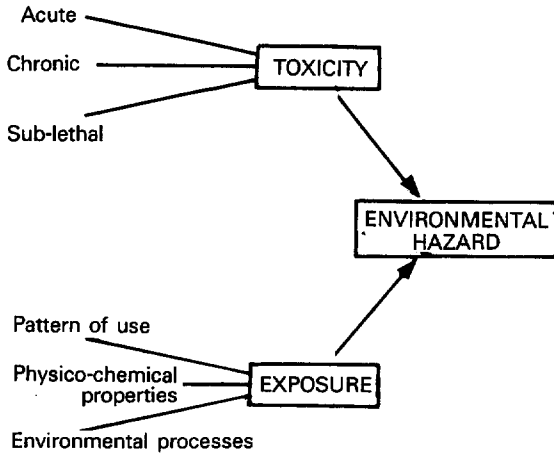


그림 1. 환경적 유해성, 독성, 노출가능성의 관계⁽⁶⁾

따라서 화학물질의 위험성 혹은 안전성을 평가하기 위해서는 그 물질의 인체 및 환경생물에 대한 독성과 노출가능성이 기본적으로 검토되어야 하고 이를 뒷받침 할 수 있는 신빙성있는 자료의 마련이 필요하게 되므로 이에 대한 각종 실험방법이 개발되어 오고 있는 것이다.

우리나라는 1980년 이후 급속한 산업발전에 힘입어 정밀화학 공업도 급성장하게 되었고 1987년에는 물질특허제도가 도입되었다. 이를 계기로 종전의 화학물질의 수입 및 제재화를 거친 소비패턴에서 탈피하여 새로운 화학물질의 개발 및 생산이라는 복잡한 과정을 거쳐 대량생산으로 연결되므로 인체 및 환경생물에 미칠 부수적인 위험 가능성이 점점증하고 있다. 그러나 화학물질의 유해성을 규제할 수 있는 법적인 방편이 마련되어 있지 않고 유해성을 시험하고 평가하는 방법이 확립되지 않은 상태에서 수입되는 화학물질에 대하여는 부족한 외국자료에 근거하여 임시 방편적인 평가에 의존할 수 밖에 없고, 신개발물질에 관하여도 이와 유사한 조처가 취하여질 것으로 예상된다. 이러한 국내적상황에서 산업의 급속한 발전과정과 이에 부수되는 환경오염에 의한 가공할만한 피해를 먼저 경험한 몇몇 선진국에서의 화학물질에 대한 유해성 시험 및 평가방법을 개발해 보는 것은 앞으로 우리나라가 나가야 할 방향을 설정하는 좌표가 될 것으로 생각한다.

그러므로 본 고찰에서는 첫째, 노출가능성을 평가하는 환경화학적 연구방법을 중심으로 다소 상세하게 설명하고 그 제한점을 소개하며, 둘째, 생태계내 유기체인 환경생물에 대한 독성과 인체독성을 평가하는 방법에 대하여는 극히 간략하게 언급하고, 셋째, 이 두 방법이 복합적으로 실제에서 활용되는 예를 들므로써 마감하고자 한다. 본 고찰에서는 개개의 방법에 대한 학문적인 연구추세를 상세히 추적하기보다는 현재 법적인 지침으로 채택되어 활용되고 있는 소수의 실험법에 대하여 중점을 두었다. 대상 화학물질은 일반 산업용 화학물질을 중심으로 하였으나 실험방법 상으로는 농약도 대동소이 하므로 농약에 대한 시험방법도 추가하여 설명하였다.

본 고찰을 통하여 화학물질의 환경독성 평가라는 커다란 공동 노력에 환경농학에 관여하는 연구자들이 어떻게 기여해 나갈 수 있을지를 점검해 보는 계기가 되기를 바란다.

2. 노출가능성평가- 환경화학적 시험 및 추정방법 (Exposure assessment: Environmental Chemical Tests and Estimation Methods)

화학물질이 환경내로 유입되었을 때 인체 및 여타 생물에 독성을 나타낼만한 일정량이 그 생물체에 노출되어야 한다. 화학물질이 환경에 유입된 직후부터 생물체에 도달하기까지의 경로와 노출된 화학물질이 생체내에서 독작용을 일으키게 되기까지의 경로를 추적하는 것이 환경화학적인 접근방법이 될 것이다.

국내에서 이러한 연구는 주로 농약에 대하여 수행되어 왔고 작물체에서의 잔류연구, 방사성 동위원소를 이용한 작물체에서의 동태연구, 환경시료에서의 잔류연구 등이 주류를 이루어 왔다.

이러한 연구는 환경화학적 평가에 필수적 단계이긴 하지만 소요되는 시간과 경비가 적지 않음에도 불구하고 실험조건외의 조절에 난점이 개재되거나 실험물질의 조작에 어려움이 있어서 다양한 실제 환경에서의 경로 및 동태 (fate)를 추정하는데는 제한점을 가지고 있다. 그러므로 이를 보완할 수 있는 많은 간편한 실험실적인 연구방법들이 시도되었고 화학물질을 평가하는데에 이러한 자료들이 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 필수적으로 요

구되고 있는 것이다. 국내의 관행적인 연구는 결론적인 자료에 치중해 온 반면 선진국에서는 왜 그러한 결과가 나왔는지를 설명할 수 있는 자료를 추구해 온 것이 일반적인 경향이라고 생각된다.

후자의 접근 방법은 다분히 기작적(mechanistic)인데, 원인을 찾아냄으로서 근본적인 해결방법을 제시할 수 있고 야외실험(field experiment)을 논리적으로 설명할 수 있으며 나아가 환경조건의 변이에 따른 결론의 변동 범위를 예측할 수 있음으로 인하여 막연한 안전계수에 의존하지 않고 화학물질의 특성에 근거한 노출가능성을 찾아내고자 하는 것이다. 특히, 이러한 간이한 실험실적인 접근방법의 필요성은 화학물질을 개발하는 단계에서는 필수적인데, 그 이유는 효용도가 있다고 밝혀진 수많은 화학물질 모두를 야외 포장시험하거나 방사성 동위원소를 표지하여 시험하는 것은 불가능하므로 기본적인 실험실적 자료로서 환경에서의 노출가능성을 예측하여 환경오염성 물질을 pre-screening 하는 수단으로 사용할 수 있기 때문이다.

이러한 연구의 흐름을 요약하여 보면, 그림2와 같다.

복잡한 생태계내에서의 변화를 실제 환경에서 실험하는 야외시험(field test)은 거의 환경계 전

체를 모방하려는 실험실적인 모의환경계(model ecosystem) 시험으로 대체하려는 시도가 있어왔고 이를 좀더 간단하게 실험하기 위하여 계를 분리하여 실험을 수행하고 이를 종합적으로 해석하려는 시도들이 있다.

최근에 이르러서는 각 물리화학적 및 생물학적인 성질을 화학구조식만으로 예측하는 방법까지도 시도하고 있음을 나타내고 있다.

이러한 복잡한 단계로부터 단순한 단계로의 발전은 각각 그 나름대로의 의의와 제한점을 내포하고 있다. 따라서 어느 일정한 화학물질의 인체 및 환경생물에 대한 노출 가능성을 정확하게 예측하기 위하여는 여러 단계의 자료들이 복합적으로 보완되어야 할 것이다. 이러한 사건과 제도적인 보완 작업에 참여한 일련의 연구자들은 화학물질에 의한 위험성을 평가하기 위해서는 기존학문 분야의 공동 노력이 필요함을 인식하였고 특별히 이에 관심을 집중하려는 의도로서 응용과학으로서 환경독성학이 태동하게 되었다.

(1) 야외시험 (field test)^{(1),(2),(3)}

야외시험은 주로 농약의 등록에 필수적으로 요구되고 있다. 이시험은 작물 잔류와 토양 잔류의 두 종류를 수행해야 한다.

작물 잔류 시험은 화학물질이 오염된 작물을 통하여 일반 소비자 및 가축에 노출되는 양을 추정하여 잔류허용량을 결정할 수 있게 한다. 이외에도 작물잔류 시험결과는 지정된 방법에 준하여 실패하였는지를 밝힐 수 있는 기준이 되며 잔류허용량을 초과하는 작물로부터 그 물질을 제거하는 방법의 적부를 판정하는 기준으로 사용되기도 한다.

토양 잔류 자료는 연작되는 작물에 흡수되거나 환경생물에 흡수되어 식품오염을 초래하게 될 가능성을 예상할 수 있으며 직접적으로 인체 및 환경생물에 미칠 영향을 예측할 수 있는 자료가 된다.

잔류시험은 주로 2개 이상의 토성에서 수행되는 것을 원칙으로 하고 있다. 이는 토양의 물리화학적 특성에 따라 화학물질의 동태가 달라질 수 있기 때문이다. 그리고 야외시험은 그 화학물이 실제 사용되는 회수, 살포 방법, 제제 등에 따라 시험되는 것을 원칙으로 한다. 그리고 시험장소는 해당 작물의 주산지에서 이루어지는 것이 바람직하다.

시료의 채취, 조제, 보존, 수송 등은 잔류량의 분

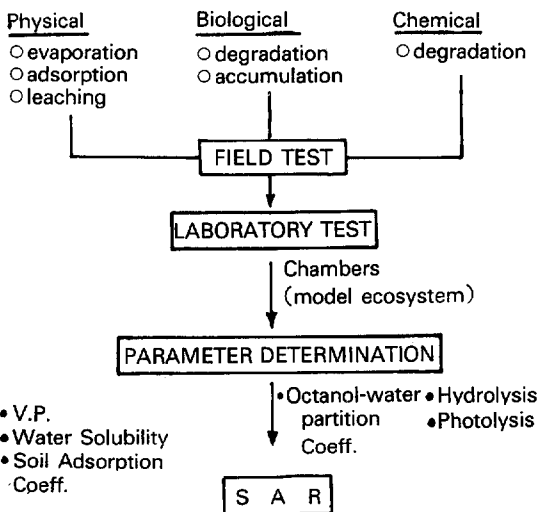


그림 2. 화학물질의 환경화학적 연구의 흐름의 연관성⁽⁸⁾

석에 지대한 영향을 주게 되므로 분석을 방해하는 불순물의 혼입을 최소화하고 분석시까지의 기간에 분해 가능성을 최소화할 수 있는 모든 방법들이 동원된다. 이 야외 시험에서 갖추어야 할 자료는 다음과 같다. 각 시료의 분석치, 회수율, 보정여부, 시료처리 과정, 시료 채취, 수송, 저장과정, 분석 표준곡선, 흡광치 혹은 조건이 기재된 GC 크로마토그램(시료 회석 배수, 주입 시료량, 계산방법 등이 포함되는 것이 바람직하다), 가능한 시험결과 사진(박층 크로마토그래피, 여지 크로마토그래피, radioautograph 등), 정확도, 정밀도, 유의성을 나타내기 위한 통계처리, 시간에 따른 잔류량의 변화도식 등이다.

야외시험의 제한점의 하나로 지적될 수 있는 것은 환경에 투입된 물질의 양적 흐름의 총량(balance)을 추적하기가 어려운 점이다. 그러므로 방사성동위원소를 이용한 balance study가 권장되거나 요구되고 있다. 그 예로서는 Roberts⁽¹²⁾의 합판상자를 이용한 시험이나 Führ⁽¹³⁾ 등의 증발산량계(lysimeter)를 이용한 시험들이 수행되고 있다. 이 시험들에서는 야외상태에서 토양을 통하여 용탈되는 물질의 양과 대사물을 추적하는데 이점을 가지고 있다.

(2) 실험실적 모의환경계 (Microcosm, model ecosystem) 시험

대체로 1년 이내의 화학물질의 행적(동태)에 대하여는 어느 정도 야외시험을 통하여 파악이 가능하다. 길더라도 연차 시험을 통하여 2년 이내에 행적시험이 마감되는 것이 관례이다. 그러나 환경문제를 제기한 먹이연쇄(food chain)를 통한 생물농축(biomagnification)에 관하여는 야외시험에서 파악하는 것이 힘들다. 생물농축의 야외시험이 가능할지라도 부단히 복잡한 구상으로 이에 상응하는 노력과 경비가 투입되어야 하며 장기간을 통한 모니터링이 수행되어야 한다. 야외시험의 구상에서 난점은 어느 화학물질이 세계적으로 사용될 것을 가정하면 세계 각지의 토양학적, 기상학적 변수와 다양한 환경생물을 어떠한 방법으로 조합하느냐 하는 문제에 직면하게 되고 장기간을 정의하는 근본 문제에 봉착하게 된다.

이러한 환경에서의 생물농축의 야외시험의 난점 외에 야외시험의 근본적인 제한요인은 1-2년도 경제적으로 장기간으로 간주될 수 있으며 토양, 기

상, 생물의 다양성에 대한 고려가 역시 쉽지 않으므로 시험결과가 나왔더라도 국지적이거나 범세계적인 다양한 환경조건에서의 그 화학물질의 행적에 대하여는 의문점으로 남는 수가 많게 된다.

