



농약에 의한 비점원오염의 관리대책

윤 춘 경
(건국대학교 농과대학 조교수)

1. 농업과 비점원오염

비점원오염(nonpoint source pollution)이란 점원오염(point source pollution)에 상대되는 표현으로써 점원을 다음과 같이 정의할 수 있다.

점원(point source)이란 한정되어 있고, 식별이 가능하며, 분리된 형태로써, 예를 들면 파이프, 개울, 수로, 도관(導管), 터널, 우물, 콘테이너, 선박 등과 같이 이들을 통해서 오염물질이 배출될 수 있는 형태를 의미한다. 농업지역에서의 지표유출과 관개지역에서 회수된 배수 등은 비점원에 속한다.

넓은 지역에서 분산된 형태로 일어나는 유출은 비점원으로 분류되나 위에서 열거한 개울이나 수로와 같은 운송수단에 유입되어 이동하면 점원으로 분류할 수 있어서, 점원과 비점원오염은 엄밀한 의미에서의 구분이 불분명한 경우도 있다. 비점원오염은 일반적으로 지표유출, 강우, 대기로부터의 침전, 배수, 그리고 삼투 등에 의해서 유발되며, 농업에 의해 발생하는 비점원오염에는 주로 영양물질, 축산폐기물, 염류, 그리고 농약성분 등이 있다.

가. 영양물질(Nutrients)

농업지역에서 유출되는 영양물질로써 수질 악화를 초래하는 주요성분은 질소(N)와 인(P) 등이며, 이외에도 여러가지 영양물질들이 다양한 형태로 농경지에 투입된다. 이와 같은

농경지에 투입된 영양물질들의 일부가 지표유출에 의해 강이나 저수지 등에 유입되어 수질 오염을 일으킬 수 있다. 또한 이러한 영양물질들이 투입된 농경지에서 지하수로 침투하는 경우도 있는데, 침투하는 성분은 주로 용해성 영양물질로써 질소, 인, 중금속, 염류, 그리고 여러가지 영양물질 등이다.

수중에서 식물의 생장은 영양물질에 의해 제한을 받는데 질소와 인은 자연상태에서 일반적으로 각각 0.3mg/L, 0.05mg/L 정도씩 존재한다. 이런 영양물질들이 강, 저수지, 또는 하구에 다량으로 유입되어 부영양화상태가 되면 수생식물의 번식이 급격히 증가하여 수자원의 사용 목적에 부적합하게 되는 경우가 많다. 수생식물의 증가는 이들이 결국에 죽어 부패하면서 수중에 유기물질의 증가를 초래하며, 그 과정에서 악취와 수중생태계에 필요한 용존산소를 소모시킨다. 수생식물의 과잉번식은 수영이나 낚놀이와 같은 오락활동 등에 저해를 주며, 용존산소의 저하는 물고기의 생육환경에 악영향을 준다. 부영양화상태에서는 조류가 급격히 번식하는데 일부 조류는 물고기에 유독하기도 하고, 탁도가 증가하면 햇빛의 투과를 감소시켜 수중생태계에 악영향을 끼친다.

나. 축산폐기물(Animal Wastes)

축산분뇨, 축산처리수, 바닥깔개, 그리고 거

기에 섞여 있는 쓰레기를 통틀어서 축산폐기물이라고 부른다. 축산시설에서 유출수가 발생하여 수계에 유입되면 일반적으로 영양물질과 세균성미생물에 의해 수질오염을 일으킨다. 물 속에 녹아 있는 암모니아성질소 또는 용존산소의 감소는 물고기의 죽음을 유발시킨다. 유입된 유기물질은 물 속에서 분해하며 산소를 소모하여 물 속의 산소용존량을 저하시켜 혐기상태를 야기시키기도 한다. 혐기상태는 메탄, 아민, 황화수소같은 물질들이 생성되어 냄새, 맛, 그리고 외관상으로도 불쾌감을 주어 상수원으로는 물론 낚시나 수영같은 오락활동에도 적합하지 않으며, 바닥에 쌓인 퇴적물은 영양물질을 오랫동안 용출하여 부영양화를 일으킨다. 축산분뇨가 쌓여 있는 지역은 높은 영양물질때문에 바닥으로의 침출방지가 충분하지 않으면 지하수의 오염문제도 우려된다.

