

주요 하천수역에서 검출된 농약의 수서생물에 대한 위해성 평가

이지호 · 박병준* · 김진경¹ · 김원일 · 홍수명 · 임건재 · 홍무기

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부, ¹농촌진흥청 연구정책국 농자재관리과

(2011년 3월 2일 접수, 2011년 3월 18일 수리)

Risk Assessment for Aquatic Organisms of Pesticides Detected in Water Phase of Six Major Rivers in Korea

Ji-Ho Lee, Byung-Jun Park*, Jin-Kyung Kim¹, Won-Il Kim, Su-Myung Hong, Geon-Jae Im and Moo-Ki Hong

Department of Agro-Food Safety, National Academy of Agricultural Sciences (NAAS), Rural Development Administration, ¹Agro-Material Management Division, Research Policy Bureau, Rural Development Administration

Abstract

Risk assessments of pesticides detected in six major rivers during peak season were estimated for algae, *Daphnia*, and fish using hazard quotient (HQ) indexes. The eight pesticides (isoprothiolane, hexaconazole, diazinon, chlorpyrifos, prothiofos, alachlor, butachlor, molinate) were detected within the range of 0.027~12.871 µg/L. Detection frequency of isoprothiolate was estimated to be high at 67.5%, and those of the others varied from 15.0 to 37.5%. Hazard Quotients (HQ) indexes varied by freshwater organisms (algae, *Daphnia*, and fish). Overall, the ecological risk probability due to exposure of pesticides detected in major rivers did not reveal based on HQ indexes below 1.0. Particularly, butachlor and molinate for algae, chlorpyrifos, diazinon, prothiofos for *Daphnia*, and chlorpyrifos for fish acted as dominant contributors in increasing the ecological risk in six major rivers. This implied that integrated ecological risk assessment is required using various biological species, reflecting toxicity sensitivity. This study may provide the essential data in establishing the priority for pesticides management in major rivers, Korea.

Key words Aquatic organism, Major rivers, Pesticides, Risk Assessment

서론

농약은 농경지를 비롯한 개방계 지역에 인위적으로 살포되는 비점오염원으로써 환경적으로 제어가 어려운 물질이다(DeCoursey 등, 1985). 대기 중으로의 휘발, 표적·비표적 생물체에 의한 흡수, 제거 및 분해되는 것을 제외한 상당부분의 농약은 강우시 유출 및 침식, 지하수로의 용탈, 그리고 주변 하천 수역으로 배출되어 하천에 서식하고 있는 수 생태계와 먹이연쇄를 통한 인체에 유해한 독성영향을 유발한다(Albanis 등, 1998). 특히, 광범위하게 다량 사용하는 국내 벼 재배용

농약은 전체 농약 출하 성분량 중 30%를 차지하고 있기 때문에, 이러한 농약의 잔류성분이 하천수역으로 유입될 가능성이 높기 때문에, 수 생태계에 직접적으로 유해영향을 유발할 가능성이 크다. 벼 재배용으로 다량 사용하는 isoprothiolane은 살균제로서 전체 출하량 중 51%, diazinon은 살충제로서 전체 출하량 중 3%, butachlor와 molinate는 일년생 잡초제로 벼 재배용 제초제 중 37%와 15%를 차지한다(한국작물보호협회, 2010). 특히 molinate는 다른 제초제와 혼합제 형태로 주로 사용되는 수도용 제초제로서 경제적인 쌀 생산을 위해 중요한 농약성분이다. 선택성과 침투성으로 빠르게 흡수되며 단백질, 지질, 다당류의 생합성 억제, 막 기능 저해, 효소활성저해, 최종적으로는 세포기능을 저해하는 작용기전

*연락처 : Tel. +82-31-290-0504, Fax. +82-31-290-0505

E-mail: bjpark@korea.kr

을 보여준다(김 등, 2009).