이런 문제점을 보완하기 위한 방법들이 개발되었는데 그 대표적인 예로서는 그림3에 보인 바와 같이 Metcalf⁽¹⁴⁾ 등이 시도한 모의환경계(model ecosystem)이다. 석영사를 토양으로 삼고 달팽이, 물벼룩, 조류(algae), 프랑크톤 배양액의 수생 생태계를 18일간 유지한 뒤에 육상식물인 수수에 해수소택지유충(salt-marsh caterpillar larvae), 장구벌레와 최종적으로 담수어류를 투입한다. 약 1개월만에 투입된 생물체 전부를 분석하므로써 환경내 생물체 먹이연쇄에 의한 농축가능성을 예측하게 되는 것이다. 이 방법은 단기간에 수행되면서도 다양한 환경계를 조합할 수 있는 장점을 지니고 있다.

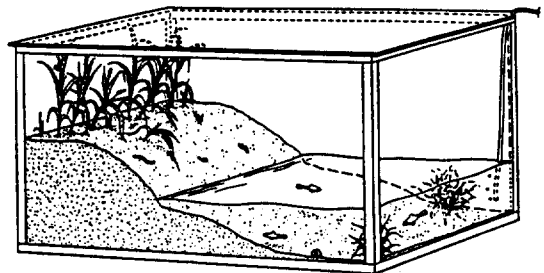


그림 3. 수생생태계를 대표하는 모의 환경계시험⁽⁴⁾

그러나 이 방법은 육상생태에 대한 고려가 빈약하고 기상학적인 고려가 없어서 환경 전반에 걸친 화학물질의 행적을 예측하는데는 어려운 점이 있었다. 따라서 수생생태계를 대표하는 Isensee⁽¹⁵⁾ 등과 Ohkawa⁽¹⁶⁾ 등의 모의환경 시험계와 Gillet 및 Gile⁽¹⁷⁾의 육상생태계 모의환경시험계가 별도로 시도되었다. Isensee의 수생생태계는 Metcalf의 수생생물과 유사하나 물벼룩의 생존수를 유지하기 위하여 담수어와 물벼룩 사이에 간막이를 설치한 것이다(그림4). Gillet와 Gile의 육상생태계는 그림5에 보인 바와 같이 토양의 다양성이 도입되고 식물은 라이그라스와 알팔파가, 지렁이, 선충이 토양내 서식 동물로서, 쥐머느리(pill bug), 바구미 유충(meal worm larvae), 달팽이, 귀뚜라미, 들쥐(vole) 등이 토양

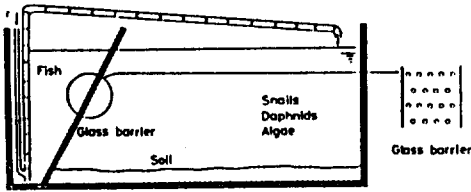


그림 4. 변개된 Isensee의 모의 수생생태계⁽¹⁶⁾

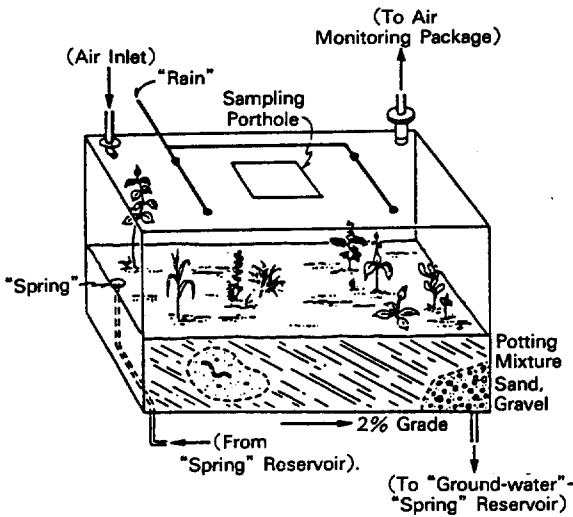


그림 5. 육상생태계를 대표하는 모의 환경계 시험⁽¹⁴⁾

표면 및 식물 서식동물로 도입되어서 다양한 생물계를 사용하고 있다. 여기에는 풍속과 강우를 모방하는 장치도 구비되고 있다. 이런 시험계를 통하여 육상생태계와 수생생태계의 차이점이 밝혀졌는데, 화학물질이 주위로부터 생체내로 분배되어 평형상태가 유지되는 속도는 수생 생태계가 빠르며 며칠내에 평형상태에 도달한다. 그러나 생물농축이 단순한 분배가 아닌 흡수에 의존할 때는 상당한 시간이 소요된다. 또한 분배계수가 높은 화학물질(지용성화합물)의 생물농축은 육상생태계에서는 토양에의 흡착과의 경쟁관계로 인하여 수생생물에 농축되는 경향이 상당히 다른 것으로 나타난 것이다.

Nash⁽¹⁷⁾ 등은 농경환경계 (agroecosystem) 를 구상하였는데 이는 농약의 토양, 식물, 대기로의 분포를 측정하므로써 실제 농경작업에서의 농약의 동태를

예측하기 위한 방법이다.

화학물질의 토양에서의 생물적 및 무생물적 변화를 복합적으로 시험할 수 있는 방법이 많이 개발되었다. Guth⁽¹⁸⁾가 요약한 바에 의하면 토양 관류계 (soil perfusion systems), 토양생물측정계 (soil biometers), 기체연속주입계 (gas flow-through system), 종합계 (integrated system) 등으로 나누어져 있다. 이 중에서 한계점은 있지만 간단하게 많이 쓰이는 것으로는 두번째 부류에 속하는 soil biometer로서 Bartha와 Palmer⁽¹⁹⁾의 것이 있고 Laskowski⁽²⁰⁾ 등에 의해 개선되어 사용하고 있다(그림 6). 이 방법은 주로 방사성 동위원소로 표시된 물질을 토양에 주입하고 변화되어 생성된 CO₂를 KOH와 NaOH로 포집하여 정량하며 외부에서 들어오는 CO₂를 제거하는 장치로 구성되어 있다.

이상과 같은 복잡한 모의 환경생태계는 독일의 GSF(Gesellschaft für Strahlen und Umwelt Forschung)내 환경화학 연구소 (Institut für Öcologische Chemie) group에 의하여 좀더 단순화되었다. Freitag⁽²¹⁾ 등에 의한 조류 (alage) 및 어류 (fish) 농축시험(그림 7) 및 활성 오니에 의한 농축 및 분해시험(그림 8) 등이다. Kloskowski⁽²²⁾ 등에 의해서 토양-식물계를 단순화하였다(그림 9). 이들

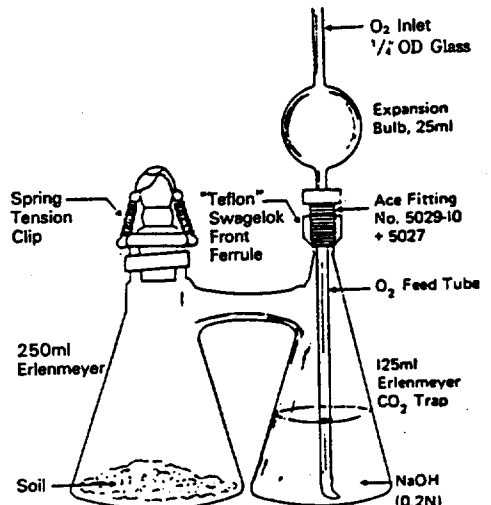
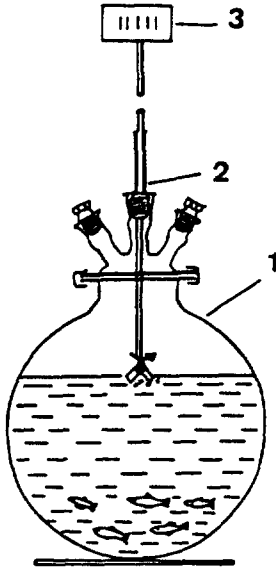
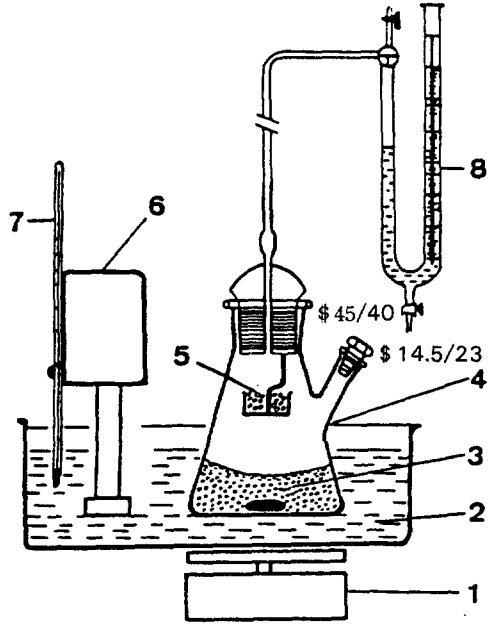


그림 6. Biometer flask⁽¹⁹⁾



Fish bioaccumulation test apparatus.
 (1) Flask (12.5 liters), (2) KPV stirrer,
 (3) stirrer motor.



Biodegradation test. (1)Magnetic stirrer, (2)water bath,
 (3)activated sludge suspension and magnetic bar, (4)
 incubation vessel, (5)soda lime adsorber, (6)immers-
 ion thermostat, (7)thermometer, (8)manometer (H₂O).

그림 7. 어류 생물농축 시험 (독일 GSF)⁽²⁰⁾

그림 8. 활성오일에 의한 미생물 분해시험(독일 GSF)⁽²⁰⁾

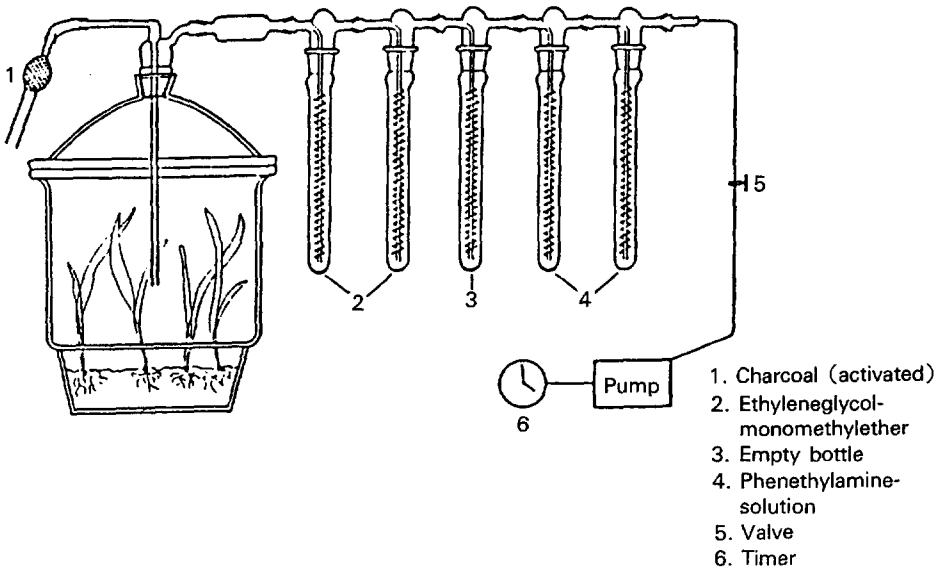


그림 9. 토양-식물계를 이용한 모의환경계 시험(독일 GSF)⁽²¹⁾

실험방법은 모두 방사성 동위원소를 사용하여 1 일 내지 7 일 정도에 완료되는 간단한 방법이다. 따라서 이러한 방법에 의해서 많은 종류의 화합물이 환경동태를 비교 연구하는데 공헌해 왔다. 그 결과에 대하여는 이⁽²²⁾에 의하여 개괄되어졌으므로 여기서는 생략한다.

일본에서는 미생물에 의한 분해도 시험과 어류 체내 농축도 시험을 신규화합물에 대하여 의무적으로 요구하고 있다.⁽²³⁾ 미생물에 의한 분해도 시험은 전국의 하천수와 하수처리장의 반송오수를 10개소 이상에서 채집하여 실험실에서 기본배양액에서 그림10에 보인 계획에 의하여 배양하면서 그 일부를 화학물질의 분해도 시험에 공시하여 14일 동안 관찰하고 BOD 및 화학분석에 의한 분해도를 산출한다. 화학물질의 어류체내 농축도 시험은 그림11과 같은 장치를 사용하여 실시한다. 건강한 일본산 송사리(0.15 - 0.5 g)를 사용하여 먼저 48시간 LC50(=TLm)를 산출하므로써 본 시험에 사용할 시험물질의 농도의 기준을 잡는다. 본 시험에는 약 10cm(체중20 - 40kg)의 잉어를 사용한다. 적절한 사육조건에서 앞에서 구한 LC50의 1/100, 1/1000, 1/10,000 농도중 분석 가능한 두 농도에서 시험을 8주간 수행한다. 1 - 2주간 마다 사료급여후 10시간이상 경과한 때에 2 - 3마리를 채취하여 적절한 분석 방법으로 물질의 양을 정량한다.