축산지역의 유출수는 분뇨가 적절히 처리되지 않았을 경우 많은 박테리아를 함유하고 있으며 이로 인하여 조개류 서식장이나 해수욕장 등이 폐쇄되기도 한다. 이러한 박테리아는 토양수분, 낮은 pH, 높은 온도, 그리고 햇볕에 의해 급격히 죽어 감소한다. 축산분뇨는 저장시설을 통하여 일반적으로 박테리아가 소멸되거나 특정한 병원균은 휴면활동을 이용해 오랫동안 살아남기도 하는데 퇴비화(composting)는 병원균을 감소시키는데 매우 효과적인 방법이다.

다. 염류(Salts)

염류는 토양이나 암석에 원래부터 함유되어 있는 것과 인위적인 방법에 의해 유입되어 민물, 바닷물, 또는 지하수에 정도의 차이는 있으나 일정량이 함유되어 있다. 배수가 불량한 농경지의 뿌리부근에는 대부분의 수분은 흡수되고 염류가 축적되는 현상이 일어나기 쉽다. 나트륨(Na, sodium) 성분의 축적은 토양입자의 구조적변화를 초래하여 수분흡수율을 감소

시키며 작물에 유독한 경우도 있는데, 이러한 현상은 주로 관개에 의해 작물을 연속 재배하는 지역에서 작물의 생산성뿐만 아니라 수질오염문제도 야기시킬 수 있다. 강물의 높은 염류농도는 토양의 염도가 작물에 영향을 미치듯이 수생식물의 생장에 영향을 미친다. 염류의 이동 및 침전은 강우량과 관개량, 토양의 종류, 증발산량, 그리고 기후조건 등에 의해 영향을 받는다.

라. 농약성분(Pesticides)

Pesticide라는 단어는 해충을 예방, 진멸, 억제 또는 완화시키거나, 식물생장의 통제, 고엽, 탈수 등의 목적을 위해 사용되는 물질을 뜻하며 일반적으로 살충제(insecticides), 제초제(herbicides), 살균제(fungicides) 등으로 구분한다. 지표수와 지하수에서 주로 발견되는 농약성분은 활성이나 불활성 성분 또는 난분해성인 농약의 잔류성분이나 분해과정의 물질들이며 이들은 용해상태나 에멀존 또는 토양입자에 흡착하여 유입되는데, 단순히 농약성분(pesticides)이라 하면 농약과 그들의 분해과정에서 생성되는 성분들을 모두 통틀어 가리킨다.

이러한 농약성분들은 본래 사용목적의 유용성도 있으나 지표수나 지하수에 유입되면 물의 사용에 나쁜 영향을 준다. 농약성분은 회귀생물을 포함하여 수중생태계의 유익한 생물을 멸종 또는 감소시키고, 어떤 종류의 농약성분은 물고기 뼈의 형성과 산란을 억제하기도 한다. 제초제는 수중생태계에서 물고기의 먹이를 파괴하여 굶어 죽게 하고, 물고기가 알을 낳고 보호하는 수초를 감소시키며, 어떤 수초는 제초제성분이 있는 물에서 환원작용이 일어나 수중의 용존산소량을 감소시키기도 한다. 어떤 농약성분은 그 자체는 유독성이 없으나 자연계에서 분해되는 과정에 생성되는 물질이 유독한 경우가 있으며 이러한 현상을

협동효과(synergistic effects)라고 부르는데 예측이나 평가가 매우 어렵다. 어떤 생물에는 배출하는 분량이 흡수하는 분량보다 적어 유독성물질이 체내에 누적되는 현상을 나타내는데 이러한 현상을 생체누적(bioconcentration)이라고 하며, 이러한 경우에는 체내의 농약성분농도가 주변의 농도보다 높아서 이러한 음식물을 섭취하였을 때 건강에 위협을 줄 수 있다.