국내 농약 등록관리법에서 제시하고 있는 농약의 생태위해성평가방법은 독성과 노출을 비교한 독성 노출비를 산출하여 평가한다(박 등, 2009). 또한 유럽과 미국의 선진국에서도 환경 중 잔류농도인 환경 추정농도(predicted environmental concentration; PEC) 또는 측정농도(measured environmental concentration; MEC)와 만성 독성값인 예측무영향농도(predicted non-effect concentration; PNEC) 또는 무영향관찰농도(non-observed effect concentration; NOEC)를 상호 비교한 위해지수로서 평가하고 있다(Muñoz et al., 2010). 생태계에 대한 유해영향 가능성이 우려되는 농약은 사용을 제한하거나 또는 등록을 보유하고 있는 실정이다. 현재 선진국들은 농약 등록 단계부터 인간과 환경 및 비표적 생물에 대한 위해성을 평가하여 관리하는 시스템을 관리·운영하고 있다(SANCO, 2002a). 우리나라, 미국, OECD에서는 조류(algae), 물벼룩(*Daphnia magna*), 어류의 다양한 수서 종에 대한 독성시험을 수행하여 생태독성정보를 제공하고 있다. 조류는 먹이를 공급하는 1차 생산자로서 농약으로 인한 성장 저해는 수 생태계의 균형을 파괴할 수 있다. 또한 수 생태계의 유해영향을 종합적으로 평가하기 위해서는 생물 종간의 민감도의 차이가 존재하기 때문에 다양한 생물 종에 대한 독성영향을 평가하는 것을 제안하고 있다(Brock 등, 2006). 실험실 내에서 표준 시험 종에 대한 농약의 생태독성정보는 1차적인 유해영향 가능성을 예측할 수는 있지만, 다양한 환경요인(stressor)이 결합하여 독성을 유발할 수 있는 실제 환경 내 생태계 상황을 반영할 수 없는 한계가 있다(배 등, 2008). 그럼에도 불구하고, 하천수역에서 검출되는 농약으로 인해 수서 생물 종의 독성 영향을 유발하는 사례 연구가 보고되고 있다(Byard, 1999; Fin-layson과 Faggella, 1986). 따라서, 농경지와 작물에의 살포 후의 행적 및 살포 외 지역으로의 유출양상연구, 그리고 하천수계 내 지속적인 잔류농약 모니터링을 병행한 수 생태계의 위해성을 평가하는 것은 하천 수계의 농약관리 측면에서 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내 주요 6대 하천수계에서 주로 검출되는 농약의 검출수준을 토대로, 수서 생물 종인 조류, 물벼룩, 어류에 대해 위해지수(hazard quotient indexes)를 이용한 생태 위해성을 평가하였다.

재료 및 방법

시료채취 및 방법

국내 주요 6대강 수계의 강 본류인 상류, 중류, 하류지점과

강 지류로 구분하여 지점을 선정하였고, 2006년 농약 사용성수기인 6월 중하순과 8월 중순에 하천수를 채취하였다. 한강수계 11, 금강수계 6, 만경강수계 7, 영산강수계 7, 낙동강수계 7, 섬진강수계 3지점을 포함하여 총 40지점을 선정하여 조사하였다. 채수한 시료는 실험실로 이동하여 4°C 냉장 저장한 후, 바로 전처리를 수행하였다. 용매로 추출한 시료는 분석 전까지 -20°C 냉동고에 보관 후 잔류농약 분석용 시료로 사용하였다.

조사농약 및 시약

가스크로마토그래피(NPD,ECD) 검출가능 농약으로 살균제 37, 살충제 62, 제초제 32종 및 잔류성농약성분(POPs) 9종 등 총 140성분에 대해서 1차적으로 다중분석법으로 조사하여, 검출성분에 대해서 가스크로마토그래피 질량분석기(GC/MS)를 이용하여 동정 확인하였다. 추출 및 정제용매로 acetone, acetonitrile, dichloromethane은 잔류농약 분석용HPLC급(Merck Co., Darmstadt, Germany)을 사용하였고, 컬럼 정제를 위한 florisil(80-100 mesh)은 PR grade(Sigma, St. Louis, MO, USA)를 사용하였다. 그리고 무수황산나트륨(sodium sulfate anhydrous)은 GR grade(Junsei, Tokyo, Japan)를 사용하였다.