농축도는

$$CFn = \frac{Fn - FB}{W}$$

로서 산출되고 이때 CFn은 n주간째의 농축배율, Fn은 시험기간 n주간째의 어체중의 농도, FB는 blank로서 시험전 및 시험종료시의 무처리 어체중의 시험물질 농도의 평균치, W는 시험수조 중의 시험물질 평균농도를 의미한다.

(3) 환경동태 요인 시험

야외 및 모의 환경시험계에서 얻을 수 있는 자료의 제한점은 환경내에서 일정 화합물의 동태 파악은 가능하지만 그 원인에 대하여는 전혀 해답을 주지 못한다. 원인이나 기작에 의한 의문이 해결되지 않을 때는 그 자료가 화합물 자체 혹은 그 시험조건 및 방법에 국한된 결론 밖에 도출될 수 없다. 야외 및 모의 환경시험에 투입된 노력에 비하

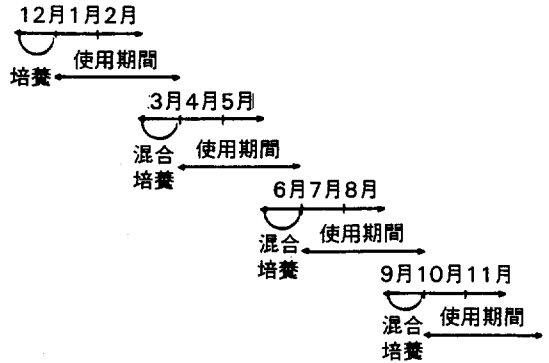


그림 10. 화학물질의 미생물 분해도 시험에 사용되는 균주배양 일정표⁽²³⁾

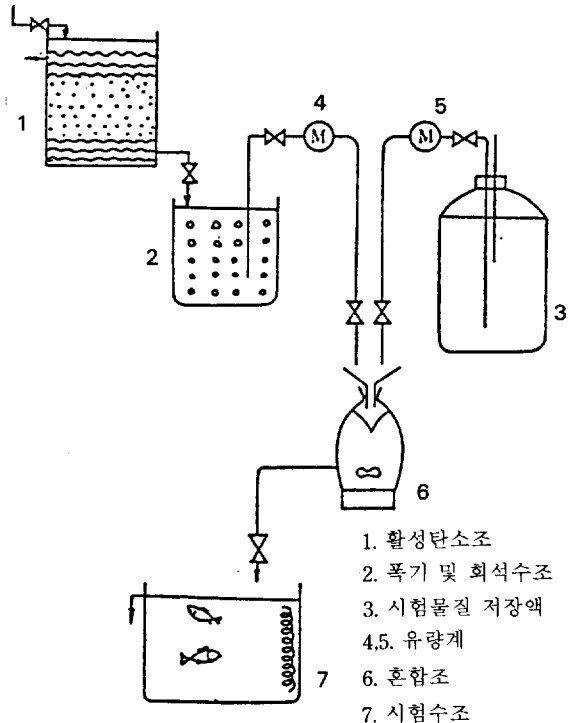


그림 11. 화학물질의 어류체내 농축도 시험⁽²³⁾

여 그 화합물의 환경내에서의 행적에 관하여는 너무나 제한된 정보만을 우리에게 제공하게 되는 것이다. 따라서 그러한 직접적인 실제시험과 아울러 결과에 도달하게 되는 요인에 대한 기본시험이 필요하게 된다. 실례로서 미국의 플로리다 지방에서 오렌지에 사용하는 농약이 우리나라의 제주도에서

사용될 때에는 어떠한 잔류 양상을 보일 것인가? 라는 의문을 해결하기 위해서는 실제 야외시험은 두 장소에서 각각 이루어져야 한다. 그러나 그 화합물이 갖는 환경동태의 주요 요인이 파악된다면 한 장소에서의 결과로 다른 상황에서의 행적이 충분히 예상될 수 있고 그만큼 시간과 노력이 절약될 수 있는 것이다. 수백-수천개의 새로 개발되는 농약이 백여개국에서 수많은 작물에 시험됨을 생각해 보면 알 수 있다. 이러한 실례는 아직 실제에 적용될 정도로, 즉 실제 야외시험을 생략할 정도로 성숙되지는 않았지만 이 분야에서의 연구 노력의 많은 부분이 원인과 기작을 알고자 하고 있는 것을 보면 그 필요성은 충분히 인식되고 있다고 할 수 있다.

환경동태 요인 시험은 주로 화학물질의 물리적인 특성을 대표하는 수용성, 증기압, 토양흡착계수 등이 있고, 생물학적인 농축을 대표하는 옥타놀-물 분배계수, 화학적인 변화의 요인인 가수분해, 광분해, 해리상수 등이 있다.

1) 수용성 (Water solubility)⁽²⁴⁾

수용성은 일정한 온도와 압력하에서 화합물의 포화 수용액에 녹아 있는 평형 상태에서의 농도로 정의되고 이 상수는 화합물질의 환경내 거동과 분포를 결정하는 주요 원인이 된다.

수용성은 화합물의 토양흡착과 수계로부터의 증발에 관계되는 주요 인자의 하나이다. 물은 모든 생물이 생존하고 있는 환경의 일부이며 생체의 구성 주성분이므로 화합물이 생체에 접촉하고 생체내로 이동하는데 필요한 매개체이다. 따라서 수용성은 환경내 이동과 생체내로의 침투에 중요한 인자가 되는 것이다. 또한 수중에서 진행되는 가수분해, 광분해, 산화, 환원 생분해 등은 그 화합물의 수용성에 의하여 영향을 받는다.

수용성을 측정하는 원리는 포화 수용액을 제조하는 방법과 같다. 일정 온도에서 화합물을 물에 녹이면서 농도를 시간별로 측정하여 그 농도가 plateau에 이르면 평형이 이루어진 것으로 간주하고 그 물이 포화되었다고 생각하고 이 때의 농도를 수용성으로 한다. 측정에는 플라스크법과 칼럼용출법이 있는데 전자는 대개 수용성이 0.01g/l 이상인 경우에 사용되고 후자는 그 이하인 화합물에 적용된다. 플라스크법은 화합물을 적합한 용매에 녹여 용

기에 넣은 후 용매를 날려 보낸다. 순수한 물을 가하여 teflon을 입힌 마그네틱 바를 이용하여 약 24시간 용해 시킨 후 12,000×g에서 30분 이상 원심분리하여 상정액을 분석하는 방법으로 용해시간과 농도관계 그림표에서 plateau에 이르도록 실험한다. 이때 500ppm 이상인 물질은 용매에 녹이지 않아도 되며 원심분리 대신 여과과정을 거쳐도 된다.

칼럼용출 방법은 그림 12와 같은 장치를 이용하여 칼럼내에 화합물이 입혀진 충전제 (chromosorb W)를 채우고 일정 유속으로 (25ml / 시간) 순수한 물을 순환시켜 시간별 농도변화를 찾아낸다.

이상의 두가지 방법에서 주의하여야 할 점은 사용하는 물의 순도가 유지되어야 하며, 이를 위해서 미국에서는 ASTM type II 이상인 것을 사용하도록 권장하고 있다. 또한 용해 조작시 형성되는 콜로이드와 유탁액을 제거하는데 주의를 기울여야 한다. 만약 수용성 시험중 분해가능성이 있는 화합물이라면 가수분해도의 측정이 선결 되어야 할 것이다.

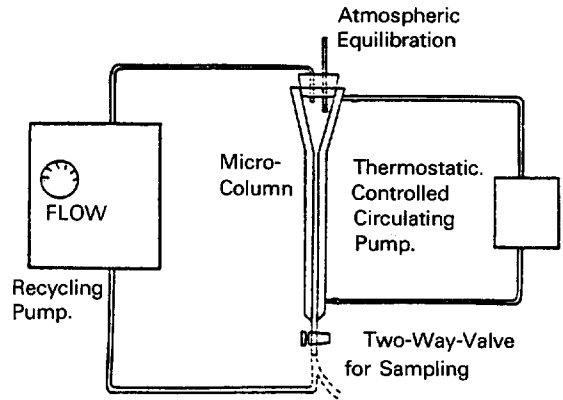


그림 12. 칼럼 용출법에 의한 수용성 측정장치⁽²⁵⁾

2) 증기압 (Vapor pressure)

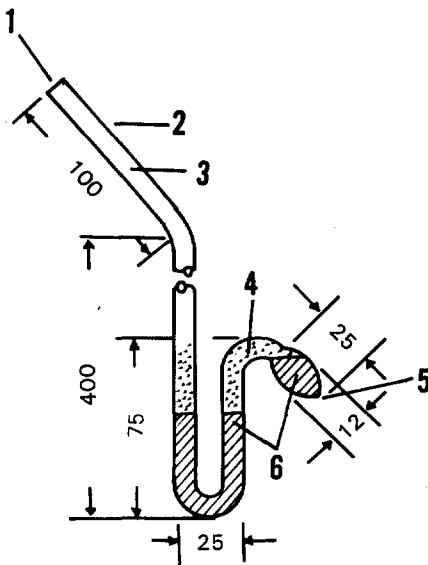
증기압은 화학물질이 대기로 증발되는 요인 중의 하나이다. 증발에 관여하는 인자는 증기압 외에 화학물질이 증발표면 (evaporative surface) 으로부터 확산에 관여하는 환경 요인 (예, 풍속) 등이 있다. 일정 공간에 노출된 액체 혹은 고체는 그 분자가 계속적으로 외부로 방출되며 동시에 그 기체의 농도에 따라

다시 원래 물질로 되돌아와 응축된다. 이 방출과 응축현상이 평형상태에 도달하였을 때를 그 온도에서의 증기압이라 한다.

증기압을 측정하는 방법에는 OECD⁽²⁵⁾에서는 5 가지로 분류하고 있으나 수용성에서와 마찬가지로 고휘발성 물질과 저휘발성 물질로 나누어 두가지 시험이 주로 사용되고 있다.⁽²⁶⁾

상온에서 0.75torr이상인 물질(0.75torr - 7.50 torr)은 isoteniscope 방법에 의존하고, 그 이하인 물질은 개스포화법(gas saturation method)에 의하여 측정한다.

Isoteniscope법은 그림 13과 같은 장치를 이용하여 측정하려는 물질을 채우고 비등점까지 온도를 올려서 물질에 함유된 개스를 제거한다. 가난한 계란형 공간에 개스가 제거된 순수 용액이 충분히 차게 되면 U자관을 측정온도로 내리고 증기압에 의한 U-자관 내의 용액의 높이 차이를 상쇄하는데 필요한 질소개스의 압력을 측정하여 그 물질의 증기압으로 한다.



- 1 = Pressure control measurement system
- 2 = Tube, outer diameter 8 mm
- 3 = Dry nitrogen in pressure system
- 4 = Sample vapour
- 5 = Small tip
- 6 = Liquid sample

그림 13. Isoteniscope에 의한 증기압 측정⁽²⁵⁾

고체의 경우는 계란형 공간에 표준 액체(수은, 실리콘 오일, 프탈레이트 등)를 넣고 측정하려는 물질을 U자관에 채운 뒤 온도를 높여서 개스를 제거하고 난 뒤 기구를 기울여 표준액체가 U자관으로 들어가도록 기울인 후 측정온도에서 용액의 높이 차이를 상쇄하는데 필요한 질소개스의 압력을 그 물질의 증기압으로 한다. 개스포화법(gas saturation method)은 Spencer와 Clith⁽²⁶⁾에 의해 1969년에 시도되었고 대부분의 농약과 환경오염물질의 증기압을 측정하는데 적용될 수 있다.

그림14와 같은 장치를 이용하여 모든 기구가 ± 0.5℃의 범위가 되도록 항온으로 만들고 그림15와 같은 칼럼에 대상물질로 도포된(coating) 석영사를 채운 뒤 일정 유속의 질소개스를 통과시켜 질소개스에 함유되어 나오는 물질의 양을 정량한 다음 이상기체법칙(ideal gas law)에 의하여 그 물질의 증기압을 계산한다. 이 방법에 대하여는 김⁽²⁷⁾등이 상세하게 설명하였고 실제적인 실험을 수행한 바 있다. 개스포화법에 의한 증기압 측정 중 어려운 과정으로서 극히 낮은 증기압을 갖는 물질은 분석법의 감도 여하에 따라 1개월 이상 장치를 가동해야 하는 경우도 있다. 또한 포화시의 개스 유속을 결정하는 것도 기술상의 난점으로 간주된다.