농약성분이 수중생태계에 유입되는 주요과정은 직접살포, 지표유출, 바람에 의한 공중이동, 증발과 뒤따른 대기침전, 식물에 의한 흡수와 먹이그물에 의한 이동 등이다. 농경지에 살포된 농약이 유출에 의해 강으로 유입되는 양에 영향을 미치는 요인으로는 강우량과 관개량 그리고 강우강도, 농약살포와 강우 사이의 기간, 농약살포량과 토양/물의 분리계수(partition coefficient), 대지의 경사와 토양의 구성 성분, 지표토양의 피복정도, 강까지의 거리, 농약살포방법, 유출과 토사유실방지를 위한 농업적 또는 구조적 방지시설 등이다. 농약성분의 농경지 내에서 유실은 강우강도가 강하고, 농약살포 후 곧바로 바가 왔을 때, 그리고 지표유출과 토사유실이 많을 때 가장 많다. 토양층을 통한 지하수로의 이동율은 농약성분이 토양입자에의 흡착계수(Kd, adsorption partition coefficient)에 반비례한다. 본 강좌에서는 농업에 의해 야기되는 여러 가지 비점원오염 중에서 농약성분의 유입을 감소시킬 수 있는 방법에 관하여 언급하고자 한다.

2. 농약성분 비점원오염의 관리방법

농약성분 비점원오염의 관리에 대한 기본개념은 환경오염을 야기시키지 않는 안전하고 효과적인 농약 및 농약의 사용방법을 개발·보급하는 것이다. 물이 농약성분에 오염되는 것을 가장 효과적으로 감소시킬 수 있는 방법은

첫째는 농약사용량을 줄이는 것이고, 둘째는 그림. 1에 표시되어 있는 것과 같은 농약성분의 지표수나 지하수로의 이동을 최소화시키는 것이다. 농약은 경제적으로 이득이 될 경우에만 투입해야 농약사용량을 감소시키고 수질보호와 비용이 절감된다.

농약성분 비점원오염의 관리방법은 작물 생산자들이 여러단계로 생각하는 과정이 필요한데, 예를 들면 병충해 문제, 과거에 사용했던 병충해 방지방법, 또는 경작해 온 작물의 종류의 파악, 침출이나 유출가능성을 평가하기 위한 토양의 특성과약, 농약사용량을 절감하기 위한 종합적인 병충해관리(IPM, integrated pest management)방법의 선택, 그리고 농약의 손실을 최소화시킬 수 있는 효과적인 투입방법의 사용 등이다. 농약투입이 필요해서 투입할 농약을 선정할 때 생산자는 가장 환경친화형인 것을 선택하고 제조회사의 지시사항을 준수해야 하는 것도 중요하다. 어떤 IPM방법은 특정지역에서는 적용이 어려운 경우가 있으므로 IPM 선정시 지역여건을 충분히 고려해야 한다. 그리고 선정된 IPM방법도 농약투여에 의한 경제성을 확신할 수 있는 경우에만 농약을 투여하고, 효과적인 투여방법에 의해 불필요하게 많은 농약의 살포를 방지하며, 투여시기를 신중하게 선택하여 유출에 의한 손실을 감소시켜야 한다.

농약에 의한 비점원오염의 관리방법 선택은

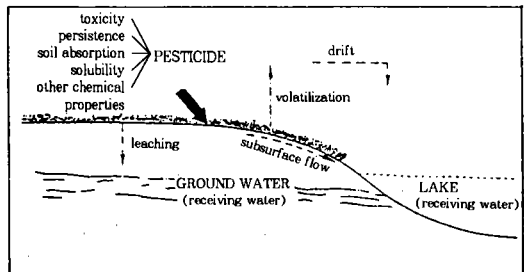


그림. 1. 농약성분의 이동과정과 수질에 미치는 요인

현장의 특성에 따라 다르겠으나 다음과 같은 방법들을 소개하는데, 이들은 이미 다른 지역에서 사용을 통해 효과가 만족스럽거나 양호한 것으로 입증된 방법들로써 새로운 방법을 개발하는 것도 좋지만 이들을 지역특성에 맞게 하나 또는 여러개의 방법을 적절히 사용할 때 바라는 효과를 기대할 수 있다.

- ① 현재와 과거의 병충해 문제, 작물의 재배형태, 그리고 살충제 사용에 대한 충분한 자료조사.
- ② 농약성분의 침출이나 유출가능성 평가를 위한 현장의 토양특성 고려.
- ③ 농약사용량을 절감시키기 위한 IPM 방법의 사용
 - 생물을 이용한 해충 억제 : 천적의 사용 및 천적생태계의 보존
 - 페로몬(pheromone)의 사용 : 해충의 파악과 다량 포획, 그리고 천적의 증식효과
 - 병충해문제를 감소시키기 위한 윤작
 - 개량된 경운방법의 사용
 - 피복식물의 사용 : 물의 효과적 사용, 지하수로의 농약성분 침투방지
 - 해충의 서식지 및 월동지의 파괴
 - 잡초씨앗의 경운과정에서 기계적인 파쇄
 - 경제성원리에 의한 농약투입
 - 환경적으로 유독성 및 이동성이 적고 분해가 용이한 농약의 개발 및 사용
 - 농약성분의 유출 및 손실을 최소화시킬 수 있는 투입시기의 선정
 - 보다 효과적인 투입방법의 사용
- ④ 농약사용이 불가피할 경우에는 농약의 분해성, 유독성, 유출 및 침출가능성 등을 제품에 부착되어 있는 안내서와 다른 요인들과 동시에 고려하여 결정.
- ⑤ 화학적인 농약의 사용에 의존하지 말고 유기농법의 사용 검토.
- ⑥ 농약살포기를 사용하는 계절마다 점검하며 투입량 재확인을 통한 손실방지.

농약성분 비점원오염의 관리방법에서 핵심이 되는 부분은 IPM의 적절한 사용인데 표-1에 여러 가지 작물에 대한 IPM방법의 과거에 사용했던 결과가 요약되어 있다. 표-1에서 알 수 있듯이 IPM을 적용하였을 경우 자료가 없는 경우를 제외하고는 거의 모든 연구결과가 농약사용과 작물생산비용의 감소를 나타내었다. 드물기는 하지만 표-1의 연구결과와는 달리 작물생산자가 어떤 병충이 있는지를 파악하고 난 후에 그들을 억제하기 위하여 여러 가지 농약을 투여하여 오히려 총사용량이 증가한 경우가 있기도 한다. IPM을 사용하였을 경우에 작물의 생산량은 대체적으로 증가하였으나 변함이 없거나 감소한 경우도 나타났다. 그러나 실질소득은 표-1에 나타나 있듯이 거의 모두 증가하였다. 이러한 연구결과 요약에 따르면 IPM을 선정하여 지역특성에 맞게 적용하면 농약사용량을 감소시키고 실질소득을 증가시켜서, 환경보호추진뿐만 아니라 농가의 실질소득 증대에도 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

표-2의 결과에 의하면 여러 가지 관리방법을 적용하였을 때 농약손실의 감소를 추정하였는데, 이들은 현장에서 종래의 경작방법에 의한 가상적인 경우에 비교하였다. 전통적인 토사유실 방지방법이 cotton에는 corn(표-3)이나 soybean에 비해 비효과적이었는데 이유는 대부분의 cotton이 상대적으로 평지에서 거의 토사유실이 없는 상태에서 재배되었기 때문이다. 토사유실 방지방법에 의한 농약손실 감소량은 대체로 20% 이하이며, 최적투여 기술이나 경제성에 근거한 투여 등은 40~85%로 이보다 훨씬 높은 감소율을 나타내어, 지형이 상대적으로 평탄한 지역에서는 토사유실 자체가 적으므로 토사유실 방지방법에 의한 농약손실의 감소는 많이 기대할 수 없음을 알 수 있다.