3) 토양 흡착 계수(Soil adsorption coefficient)

화학물질의 토양 흡착 능력은 화학물질이 토양 표면에서의 이화학적 변화에 영향을 줄 뿐만 아니라 토양과 접하고 있는 수계, 대기에서의 동태에 영향을 미친다. 화학물질의 토양 공극내의 확산, 토양 표면수로부터의 휘산, 토양표면에서의 분해, 토양칼럼을 통한 지하수 오염에 이르기까지 토양흡착능력에 의하여 그 속도가 결정되어질 수 있다. 따라서 토양흡착계수는 환경내에서 화학물질의 이동을 예측하는데 필수적인 요인으로 간주된다.

토양흡착은 토양계와 다른 환경계에 분배되는 화학물질의 농도가 평형상태에 도달하였을 때 단위 토양중량에 흡착된 화학물질의 양과 평형상태의 화학물질의 농도로 표시되고 이 관계를 흡착등온식(adsorption isotherm)이라 한다. 여기에는 토양과 대기의 관계에 잘 적용되는 Langmuir식과 토양계와 수계에 잘 적용되는 Freundlich식이 있다.

환경계에서 중요하게 생각되는 것은 토양계와 수계로서 이에 대한 시험방법이 주로 수행되고 이때

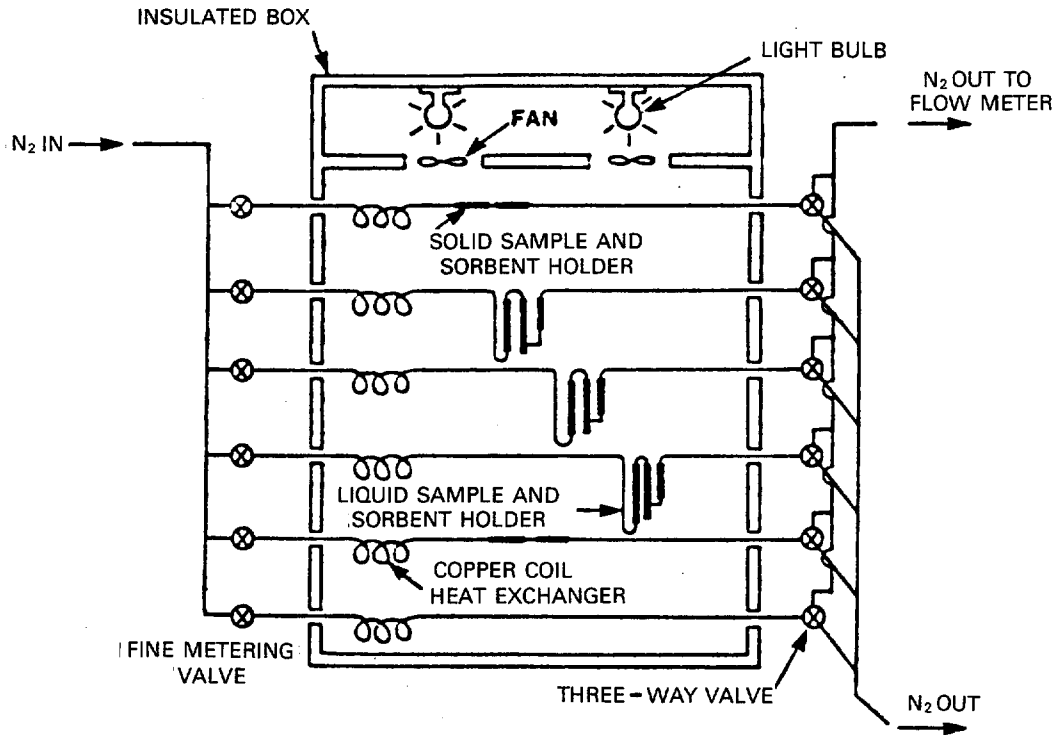


그림 14. 증기포화법에 의한 증기압 측정 장치⁽²⁴⁾

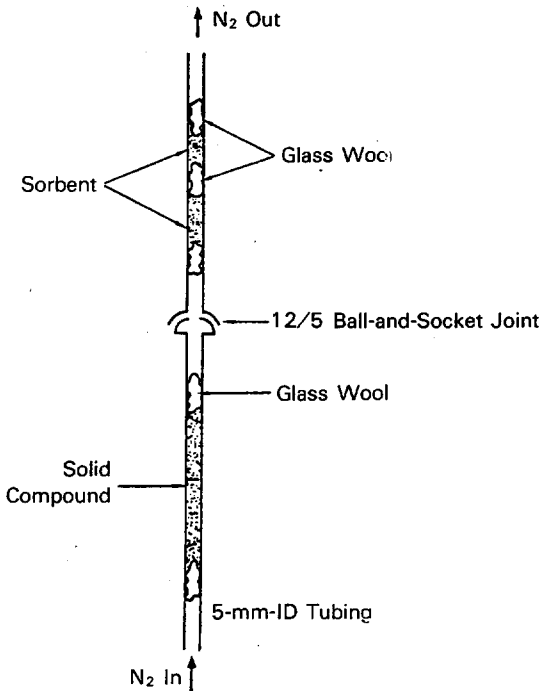


그림 15. 증기포화법에 사용되는 칼럼

Freundlich 흡착등온식이 사용된다.

세가지 토양(pH범위 : 4 - 8, 유기물 함량 : 0.6 - 3.5%)을 50°C이하에서 건조하여 100mesh 이하의 균일한 토양으로 조제한다. 시험중 미생물에 의한 분해요인을 제거하기 위하여 물리적 화학적으로 멸균한다. 흡착시험에는 0.1M CaCl₂가 함유된 증류수나 탈이온수를 사용하는데 이는 원심분리에 용이하게 하며 양이온 교환을 최소화 하기 위한 것이다. 시험에 사용되는 토양과 물의 비율은 1/10이상 이 되도록 권장하고 있다. 토양과 물을 일정비율로 가한 뒤 격렬히 진탕한 후 정온기에 어두운 상태로 저장하면서 시간별로 수중 농도를 측정한다. 토양시료로부터 물을 분리 하는 작업은 원심분리기를 사용한다. 평형 상태에 도달하는 시간을 구하기 위한 시험을 위하여는 그 화합물은 포화농도의 반량이나 5mg/l 이하로 사용한다. 그 후에 흡착등온식을 구하기 위하여 화합물의 농도를 변화시킨다. 이 과정을 통하여 시간별 흡착농도 변화와 흡착등온곡선이 구하여지고 흡착등온곡선에서

$$\log C_s = \log K + (1/n) \log C_e$$

Cs : 평형상태에서 화합물의 토양중 농도 (ppm)

K : Freundlich 흡착상수

1/n : 상수

Ce : 평형상태에서 화합물의 용액중 농도 (ppm)

관계를 이용하여 토양흡착계수(K)를 구하고 이는 다시 유기물 함량을 감안한 토양흡착계수인 Koc 값을 구하게 된다.

수용성이 극히 낮아 정량한계에서 검출이 되지 않는 화합물이나 시험중 분해되기 쉬운 물질은 이 방법으로 측정하는 것이 불가능하다.

국내에서도 임⁽²⁸⁾ 등, 한⁽²⁹⁾ 등, 김⁽³⁰⁾ 등이 연구를 수행한 바 있으므로 이들의 연구방법과 비교검토하여 참고할 수 있을 것이다.

4) 옥타놀-물 분배계수 (Octanol-Water partition coefficient)

Fujita⁽³¹⁾ 등이 1964년에 소개한 이래 옥타놀-물 분배계수는 주로 의약품이 생체조직내 흡수 및 분포를 예측하는 지표로 사용되어 왔으나 Neely⁽³²⁾ 등에 의하여 화합물질이 환경계로부터 생체 및 유기물로 축적되는 지표로 사용되기 시작하였다.

어떤 환경생물이 급성치사량보다 낮은 농도에서 는 위해증상이 나타나지 않을지라도 그 물질이 생체에 축적되는 특징이 있을 때는 독성이 지연되어 나타날 수 있으므로 이러한 축적성을 예측할 수 있는 지표인 옥타놀-물 분배계수는 환경독성을 평가하는데 중요한 요인의 하나로 간주된다. 환경문제를 야기한 대부분의 화합물질들이 급성독성은 강하지 않으나 생체축적성에 의하여 만성적인 영향이 야기되는 것으로 밝혀짐으로써 옥타놀-물 분배계수는 화합물질의 물리화학적 특성중에서 기본적인 계수로 자리를 굳혀가고 있다.

옥타놀-물 분배계수(Kow)는 일정온도에서 화합물질이 저농도로 n-옥타놀과 물에 녹아 평형상태에 있을 때의 물 농도비로 정의된다.

이는 다음식과 같이 나타낸다.

$$Kow = \frac{C_{\text{옥타놀(물농도)}}}{C_{\text{물(물농도)}}$$

이 Kow는 Pow로 사용되기도 한다. 또한 이 상수

는 대수값으로 log Kow 혹은 log Pow로 변경시켜 통용되는 수도 있고 특히 여러 화합물의 수치를 비교하는 데는 log Kow가 많이 사용된다. 이때 수용액에서 해리되는 화합물에 대하여는 별도의 고려가 필요하다.

측정의 원리는 간단하다. 일정온도에서 n-옥타놀과 물을 동일용기에 넣고 대상 화합물질을 가하여 농도 평형을 확인한 후에 두 용매에 전이된 화합물질의 농도를 측정하면 된다. 그러나 실제에 있어 여기에 사용되는 n-옥타놀과 물의 순도 유지, 평형상태의 결정, 휘발성 화합물에 대한 고려, 측정 감도가 낮은 화합물에 대한 정량 등 기술상의 어려운 문제가 개재되어 있다. 그리고 실험에 의하여 측정되어지는 옥타놀-물 분배계수의 범위는 10⁻¹⁰이다. 10이하인 경우는 <10, 10⁶ 이상인 경우는 >10⁶으로 표시하면 되는데 10 이하일 때는 생물농축의 가능성이 거의 없고, 10⁶ 이상일 때는 생물농축가능성이 대단히 큰 것으로 간주될 수 있기 때문이다.

사용하는 n-옥타놀은 산 알칼리용액 및 탈수, 2회 증류과정을 거쳐 순도가 99.9% 이상되는 것을 사용하며 물은 초자재 장치에서 2회 증류된 것을 사용한다. n-옥타놀은 사용전에 물로 포화시킨다. 대상 화합물질은 n-옥타놀에 용해시켜 0.01-0.001M이 되도록 준비한다. 밀봉되는 마개가 달린 원심분리용 용기에 1-5ml의 n-옥타놀 용액을 넣고 20-40ml의 물을 가한다. 이때 가하는 물의 양은 임의로 결정하는데, 물질의 정량에 불편이 없는 양으로 한다. 또 한가지 요건은 원심분리 용기에 거의 차게 하여 용기내의 공기층을 최소화하는 것이 필요하다. 용기를 25°C 혹은 다른 측정온도에서 약 1시간 온건하게 진탕하고, 측정온도에서 20분간 원심분리한다. 이 때 유탕 입자를 깨뜨리고 옥타놀-물층을 완전히 분리하게 된다. 원심분리 조건은 유입 입자가 없어지는 것을 확인하면서 시행착오에 의하여 구한다. 원심분리과정이 끝나면 피펫으로 옥타놀 층과 물층을 각각 일부를 채취하여 시험 물질의 농도를 측정한다. 처음 옥타놀에 용해하는 시험물질의 농도를 달리하므로서 평형상태를 확인한다. 수용액에서 가역적으로 해리되는 화합물은 일정 pH 완충용액을 몰대신 사용하여 Kow를 측정한다. 이와 같은 방법을 플라스크진탕법 (shake-flask me-

thod)라고 한다.

이상과 같은 플라스크진탕법의 번거로움을 보완하기 위하여 Veith³³⁾ 등은 역상 고속액체 크로마토그래피(reverse-phase HPLC)를 이용하여 옥타놀-물 분배계수를 추정하는 방법을 시도하였다. 이는 옥타놀-물 분배계수가 극히 큰 물질이나 혼합물로서 플라스크 진탕법으로 측정이 불가능한 경우에 보완될 수 있는 장점을 지니고 있다. 원리로 볼 때 화학물질의 역상고속액체 크로마토그래피의 tR(retention time)은 옥타놀-물 분배계수와 비례하는 것을 이용하는 것이다.

De Voe³⁴⁾ 등은 수용성 측정에서와 같은 칼럼용출법을 이용하여 옥타놀-물 분배계수를 측정한다. 시험물질이 1.0% (w/w) 농도로 함유된 n-옥타놀을 100-120 mesh chromosorb W이 충전된 칼럼에 통과시켜 도포하고 연이어 물을 통과시키면서 농도가 평형상태로 될 때를 포착하여 분배계수를 구한다. 이 때 정량하는 방법으로서 추출 칼럼을 사용하여 HPLC에 직접 연결하는 방법과 용매로 추출하여 개스크로마토그래피로 분석하는 방법이 있다. Veith 등의 방법과 De Voe 등의 방법은 플라스크 진탕법의 보완적인 방법으로 추천된다.