표-3에는 corn의 현장재배에서 여러가지 관

표-1. IPM 평가연구 요약(Virginia Cooperative Extension Service et al., 1987)

Author	Study ^a Object	Pesticide Use and/or ^b Cost of Production with IPM	Yield with ^c IPM	Net Return ^d with IPM	Level of ^e Risk with IPM
Sprott et al., 1976	C	D	I	I	-
Condra et al., 1977	C	D	D	I	-
Lacewell et al., 1977	C	-	-	I	-
Clarke et al., 1980	C	-	I	I	-
Von Rumker et al., 1975	T	D	-	I	-
Von Rumker et al., 1975	P	D	I	I	-
Burrowset al., 1983	C, Ci	D, D	-, -	-, -	-, -
Rajotte et al., 1984	S	D	-	I	-
Thompson et al., 1980	A	D	C	-	-
Larson et al., 1975	C	D	-	I	-
Masud et al., 1981	C	D	I	I	-
Huffaker and Croft, 1978	C, A	D, D,	I, -	-, -	-
Teage and Schulstad, 1981	C	D	-	-	-
Weathers, 1979-1980	Co, S, P	D, D, D	I, I, D	I, I, I	-
Lawrence et al., 1974	C	D	I	I	-, -, -
Lawrence et al., 1976	C	D	-	-	-
Casey et al., 1975	C	D	I	I	-
Allen and Roberts, 1974	S	D	-	I	-
Green et al., 1985	S	D	-	-	-
Lindsley et al., 1976	C	-	-	I	-
Friesbie et al., 1974	C	D	I	I	-
Friesbie, 1976	C	D	-	I	-
Hoyt and Callegirone, 1971	M	D	-	-	-
Croft et al., 1975	M	D	-	-	-
Howitt et al., 1966	A	D	-	-	-
Betiste et al., 1973	A	D	-	-	-
Eves et al., 1975	A	D	-	-	-
Hall, 1977	C	D	N	N	D
Prokopy et al., 1973	A	-	-	I	-
McGuckin, 1983	Al	D	-	I	D
King and O'Rourke, 1977	A	D	-	-	-
Camell and Way, 1977	F	-	-	I	D
Liapis and Moffit, 1983	C	-	-	-	D
Miranowski, 1974	C	D	-	-	-
Huffaker, 1980	C	D	-	-	-
Reichelderfer, 1979	Pe	D	-	I	-
Carlson, 1969	Pe	-	-	-	D
Carlson, 1979	C	-	-	-	D
Lazarus and Swanson, 1983	Co, S	-, -	-, -	-, -	I, I
Moffit et al., 1982	S	D	-	-	D
Hatcher et al., 1984	C, P, S	-, -, -	I, I, I	N, I, I	-, -, -
White and Thompson, 1982	A	D	-	-	-

a : C=cotton ; T=tobacco ; P=peanut ; Ci=citrus ; S=soybean ; A=apple ; Co=corn ; M=mite ;

Al=alfalfa ; F=field bean ; Pe=pecan ; Pc=peach.

b,c,d,e : C=constant ; D=decreased ; I=increased ; N=no impact ; - =no information.

농약에 의한 비점원오염의 관리대책

리 방법에 의한 농약성분의 손실 감소가 요약되어 있다. 이 연구도 표-2의 경우와 같이 현장에서 측정치를 가상적인 종래방법에 의한 손실량에 비교하였는데 지형의 조건에 따라 변동폭이 큰 것을 알 수 있다. 연구결과에 의하면 지형상 토사유실이 가능한 지역에서는 terracing이나 contouring과 같은 토사유실 방지방법이 상당히 효과적임을 알 수 있다.

표-1에서 표-3까지의 자료에서 보여주는 것처럼 농약성분의 농경지에서 손실은 여러가지 IPM방법을 적절히 현장조건에 맞게 적용시켰을 때 상당히 감소시킬 수 있다. 우리나라에서도 이러한 IPM방법의 도입이 가능하다고 판단되며, 따라서 농촌지형 및 특성에 따라 다양하게 적용할 수 있도록 여러가지 IPM의 연구, 개발, 그리고 교육 및 보급이 절실히 요구된다. 농약은 사용하지 않을 수 있으면 좋으나, 꼭 사용해야 한다면 경제성이 있을 경

표-2. 전통적인 Cotton 경작지에서 비교한 농약성분의 손실량 감소 가능성 추정(North Carolina State University, 1984)