5) 가수분해(Hydrolysis)

물은 환경중에서 가장 많이 분포된 물질이다. 바다, 강, 호수를 비롯한 수계는 물론 토양 및 대기도 수분을 함유하고 있다. 따라서 환경에 방출된 화학물질은 항상 물과 접촉하고 있다. 그러므로 물에서의 분해, 특히 가수분해는 그 물질의 안정성 및 점차적인 분해 단계에서 무생물적인 분해의 기본인자로 생각된다. 가수분해는 물분자 중의 원소가 결합된 반응물이 생성되고 본래 화학물질의 결합이 한개 이상 분리되는 반응으로 정의된다.

환경중에서 화학물질의 양에 비하여 물의 양이 충분한 상태이므로 반응의 속도는 주로 화학물질의 농도에 의하여 결정되어서 일차반응속도식에 의존한다.

실험방법은 3 - 5 종류의 완충용액(pH: 1, 3, 4, 7, 9, 11)에 화학물질이 0.01M 이하 혹은 포화농도의 절반이 되는 농도로 녹이고 일정 온도의 암소에 저장하면서 시간별로 시료를 채취하여 pH

미터, 자외가시광선 분광광도계, 전기전도계, 개스크로마토그래피, 고속액체 크로마토그래피 등을 이용하여 원래물질 혹은 반응생성물을 정량한다.

여기에서 가수분해 상수와 반감기가 계산된다. 실험에 사용되는 기구나 완충용액은 미생물 분해에 의한 방해 제거하기 위하여 멸균된 것을 사용한다. 가수분해 실험의 온도는 적어도 10°C 차이가 나는 두가지 온도에서의 자료가 필요하고 외삽법에 의하여 상온에서의 가수분해 정도를 알고자 할 때는 상온보다 높은 세 온도에서의 가수분해 상수로부터 외삽(extrapolate)에 의하여 추정한다.

6) 광분해(Photolysis)

화학물질이 환경내로 유출될 때 수계, 토양계, 대기로 이동한다. 이때 무생물적으로 받는 화학변화의 상당한 부분을 차지하는 것이 광분해이다. 상당한 부분이라고 언급하는 이유는 아직 광분해에 대한 정량적인 연구들이 많지 않으므로 단정적으로 이야기 할 수 없거나 화학물질의 종류에 따라 광분해와 무관한 물질들이 많이 있기 때문이다. 그러나 화학물질에 대한 광분해의 정량적인 실험은 그 물질의 환경내 변화를 추정하는 주요한 인자가 되는 수가 많다.

광분해 실험에 해당되는 화학물질은 자연광의 파장인 290nm 이상에서 흡수하는 물질이어야 하므로 모든 화합물이 이 시험에 공시 되는 것은 아니다. 따라서 290nm 이상의 흡수 스펙트럼이 기본적으로 검토되어야 한다.

광분해에 대하여는 수중광분해, 토양광분해, 대기중 광분해로 나뉘어서 시험되나 여기에서는 수중광분해에 대하여 소개한다.

수중광분해는 스크리닝시험과 광분해시험의 두 단계로 이루어진다. 스크리닝시험에서는 시험물질의 적량을 용매에 녹여 자외선-가시광선 분광스펙트럼을 얻은 후 각 대표 파장에서의 물흡수계수와 수중광량으로 광분해 상수(KpE)를 얻고 반감기를 추정한다. 여기에서 광분해가 신속한 물질로 밝혀지면 실제 광분해시험을 실시한다.

시험물질을 순수한 물(규격에 맞는)에 수용성의 절반이하의 농도이면서 흡광도가 0.05 이하가 되도록 용해한 용액을 석영으로 된 초자 용기에 넣는다. 자연광하에서 시간별로 시료를 채취하여 원

래 시험 물질의 잔존량을 정량하고 이를 원래 농도의 반 이하가 될 때까지 계속한다.

동시에 화학적인 복사량계 (actinometer)를 사용하여 실험시에 투과한 태양광도를 측정하여야 한다. 주로 사용되는 복사량계로는 Dulin과 Mill⁽³⁶⁾이 제안한 p-nitroanisole/pyridine계(분-12 시간대에 적용)와 p-nitroacetophenone/pyridine 계(시간-2 개월에 적용)가 있다.

광분해실험시에도 여타의 기본시험과 마찬가지로 미생물적인 분해 가능성을 제외하기 위하여 용기 및 사용 시약을 멸균하는 과정이 필요하다. 이 시험의 결과로서 다음과 같은 식을 이용하여 시험 물질의 양자수득율(quantum yield)을 구하고 이는 계절 및 위도에 따른 광분해상수 및 반감기를 구할 수 있게 한다.

이를 관계식으로 나타내 보면,

$$\phi^{\circ}E = \frac{kp^{\circ} \sum \epsilon_{\lambda}^{\circ} L_{\lambda}}{kp^a \sum \epsilon_{\lambda}^a L_{\lambda}} \times \phi^a E$$

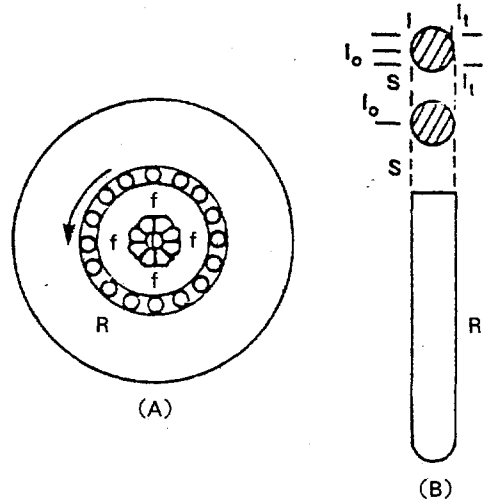
- c : 시험대상물
- a : 복사량계
- kp : 실험에 의한 광분해상수
- ϕE : 양자수득율
- ϵ : 몰흡수계수
- L : 수중광량
- λ : 파장
- $\phi^a E$: 복사량계의 양자수득율
(= 0.0169[PYR])

$$K_p^{\circ} E = \phi^{\circ} E \sum \epsilon_{\lambda} L_{\lambda}$$

$$(t1/2)_{\min} = \frac{0.693}{(K_p^{\circ} E)_{\max}}$$

이런 과정을 통하여 봄에 측정된 시험치로서 여름 혹은 겨울의 어느 시점에서의 광분해상수와 반감기가 예측될 수 있다.

실제 시험을 통한 양자수득율의 추정방법은 영하의 기온에서는 측정이 불가능하고 그 정밀도가 떨어지므로 실험실적인 상태에서 양자수득율을 측정하는 장치가 추천되고 있다.⁽³⁶⁾ 그림 16과 같이 Merry-go-round 장치로 불리는 이 장치는 시료가 광이 균일하게 조사되도록 설계되어 있고, 일정



(A) "MERRY-GO-ROUND" APPARATUS
(B) CYLINDRICAL CELL (R). I₀=INCIDENT LIGHT ; I_t=TRANSMITTED LIGHT PASSED THROUGH CELL ; S=SLIT

그림 16. 광분해시험을 위한 merry-go-round 장치⁽²⁴⁾

한 파장만 분리하는 필터, 시료관을 고정하는 기구등으로 이루어지며 자연광과 유사한 광원이 설치되어 있다.

7) 해리상수 (Dissociation constant)

화학물질이 수중에서 가역적으로 두개이상의 물질(이온화)로 분리될 때 그 평형정수가 해리상수이다. 해리된 상태와 해리전의 상태는 환경에서 토양, 퇴적물 (sediment), 생체조직 세포에의 흡착 및 흡수에 매우 다른 양상을 지니게 되므로 해리되는 특성을 가진 화학물질의 경우는 이에 대한 시험이 필요하다.

± 1 °C로 조절되는 일정온도(20°C 혹은 25°C)에서 0.01M 이하이거나 포화용액의 절반농도 이하로(이중 낮은 쪽을 택함)수용액을 만들고 적정방법, 분광광도계, 전기전도도 등으로 이온화에 의한 물리화학적 변화를 정량한다. 수용액을 만들 때 난용성인 물질은 소량의 용매를 사용하고, 유탁액은 Tyndall beam으로 그 존재를 검사하여야 하며, pH에 따른 해리상수를 구할 때에 사용하는 완충용액의 농도는 0.05M이하이어야 한다.

(4)환경동태 요인 추정방법

화학물질의 환경동태를 요인별로 실험실에서 시험하는 방법을 개발하였으나, 이 방법 역시 표준방법으로 수행될 때 상당한 시간과 노력을 요하는 것이 사실이다. 따라서 좀더 간이하게 그 화합물의 구조로부터 환경동태 요인을 예측하려는 시도가 계속되고 있다. 이 대표적인 노력의 집대성은 Lyman⁽³⁷⁾ 등이 “화학적인 특성 예측법”에 종합하고 있다.

예측에 의한 환경동태 요인의 추정은 정확성에서 뒤떨어지기는 하지만 구조식 하나만으로 다양한 요인을 추정하므로 다수의 화합물의 환경 오염 가능성 스크리닝을 한다거나 실험실적인 혹은 야외시험의 계획단계에서 시행착오를 줄이는 방편이 될 수 있는 등의 나름대로의 장점을 지니고 있다. 환경동태 요인을 추정하는데도 주로 두가지 방법이 쓰이게 되는데, 첫째는 어떤 환경화학적 동태 요인은 그 화합물의 분자 구조의 원소들이 갖는 물리화학적 특성들의 합이라고 가정되어 만들어지는 관계식으로 예측하는 것이고, 둘째는 주변 동태 요인의 실험적인 관계식을 이용하여 계산되는 방법이다.

첫째방법은 여러 종류의 화합물에 널리 적용되는 장점을 가지고 있으나 정확도가 떨어지는 단점이 있고, 둘째방법은 유사한 부류의 화합물에는 정확하게 적용되는 장점이 있으나 관계식을 만들때 사용된 부류와 다른 화합물에는 사뭇 다른 결과를 초래하는 단점을 가지고 있다.

예를들면 hexachlorocyclohexane의 옥타놀-물분배계수의 대수치는 그림17과 같이 3.89로 추정되고 측정치는 각각 이성체별로 3.61, 3.78, 4.14, 3.72로서 매우 근사한 결과를 얻게 된다. 이때 f 값은 원소간의 결합에 의한 분담치이고 F 값은 특수상황에서의 보완치를 나타낸다.

또 다른 방법은

$$\log Kow = a \log Ksw + b$$

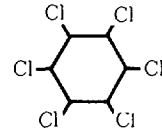
Kow : 옥타놀-물 분배계수

Ksw : 용매-물 분배계수

a, b : 상수

라는 관계식을 이용하여 이미 문헌에서 알려진 Ksw로서 옥타놀-물 분배계수를 추정하는 방법이다.

이러한 접근방법은 옥타놀-물 분배계수 뿐만 아니라 수용성, 증기압, 토양흡착계수, 가수분해,



6f _c	= 6(0.20)	= 1.20
+ 6f _H	= 6(0.23)	= 1.38
+ 6f _{Cl}	= 6(0.06)	= 0.36
+ (6-1)F _b	= 5(-0.09)	= -0.45
+ (6-1)F _{mhw}	= 5(0.28)	= 1.40
	logK _{ow}	= 3.89

(Obsd. = 3.61, 3.72, 3.80 for α isomer
 = 3.78 for β isomer
 = 4.14 for δ isomer
 = 3.72 for γ isomer)

그림 17. 계산에 의한 Hexachlorocyclohexane의 옥타놀-물 분배계수 추정⁽³⁷⁾

광분해, 해리상수 등을 예측하는데에도 사용된다.

이에 대한 자세한 방법은 Lyman 등의 저서를 참고하기 바란다.

최근에는 이러한 예측방법이 집약되어 퍼스널 컴퓨터(PC) 프로그램으로 사용가능하게 되어 있고 그 일례를 들면, Smile notation⁽³⁸⁾으로 어느 화합물의 구조식을 입력하면 그 물체의 물리화학적 특성들이 예측되어 그림18과 같이 butachlor의 이화학적 성질 및 환경요인 추정치가 프린트되어 나오게 된다.⁽³⁹⁾

(5)환경동태의 예측

실험실적 측정치이건 추정방법에 의한 예측치이건, 각각의 환경동태요인들을 합하여 서로 연관된 2개 이상의 환경계에서의 화학물질의 행적을 예측가능케 한다.

수계로부터 대기로의 증발, 토양으로부터 대기로의 증발, 퇴적물과 수계와 대기로의 이동이 그것이다. 여기서는 간단한 실례로서 앞의 두 예에 관하여 소개하고자 한다.

수계로부터 대기로의 증발에 관한 예측방법은 여러 연구자들의 제안이 있었으나 Liss와 Slater⁽⁴⁰⁾가 제안한 two-film 이론이 실제 환경을 잘 묘사하고 있는 것으로 Cohen⁽⁴¹⁾등에 의해서 증명되었고 현재까지는 추천할 만한 방법으로서 널리 사용되고 있다.

PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES

Smiles Notation	=	CCCCOC(C(=O)CCL)Nc(C)ccc(C)1	
Chemical Name	=	butachlor	
Molecular Formula	=	C17H26O2NCL	Calc. from Smiles
Molecular Weight	=	311.86	Calc. from Smiles
Physical State *	=	Liquid	User Entered
LogKow	=	6.11	User Entered
Water Solubility	=	7.94E-02 mg/L	Equation 12N
Melting Point	=	66.71(C)	Grain and Lyman
Vapor Pressure	=	5.84E-03 mm at 25.00(C)	Antoine
Boiling Point	=	287.34 (C)	Meissner
Henry's Law Constant	=	3.32E-02 atm m3/mol	Method 1
Bio Concentration Factor	=	2.61E+04	Kow (Method 1)
Adsorption Coefficient	=	1.00E+04	Kow, Eqn. 4-8

* Estimated MP or BP does not change entered physical state.

그림 18. 화학구조에 의한 환경요인 추정방법⁽³⁹⁾

Mackay와 Leinonen⁽⁴²⁾에 의하면 물에 난용성인 화합물이 수면으로부터 증발하는데도 다음과 같은 관계식으로 예측된다는 것이다.

$$C_t = C_o e^{-KL t^{1/2}}$$

$$1/KL = 1/kL + 1/(H kG/RT)$$

C_t : 시간t에서 화합물의 수증농도

C_o : 화합물의 원래 수증농도

KL : 액체 총 질량 천이 계수

(mass transfer coefficient)

kL : 액체 질량 천이 계수

kG : 기체 질량 천이 계수

H : 헨리상수

R : 기체 상수

T : 절대 온도

L : 액체의 깊이

이때 계산을 위해서는 실험치로서 헨리상수의 구성요소인 수용성과 증기압만이 필요하다. 토양으로부터 화합물질의 증발은 토양환경의 상황에 따라 각기 다른 관계식에 의해 예측되어진다.

화합물질이 토양 표면에 존재하는 경우는 Sw-ann⁽⁴³⁾ 등에 의하여

$$t^{1/2} = 1.58 \times 10^{-8} \left(\frac{KocS}{Pvp} \right)$$

t_{1/2} : 반감기(일)

Koc : 토양흡착계수(유기물당) (ug/g)

S : 수용성(ppm)

Pvp : 증기압(torr)

라는 관계식을 도출하였고 이 계산을 위해서는 실험치로서 수용성, 증기압, 토양흡착계수가 필요하게 된다. 물론 이 계산식의 가정은 생물적·무생물적 분해가 없는 것으로 하고 있다.

그외 실제 환경동태를 좀더 정확하게 예측하는 방법에 관여하는 Hartley, Hamaker, Mayer, Jury 등의 방법⁽³⁷⁾이 있다.

이상과 같은 접근은 단편적인 환경내 동태를 예측할 수는 있으나 두개 이상의 환경계 및 물리화학적 요인들을 종합적으로 집결시켜 실제 환경을 묘사하여 주지는 못한다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 단편적인 환경계를 종합하는 모델들이 개발되고 있다.

대표적인 것으로 미국의 EXAMS (EXposure Analysis Modeling System)⁽⁴⁴⁾로 유기화합물의 수계에 있어서의 동태를 예측하는 종합적인 컴퓨터 프로그램이다. 이는 하천이나 호수에 여러가지 방법으로 화합물질이 투입될 때 수계, 대기, 퇴적물(토양)에로의 이동을 예측하게 된다. 이때 입력하여야 하는 자료는 물질명, 분자량, 수용성, 토양흡

착계수, 증기압, 양자수득율, 위도, 광분해상수, 미생물분해상수, 가수분해상수, 해리상수 등, 이제까지 소개한 환경동태 요인 거의 모두이다. 출력되는 것은 평형상태에서 화학물질의 환경계내에서의 평균, 최대, 최소 농도와 시간별 변화 양상을 알 수 있다. 따라서 여기에 입력되는 계수들이 정확하면 할수록 실제 환경계와 유사한 결론을 내릴 수 있을 것이다. 아직 이 모델의 제한된 적용례로서는 그 효율도가 미지수이지만 예측의 필요성이 점차 증대하고 있으므로 그 이용도가 넓어질 것으로 생각된다.

EXAMS와 유사한 체계이지만 매우 간단한 프로그램으로 서독의 E4 CHEM^(45,46)이 사용되고 있다. E4 CHEM(Exposure and Ecotoxicity Estimation for Environmental CHEMicals)은 EXTND(Exposure Tendency), EXATM, EXWAT, EXSOL, EXAIR의 submodel로 나뉘어져 있고 EXAMS에서와 같은 환경요인을 입력하면 EXTND는 평형상태에 도달하였을 때-여기서는 주로 Mackay와 Paterson⁽⁴⁷⁾의 "Unit World"를 가정한다-수계 토양, 대기에 배분된 화학물질의 농도를 알 수 있게 된다. EXTND를 좀더 세분하여 EXAIR, EXWAT, EXSOL로서 2개 환경계의 이동 경로를 추적할 수 있게 된다. EXATM은 대기중의 변화에 국한하여 대류권과 성층권의 권역별 변화를 예측하는 것이다. 네가지 submodel의 관계는 그림19와 같다.

최근에는 환경요인의 예측에서부터 환경내 동태를 예측하는 종합모델이 개발되어 사용되고 있다.

3. 독성평가 : 환경생물 및 인체독성 시험

(Toxicity Assessment : Test of Adverse Effects on Environmental Organism and Human)

본 고찰에서 자세히 논의되지 못하는 환경독성학의 한 분야로서 환경생물의 독성 및 인체 독성에 관한 시험이 있다. 이에 관하여는 차후에 좀더 자세한 시험방법과 그 의의에 대하여 별도로 정리되어야 하리라 생각되나 여기에서는 환경화학적 시험방법과의 연결에 의한 안전성 평가를 위한 한 요소로서 간략하게 소개로 그치고자 한다.

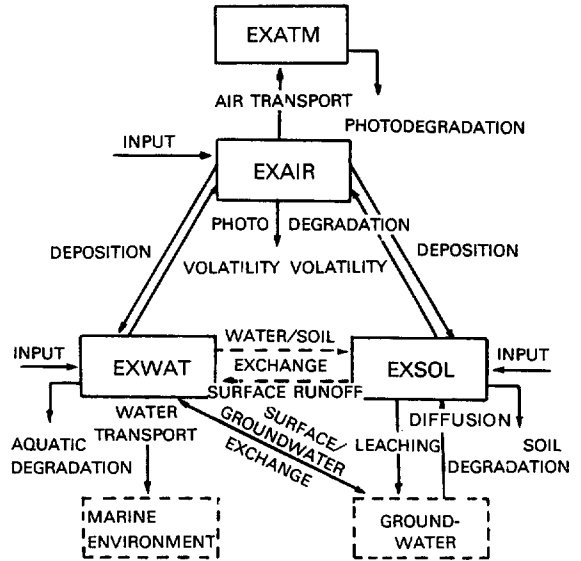


그림 19. 환경동태 예측 모델 E4CHEM의 Submodel간의 관련⁽⁴⁶⁾

화학물질이 환경내 유입되어 환경생물에 미치는 악영향에 관하여는 이상적으로는 환경내의 모든 생물종에 대하여 독성시험이 행하여져야 할 것이다. 그러나 현실적으로 이에 대한 시험은 불가능하므로 국지 환경내에서의 우점종이나 경제적 중요도, 생태계의 먹이 연쇄 (food chain)의 대표적인 생물종이 선택되어 이에 대한 화학물질의 독성을 평가하게 된다. 여기에서 중요하게 생각되는 생물로서는 수생생태계를 대표하는 어류, 동물성 플랑크톤, 식물성 플랑크톤이고 육상생태계를 대표하는 지렁이, 벌, 조류 등이 있다. 이들에 대하여 급성독성, 생식독성, 만성독성 시험이 수행된다. 여기에서 산출되는 LC50값과 최대무작용량 (NOEL-no observable effect level)은 각각 화학물질의 단시간 과다노출시라든지 저용량 장기간 노출을 예상한 위험성의 지표로서 중요한 역할을 하게 된다.

화학물질이 사용될 때 직접적으로 인체에 접촉되어 유해한 영향을 미치거나 환경의 수계, 대기, 토양의 무생물계 및 생물계를 통하여 간접적인 악영향을 미치게 된다. 인체에 미치는 위해성을 평가하기 위해서는 주로 실험동물을 사용한 급성독성, 만성독성, 특수독성(기형유발성, 돌연변이성, 면역독성등), 발암성 시험을 사용하고 있다.

이러한 일련의 독성시험은 14일 정도를 요하는 급성독성시험에서부터 2-3년이 소요되는 발암성시험을 수행하여야 하고 사용하는 동물도 설치류를 주로 하되 비설치류로서 확인실험하는 것이 권장되거나 요구되어진다. 이때에도 환경생물을 이용한 독성시험에서와 마찬가지로 LD50 (혹은 LC50 - 흡입독성의 경우)와 NOEL이 산출되게 되어 인체에 미치는 위험성의 지표로 삼게된다.

장기간의 발암성을 간이하게 추정하기 위한 방법으로서 미생물을 이용한 방법들이 개발되어 있고 특히 *Salmonella typhimurium*을 이용하는 Ames test는 널리 이용되고 있다. 또한 적먹이 동물의 염색체 이상을 시험하는 방법(예, 자대염색분체교환(SCE))과 골수세포의 소핵(micronucleus : MN) 시험등이 보완실험으로 많이 사용되고 있다. 만성독성을 단기간에 추정하기 위한 방법으로서 각 기관의 조직세포 배양시험이 시도되고 있다.

현행 환경생물 독성시험의 제한점으로 지적될 수 있는 것은 세계 공통적으로 시험종이 정하여질 수 없다는 것이고, 따라서 국지적인 대표종들에 대한 시험방법 개발이 이루어져야 하며 가능하다면 대다수의 환경생물을 공시하는 것이 바람직하다 하겠다. 그러나 환경생물의 실험실적인 계대사육의 한계점이 있으므로 앞으로 이를 극복하는 연구가 계속되어야 할 것이다. 이는 일본의 국립 공해연구소 생물팀의 다수종에 대한 실험실적 연구⁽⁴⁸⁾에서 이러한 노력의 일면을 엿볼 수 있다.

인체독성을 대표하는 실험동물을 이용한 독성시험은 이제까지의 급성독성만에 한정되어온 관심에서 벗어나 만성, 특수, 발암성등 장기간에 미치는 유해한 영향에 대하여 좀더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다. 특별히 환경에 유입될 가능성이 있는 화학물질의 안전성 평가에는 저농도 장기간에 걸친 시험이 중요하다. 환경문제가 거론되고 엄격한 법제화가 이루어지기 전에 개발되어 사용되고 있는 기존(혹은 유통) 화학물질들에 대한 장기간 독성시험은 꼭 필요하다 하겠고 미국의 NTP(National Toxicology Program)⁽⁴⁹⁾은 이러한 접근의 대표적인 예라고 하겠다.

4. 환경독성학적 방법의 안전성 평가에의 활용

(Environmental Toxicological Methods in Risk Assessment)

이제까지 화학물질의 환경화학적 측면에서의 대표적인 실험방법 예들을 소개 하였고 독성시험에 대하여 간략하게 언급하였다. 여기에서는 이러한 시험자료들이 어떻게 실제에 적용될 수 있는지를 외국의 실례를 들어 요약해 보고자 한다.

서론에서 언급한 바 있듯이 현대의 화학물질로 된 제품과 더불어 일상생활이 영위 되고 있고, 이를 떠나서는 살수 없을 정도로 점점 더 밀접한 관계로 발전되고 있다. 이러한 상황에서 우리가 화학물질에 대하여 가져야 할 최선의 자세는 화학물질의 특성을 정확하게 파악하여 인간에 편리한 면을 최대한으로 이용하면서도 인간 및 환경에의 피해를 최소화하도록 노력하는 것이라 하겠다. 따라서 화학물질의 안전성을 확보한다는 것은 인체 및 환경생물을 안전하게 보전하기 위한 노력이라 생각되고 이를 위하여는 그림20에 보인 바와 같이 노출량, 분해율, 농축율, 독성에 관여하는 모든 자료들이 집약되므로써 하나의 화합물에 대한 합리적인 평가와 이에 부수되는 적절한 관리방법이 도출될 수 있을 것이다.