Management Practice	Transport ^a Range Pesticide ^b	Routes of Affecte ^b Loss Reduction (%)
Terracing	SR and SL	0~20
Contouring	SR and SL	0~20
Reduced Tillage	SR and SL	-40~+20 AB
Grassed Waterways	SR and SL	0~10 AB
Sediment Basins	SR	0~10 AB
Filter Strips	SR	0~10 A
Cover Crops	SR and SL	-20~+10 B
Optimal Application Techniques	All Routes	40~80 A
Scouting Economic Thresholds	All Routes	40~65 A 0~30 B
Crop Rotation	All Routes	0~20 A 10~30 B
Pest Resistant Varieties	All Routes	0~60 A 0~30 B
Alternative Pesticides	All Routes	60~95 A 0~20 B

a : SR=surface runoff, SL=soil leaching.
b : A =In secticides, B=herbicides.

표-3. 전통적인 Corn 경작지에서 비교한 농약성분의 손실량 감소 가능성 추정(North Carolina State University, 1984)

Management Practice	Transport ^a Range Pesticide ^b	Routes of Affecte ^b Loss Reduction (%)
Terracing	SR and/or SL	40~75 AB
Contouring	SR and/or SL	15~55 AB
No-till	SR and/or SL	-10~+40 B -60~+10 A
Other Reduced Tillage	SR and/or SL	-10~+60 B -40~+20 A
Grassed Waterways	SR	-10~20 AB
Sediment Basins	SR	0~10 AB
Filter Strips	SR	0~10 AB
Cover Crops	SR and/or SL	0~20 B
Optimal Application Techniques	All Routes	10~20 20~40 B
Adequate Monitorong	All Routes	40~65 A 40~70 A
Crop Rotation	All Routes	10~30 B

a : SR=surface runoff, SL=soil leaching.
b : A =Insecticides, B=herbicides.

우에만 사용하여 사용량을 최소화하고, 사용방법과 시기를 신중히 결정하여 농약의 사용목적외에 손실되어 경제적으로나 환경적으로 불이익을 당하지 않도록 각별한 주의가 요구된다.

3. 요약

비점원오염은 여러가지가 있는데 그 중에서 농약에 의한 오염은 통제나 관리가 어려워서 효과적인 관리방법으로 IPM개념의 도입이 가장 적합하다고 판단되며, 미국에서 실제 적용해본 결과 우리나라에서도 지형적 특성이나 농업형태에 따라 적용할 수 있는 가능성이 있으며 이 부분에 관한 연구가 필요하다.

농약이란 제거 또는 억제하고자 하는 생명체에 위해를 가하는 화학약품이기 때문에 다

른 생명체에도 정도의 차이는 있으나 위해를 끼칠 수 있다. 이러한 농약성분들은 일정한 기간 약효를 나타내는 것이 특징인데, 제품에 따라서는 자연분해가 느려서 생태계에 오랫동안 잔류하는데, 이 경우에 잔류농약이 사용목적외에 다른 생태계로 이동하여 피해를 입히고 인체의 건강에도 악영향을 미치게 된다. 이처럼 생태계뿐만 아니라 인체의 건강에 직접적으로 피해를 줄 수 있는 농약은 사용에 신중을 기하고, 되도록 사용량을 감소시켜야 하며, 환경친화적인 농약제품의 개발과 안전하고 손실이 적으며 효과적인 농약투입방법의 사용이 요구된다.

참 고 문 헌

1. North Carolina State University, 1984, Best Management Practices for Agricultural Nonpoint Source Control : IV—Pesticides, North Carolina State University, national water Quality Evaluation Project, Raleigh, NC, USA.
2. USEPA, 1993, Guidance Specifying Management Measures for Sources of Nonpoint Pollution in Coastal Waters, 840-B-92-002, Washington, DC, USA.
3. Virginia Cooperative Extension Service, Virginia Tech., Virginia State, and U. S. Department of Agriculture Extension Service, 1987, The National Evaluation of Extension's Integrated Pest management (IPM) Programs, Virginia Cooperative Extension Publication 491-010.