이 과정에서 궁극적 시험은 실제 상황의 실험이므로 제일 믿을 만한 자료들이 되겠으나 실험이 윤리, 도덕적으로 불가능하거나 노력, 경비의 막대함으로 인하여 이를 간소화하기 위한 기본(대표) 시험이나 추정시험들이 각각 개발되어 가고 있다. 이런 네단계의 시험들은 상황에 따라 서로 보완적으로 실제에 적용될 수 있다.

화학물질을 개발하는 연구자들에게는 개발단계에 따라 분자의 설계단계에서는 추정시험 I부터 시작하여 물질을 등록하는 단계에서는 궁극적 시험까지를 자료로 확보하여야 될 것이고, 화학물질의 등록을 허가하고 규제하는 행정가의 입장에서는 전체의 흐름에서 나름대로 평가하는 전략을 세우고 제출된 자료의 허실을 밝히도록 노력하여야 할 것이다. 이러한 접근방법은 미국의 유해물질 규제법(TSCA : Toxic Substances Control Act)에서 명시된 자료검토방법을 참고로 해 볼 만하다.

유해물질규제법에서는 생산전 통고제도(Prem-manufacture Notification)⁽⁵⁰⁾로서 화학물질의 생산자

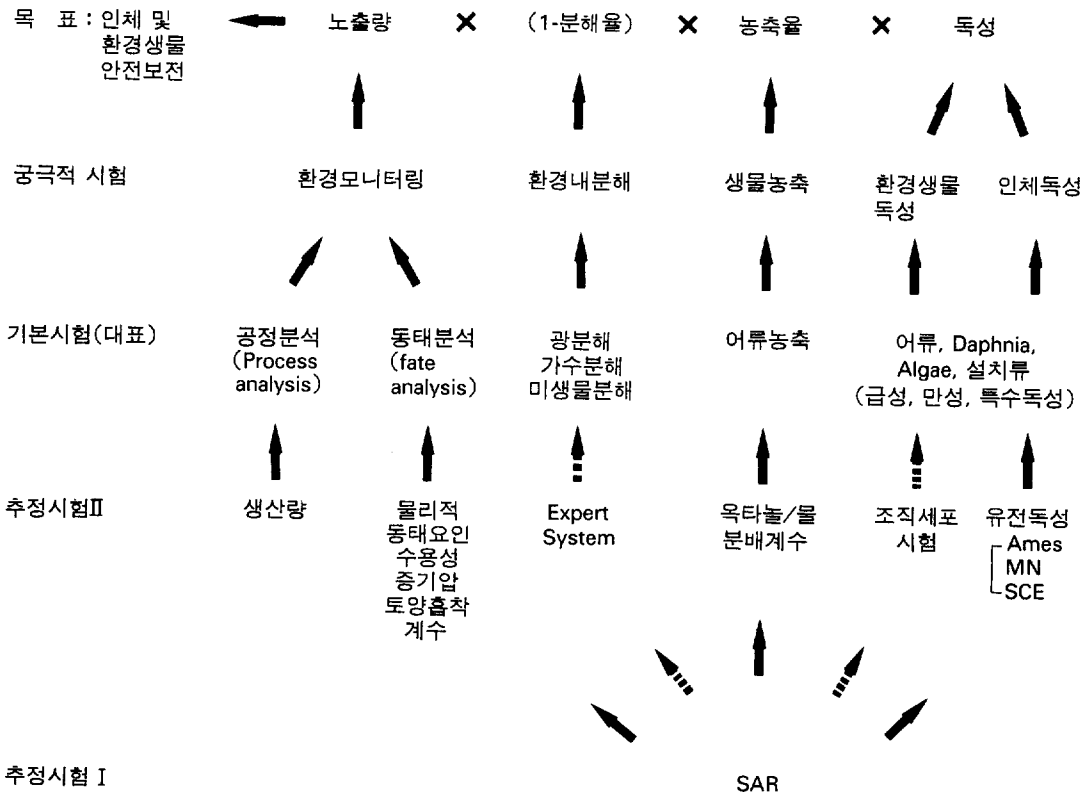


그림 20. 화학물질의 안전성 평가 항목의 관련성⁽⁵⁰⁾

가 생산하려는 화학물질의 기존물질-이것은 미국 환경청에서 발행한 기존화학물질 목록을 참조-이 아닌 것을 확인하거나 이제까지 허가되어 사용하던 용도를 변경할 경우에는 생산 90일 이전에 환경독성학적 자료와 함께 신고하게 된다.

신고를 접수한 환경청은 그림21에 보인 바와 같은 절차를 거쳐 90일만에 생산자에게 통고하게 되어 있다. 이 심사에 참가하게 되는 각 분야의 전문가들은 직접실험을 하는 것은 아니나 모든 위험 가능성에 대한 의문을 제기하게 되고 제출된 환경독성학적 자료와 모델을 동원한 예측시도에서도 문제가 없을 것으로 판단이 될 때 비로소 등록이 허가되는 것이다. 물론 이때 행정적인 조치로서는 생산 사용금지의 극단적 방법에서부터 생산량 제한, 사용자 및 사용지역 제한, 라벨에 의한 경고, 생산

및 모니터링의 기록 강화, 폐기통제, 품질검사 강화 등의 다양한 조치가 취해질 수 있다.

선진국에서 법적으로 요구되는 환경독성 관련 시험항목은 표 1에 개괄하여 보았다. 미국의 경우 거의 직·간접적인 위험가능성의 인체 및 환경생물의 보전을 위하여 모든 자료를 요구하면서도 농약의 경우와 일반화학물질을 다루는데 약간 차이가 있음을 알 수 있다.

유해화학물질법(TSCA)은 환경생물의 실험실적 시험에 강조를 두면서 환경화학적으로 야외시험이 생략되어 있음을 알 수 있다.

EEC지침에 의하면 생산량에 따라- 즉, 노출량의 가능성에 따라- 제출하는 자료와 양과 질을 점진적으로 가중하게 요구하고 있음을 볼 수 있고 궁극적으로는 미국의 TSCA와 동일한 정도의 자

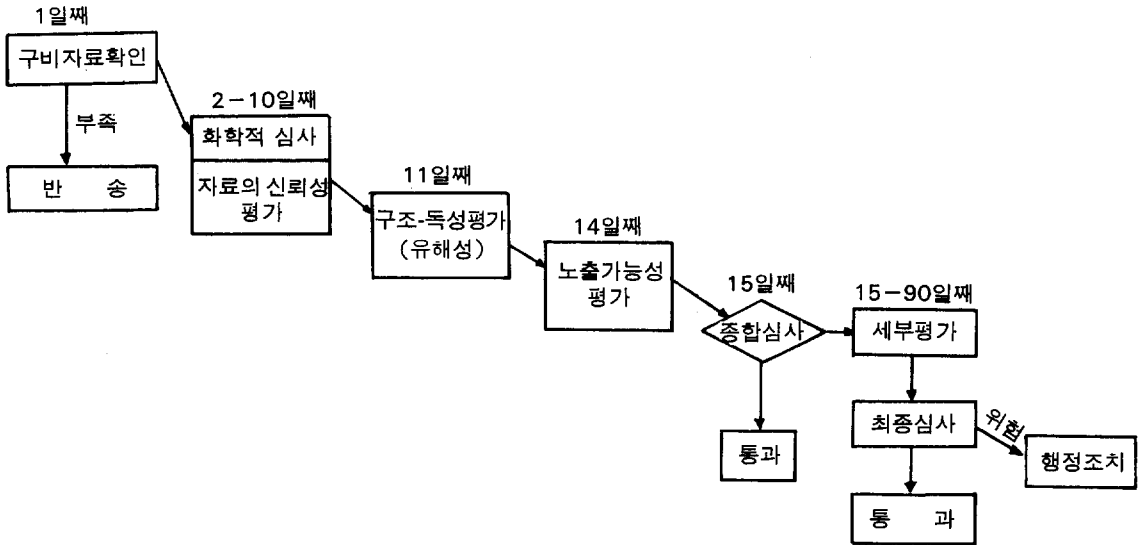


그림 21. 미국 TSCA의 생산전 통고(PMN) 심사경로⁽⁵¹⁾

표 1. 화학물질 심사요구 환경독성 관련자료

항 목	관련국가		유럽공동체 (EEC) ⁽⁵³⁾			일 본		
	TSCA ⁽⁵¹⁾	미국 FIFRA ⁽⁵²⁾ (required)	Base set	Level I	Level II	농약 ⁽¹⁰⁾ 취체법	화 심 법 ⁽⁴⁾	
							개정전	개정후
제품화학								
수용성	0	0	0			0 * 1	0 * 1	0
증기압	0	0	0			0 * 1	0 * 1	0
해리상수	0	0				0 * 1		
옥타놀-물 분배계수	0	0	0					0
분광 spectrum	0							
잔류 화학								
포장 시험		0				0		
식물잔류 대사물 (잔류 허용량)		0						
환경동태								
가수 분해	0	0		0 * 2	0 * 3			
광분해-수중	0	0	0 * 4					0 * 5
호기성 토양대사-수중	* 6	0	0 * 6					
혐기성 토양대사-수중		0						
토양용탈 및 토양 흡,탈착	0	0			0			
야외토양중 확산시험(수중)		0						

항 목	관련국가		유럽공동체 (EEC) ⁽⁵³⁾			일 본		
	TSCA	FIFRA (required)	Base set	Level I	Level II	농 약 취체법	화 심 법	
							개정전	개정후
환경생물 독성								
야생 조류 LD50 (강제 투여, 사료 투여)	0	0			0 * 7			
어류 LC50	0	0	0			0 * 8		0
담수무척추동물LC50		0	0					0
식물성플랑크톤EC50	0			0				
담수무척추동물 장기독성시험	0			0 * 9				
미생물 시험	0							
식물약해 시험	0			0				
지렁이 시험				0				
어류 장기시험				0 * 10	0 * 11			
어류 농축시험	0 * 13			0	0 * 12		0	0
기타생물					0			
인체독성								
급성시험								
경구 - rat	0	0	0		0 * 14	0 * 15		0
경피		0	0		0 * 14	0 * 15		0
흡입		0	0		0 * 14			0
정맥						0		
복강						0		
안구 일차 자극성	0	0	0					0
피부 일차 자극성		0	0					0
피부 감작성	0	0	0					0
급성 지연신경독성-hen		0						
아만성 시험								
90일 사료투여시험		0 * 16	0 * 17	0 * 18	0 * 14			
만성 시험						0 * 15	0	0
만성사료투여시험	0	0		0 * 19	0			
발암성 시험	0	0 * 21			0		0	0
최기형성 시험	0	0 * 22		0 * 20	0 * 24	0 * 23	0	0
생식독성 시험		0 * 25		0 * 26	0 * 27	0 * 28	0	0
돌연변이성 시험	0						0	0
유전자돌연변이		0	0 * 29	0 * 30				
조직유전자돌연변이		0					0	0
기타 유전독성적 영향								
대사 시험	0	0			0			

* 1 : 물리화학적 성상
* 2 : 장기 생물분해 시험

* 3 : 추가시험
* 4 : 무생물 분해시험

- * 5 : 미생물 분해시험
- * 6 : 생물 분해시험
- * 7 : 급성 및 아급성
(농축계수가 100이상인 경우)
- * 8 : 어류에 미치는 영향
- * 9 : 21일
- * 10 : 14일
- * 11 : 생식시험 포함
- * 12 : 추가 시험
- * 13 : 야생 먹먹이 동물
- * 14 : 2 차종
- * 15 : 2 종 이상
- * 16 : 설치류 및 비 설치류 (90일)
- * 17 : 28일

- * 18 : 90일
- * 19 : 2년
- * 20 : 1종
- * 21 : 설치류 (rat & mouse)
- * 22 : 2종
- * 23 : 1종
- * 24 : 비설치류
- * 25 : 2세대
- * 26 : 1종, 1세대
- * 27 : 3세대
- * 28 : 1종, 2세대 이상
- * 29 : 미생물적 시험, 비미생물적 시험
- * 30 : 음성확인시험, 양성확인시험

료를 요구하고 있음을 알 수 있다.

일본의 경우는 농약등록시 직접적인 야외시험과 인체 및 환경생물의 최소한의 급, 만성독성 시험을 요구하고 있다. 화학물질 심사 및 규제에 관한 법률(화심법)에서도 종전까지 어류농축성, 난분해성, 만성독성에 관한 기본 자료만 요구하다가 최근에는 구주공동체가 요구하는 Base set을 추가하는 개정 법률이 시행되고 있다.

이상에서 언급한 모든 경향과 법률들은 주로 새로 개발되거나 수입되는 화학물질들에만 관심을 두고 있다. 우리가 사용하고 있는 기존 유통화학물질에 관하여는 어떠한 방법으로 그 안전성을 검토해 나가야 할 것인가? 이것은 이 분야의 과학도들이 풀려고 하는 과제중의 하나이고 이러한 노력의 대표적인 시발점이 문제 화학물질을 찾아내는 우선 순위를 정하는 (Priority setting)^(45, 46) 작업으로 선진국에서 진행중이다. 잠재된 문제화합물들을 최소한의 노력과 비용으로 찾아내어서 적절히 다루는 (management) 작업은 이 분야 모든 과학도들의 관심이 되어야 할 것이다.

간간이 문제점으로 제기되어 사람의 입에서 회자되다 완전히 잊혀져버리는 몇몇 문제 화합물들은 정말 빙산의 일각일 수도 있다.

현재 가능한 시험 및 평가방법을 사용하여 새로이 개발되는 화학물질을 검토하고 기존 사용화학물질 중 문제 화학물질을 검색하는 작업이 우리의 당면과제이지만 이러한 체 (Screen)에서 빠져나가

는 화학물질은 항상 있어왔고 있을 수 있다. 따라서 기존시험방법과 평가방법은 부단히 개선, 보완되어야 할 실제로 인식하고 각 해당 분야에서 관심을 기울이는 것이 요청된다.

5. 결론

최근에 급격히 증가하는 화학물질이 가져올 인체 및 환경생물체의 유해성을 평가하는데 환경독성학적인 방법의 역할을 제한된 지면을 통하여 소개하려고 시도 하였다.

응용과학으로서의 환경독성학의 연륜이 길지 않은 관계로 용어의 정의조차 통일이 되지 않은 상태에서 전체를 조망하려고 시도한 본 총설에서 필자가 생각이 미치지 못하여 부족하고 무리한 부분이 많았으리라 예상된다. 그러나 화학물질이 가져올 위험성을 인식하고 각 분야의 전문가들이 문제점의 기작을 파악하여 대비하는 방법을 찾는 데 노력을 기울여야 하는 이유가 선진국의 예를 통하여 전달이 되었다면 본 총설의 목적을 달성한 것으로 믿는다.

여기에 소개한 여러가지 방법들은 완전을 향하여 개발되어 가고 있는 도중에 있다는 점을 다시 한번 강조하고 싶고, 이 분야 연구자들의 지혜가 모아지면 모아질수록 화학물질에 의한 위험가능성이 적은 편리한 사회가 이루어질 것이라 확신한다. 염두에 두어야 할 일은 환경문제는 표면에 드러나

서 문제화가 된 때에는 이미 손을 쓸 수 없을 정도로 오랜 잠복기를 가지고 진전되어 온 고질이나 암과 유사한 성질을 가지고 있다는 것이다. 따라서 최선의 방책은 초기에 예방하는 것이며 화학물질은 생산되어 사용되기 전에 충분한 평가를 거쳐야 한다는 것이다. 이때에 환경독성학적인 방법을 통한 화학물질의 안전성 평가는 필수적이라 생각된다. 이는 이론상으로는 그럴듯하지만 실제로 이를 이행하기는 쉽지 않은데 그 이유는 예방이라는 작업은 성공하였을 때는 아무 표시가 나지않고 실패하였을 때만 크게 드러나게 되어 노력과 경비의 투자가치가 전혀 없는 것으로 인식되기 쉽기 때문이다. 그렇지만 조직적인 추정에 의한 문제의 인식과 초기 예방은 과학적인 방법의 커다란 역할로서 쉬어서는 안되는 작업인 것이다.

참 고 문 헌

1. 中杉修身(1987) : 化學物質の環境における安全性, 環境の安全性(鈴木 繼美, 田口正), 恒星社 厚生閣, 東京, pp. 97-123
2. 박관제(1987) : 유해화학물질 조사집, 환경청, 서울, p. 5.
3. Miller, M.L.(1983) : Toxic Substances, in *Environmental Law Handbook* (Arbuckle, J.G. et al. Eds.), Government Institutes, Inc., Rockville, pp 223-272.
4. 環境廳 環境法令 研究會(1988) : 環境六法, 中央法規出版(株), 東京, p. 877
5. 石居 昭夫(1987) : 知って おきたいFDAの知識, 藥事日報社, 東京, p. 36
6. Shires, S.W. and Stephenson, R.R.(1986) : Assessing the effects of pesticides on the environment, Shell Research Ltd., Sittingbourne, (Personal Communication before publication)
7. Ware, G.W.(1983) : *Pesticide, Theory and Application*, Freeman, New York, p. 179
8. 노정구, 김용화, 이성규, 신천철, 김영배(1987) : 화학물질의 환경독성 평가 방법개발, 과학기술처 연구개발 사업 보고서, p. 2
9. 농촌진흥청(1983) : 농약의 시험기준과 방법, 농촌진흥청, 수원, p. 76.
10. 農藥工業會(1982) : 農藥登錄申請 實務書, 農藥

工業會, 東京 p. 76

11. Schmidt, R.D.(1982) : *Pesticide, Assessment Guidelines*, Subdivision O., Residue Chemistry, U. S. EPA, 540/9-82-032.
12. Roberts, T.R.(1976) : Experimental models for studying the fate of pesticides in plants, proc. BCPC Symposium : *Persistence of Insecticides and Herbicides*, pp. 159-168.
13. Führ, F., Cheng, H.H., Mittelstaedt, W.(1976) : Pesticide balance and metabolism studies with standardized lysimeters, *Landwirtschaftl. Forsch. Sonderheft*, 32, 272-278.
14. Tinsley, F.J.(1979) : *Chemical Concepts in Pollutant Behavior*, John Wiley & Sons, New York, pp. 194-206.
15. Isensee, A.R., Kearney, P.C., Woolson, E.A., Jones, G.E. and Williams, V.P.(1973) : Distribution of alkyl arsenicals in model ecosystem, *Environ. Sci. Technol.*, 7(9), 841-845.
16. Ohkawa, H., Kikuchi, R., and Miyamoto, J.(1980) : Bioaccumulation and biodegradation of the (S)-acid isomer of fenvalerate (Somicidin) in an aquatic model ecosystem, *J. Pesticide Sci.*, 5, 11- 22.
17. Guth, J.A.(1981) : Experimental approaches to studying the fate of pesticides in soil, in *Progress in Pesticide Biochemistry*. Vol. I (Eds. Hutson, D. H. and Roberts, T.R.), John Wiley & Sons, pp. 85-114.
18. Bartha, R. and Pramer, D.(1965) : Features of a flask and method for measuring the persistence and biological effects of pesticides in soil, *Soil Sci.*, 100, 68-70.
19. Laskowski, D.A., Goring, C.A.I., McCall, P.J., and Swann, R.L.(1982) : Terrestrial environment, in *Environmental Risk Analysis for Chemicals* (Ed. Conway, R.A.), Van Nostrand Reinhold, New York, 198-240.
20. Freitag, D., Geyer, H., Kraus, A., Viswanathan, R., Kotzias, D., Attar, A., Klein, W. and Korte, F.(1982) : Ecotoxicological Profile Analysis VII. Screening Chemicals for Their Environmental Behavior by Comparative Evaluation, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 6, 60-81.

21. Kloskowski, R., Scheunert, I., Klein, W., and Korte, F.(1981) : Laboratory screening of distribution, conversion and mineralization of chemicals in the soil-plant-system and comparison to outdoor experimental data, *Chemosphere*, 10(10), 1089-1100.
22. 이서래(1988) : 환경독성학의 새로운 과제, 한국환경농학회지, 7(1), 65-73.
23. 通商産業省 基礎産業局 化學品安全課(1985) : 化審法關係. GLP 制度の概要, 通商産業調査會, pp. 91-100
24. U.S. EPA(1985) : Toxic Substances Control Act Test Guidelines : Final Rules, *Federal Register*, 50 (188)
25. OECD(1981) : *OECD guidelines for Testing of Chemicals*, OECD, Paris.
26. Spencer, W.F. and Cliath, M.M.(1969) : Vapor density of dieldrin, *J. of Agric. and Food Chem.*, 3, 664-670.
27. 김균, 김영배, 김용화, 노정구(1987) : 농약 Chlorthalonil과 Command의 수용성 및 증기압, 한국환경농학회지, 6(2), 84-93.
28. 임선옥, 이중길, 한기학(1977) : 토양 중에서 농약의 동태의 관한 연구(제1보) 제조제 atrazine과 alachlor의 흡착에 대하여, 한국 농화학회지, 20(3), 310-316
29. 한대성, 김정제, 신영오(1984) : 농업 환경의 오염과 그 대책, 제1보 몇가지 제조제에 의한 토양흡착의 이론적 분석, 한국 환경 농학회지, 3, 22-29
30. 김장억, 홍종욱 (1985) : N-methylcarbamate계 살충제의 토양 중 흡착, 한국 농화학회지, 28(3), 124-130
31. Fujita, T., Iwasa, J., and Hansch, C.(1964) : A new substituent constant, II, Derived from partition coefficients, *American Chem. Soc. J.* 86, 5175-8180.
32. Neely, W.B., Branson, D.R., Blaw, G.E. (1974) : Partition coefficient to measure bioconcentration potential of organic chemicals in fish, *Environ. Sci. Technol.* 8, 1113
33. Veith, G.D., Austin, N.M., and Morris, R.T. (1979) : A rapid method for estimating log P for organic chemicals, *Water Res.*, 13, 43.
34. DeVoe, H., Miller, M.M., and Wasik, S.P. (1981) : Generator columns and high pressure liquid chromatography for determining aqueous solubilities and octanol-water partition coefficients of hydrophobic substances, *J. Res. N.B.S.*, 86, 361-366.
35. Dulin, d. and Mill, T. (1982) : Development and evaluation of sunlight actinometers, *Environ. Sci. Technol.*, 16, 815-820.
36. Moses, F.G., Liu, R.S.H., and Monroe, B.M. (1969) : The merry-go-round quantum yield apparatus, *Molecular Photochemistry*, 1, 245.
37. Lyman, W.J., Reehl, W.F., and Rosenblatt, D.H. (1982) : *Handbook of Chemical Property Estimation Methods*, McGraw-Hill, New York.
38. Anderson, E., Veith, G.D., and Weininger, D. (1987) : *SMILES : a line notation and computerized interpreter for chemical structures*, U.S. EPA Doc. 600/n-87/021.
39. Kinerson, R.(1986) : *Automated procedures for physiochemical property estimation*, U.S.EPA Contract No. 68-02-3970.
40. Liss, P.S. and Slater, P.G. (1974) : Flux of gases across the air-sea interface, *Nature*, 247, 181-84
41. Cohen, Y., Cocchio, W., and Mackay, D. (1978) : Laboratory study of liquid-phase controlled volatilization rates in presence of wind waves, *Environ. Sci. Technol.*, 11, 405-409.
42. Mackay, D. and Leinonen, P.J. (1975) : Rate of evaporation of low solubility contaminants from water bodies to atmosphere, *Environ. Sci. Technol.*, 9, 1178-1180.
43. Swann, R.L., McCall, P.J., and Unger, S.M. (1979) : *Volatility of pesticides from soil surfaces*, 177th National Meeting Am. Chem Soc.
44. Burns, L.A., Cline, D.M., and Lassiter, R.R. (1982) : *Exposure Analysis Modeling Systems (EXAMS) : User manual and system documentation*, U.S. EPA-600/3-82-023
45. Rohleder, H., Munzer, B., and Voigt, K.(1985) : E4CHEM-a computerized aid for priority setting, in *Environmental Modelling for Priority Setting among Existing Chemicals*, Proceedings of a Wor-

- kshop, GSF, München, pp. 491-525.
46. Matthies, M., Bruggemann, R., and Trenkle, R. (1985) : Multimedia modelling approach for comparing the environmental fate of chemicals, in *Environmental Modelling for Priority Setting among Existing Chemicals*, Proceedings of a workshop, GSF, München, pp. 211-252.
 47. Mackay, D. and Paterson, S. (1981) : Calculating Fugacity, *Environ. Sci. Technol.*, **15**, 1006-1014.
 - 48.菅原淳(1988) : 水界生態系に及ぼす有害汚染物質の影響評價に関する 研究, 環境廳 國立公害研究所.
 49. Hart, L. (1985) : *National Toxicology Program : Review of Current DHHS, DOE, and EPA Research Related to Toxicology*, U.S. DHHS, Research Triangle Park.
 50. 김용화, 이성규, 이현걸, 김균, 차신우, 심점순(1988) : 합성화학물질의 안전성 시험, 환경청 연구 보고서.
 51. U.S. EPA (1986) : *New Chemical Review : Process Manual*, EPA-560/3-86-002.
 52. U.S. EPA (1984) : Data requirements for pesticide registration ; final rule, *Federal Register*, **49** (207), 42856-42905.
 53. EEC (1979) : Council directive, *Official Journal of the European Communities*, **79/831/EEC**, 9-28.