잔류농약 분석

시료는 Whatman® No. 2 여지를 깬 Büchner funnel 상에서 흡인여과 하여 부유물질을 제거하고 separatory funnel에 1,000 ml를 취해서 포화 NaCl 50 ml, dichloromethane 50 ml를 넣고 3분간 격렬하게 흔든 후 정치하여 dichloromethane층을 분리하였고 위의 과정을 반복 추출하였다. Dichloromethane층을 무수황산나트륨을 통과시켜 40°C에서 감압 농축한 후 잔류물을 n-hexane 10 ml로 정용하여 정제시료로 하였다. 정제는 직경 1 cm의 pyrex glass column 하단부를 탈지면으로 막고 130°C에서 24시간 동안 활성화시킨 florisil 10 g을 가하여 충전 하고 그 위에 무수황산나트륨을 1.5 cm 높이로 깔고 n-hexane 50 ml를 흘려 보낸 다음 hexane에 녹인 시료액을 loading 한 후 6단계로 용매의 극성을 증가시켰다. 1단계는 dichloromethane: n-hexane(50/50, v/v), 2단계는 dichloromethane: n-hexane: acetonitrile(50/49.35/0.65, v/v), 3단계는 dichloromethane: n-hexane: acetonitrile(50/48.5/1.5, v/v), 4단계는 dichloromethane: n-hexane: acetonitrile(50/45/5, v/v), 5단계는 dichloromethane: acetonitrile(50/50, v/v), 6단계는 acetonitrile로 분획하여 각각 50 ml씩 용출시켜 40°C

Table 1. GLC operating conditions for pesticides analysis

Instruments	HP 6890 (Waters Co., MA, USA)
Detector	Nitrogen Phosphorus Detector (NPD, ECD)
Column	HP-1 Capillary column 30.0 m × 320 μm (i.d) × 0.25 μm (film thickness)
Column oven Temp.	60°C (2min)-5/min → 120°C-15/min → 270°C (15min)
Temp.	250°C (Injection port), 280°C (Detector)
Gas Flow rate	1.3 mL/min (Carrier N ₂), 3.7 mL/min (Hydrogen), 60 mL/min (Air), 3.7 mL/min (Make-up N ₂)

에서 감압 농축 후 n-hexane 5 mL로 재용리하여 GLC로 분석하였으며, GLC 분석조건은 Table 1과 같다.

수서 생물 종에 대한 위해성 평가

국내 주요 6대강 수역에서 높은 검출빈도를 보여준 잔류농약 8종의 노출수준 자료를 토대로 조류, 물벼룩, 어류의 단계별 다양한 생물 종을 이용하여 수 생태계의 위해 가능성을 평가하였다. 노출 농도와 농약별 다양한 생물 종에 대한 독성값을 비교하여 얻은 위해도 지수(hazard quotient indexes)에 근거하여 위해성을 평가하였는데, 불검출된 농약은 검출한계의 1/2값을 적용하였다(US EPA, 2006).

예측무영향농도(PNEC)값은 국제 표준시험 종인 조류(*Pseudokirchmeriella subcapitata*), 물벼룩(*Daphnia magna*), 어류(*Cyprinus carpio*)에 대한 50% 영향농도(EC50)값에 평가지수(assessment factor) 100을 나누어줌으로써 산출하였다(농촌진흥청, 2010; 국립환경과학원, 2010). EC50값에 대한 자료가 부재한 경우, 무영향관찰농도(NOEC)값으로 대체하여 사용하였고, 하나 이상의 EC50값이 있는 경우에는 가장 낮은 값을 위해성 평가 시 적용하였다. 해당 생물의 종의 EC50값에 대한 독성자료가 없는 경우에는 다른 종에 대한

독성자료로 대체하여 사용하였다. 검출된 농약에 대한 조류, 물벼룩, 어류 종에 대한 EC50값은 Table 3에 나타내었다. 각 생물 종별로 독성의 민감도가 다르기 때문에 다양한 시험 종에 대한 위해성 평가가 요구된다(Brock, 2000).

위해도 지수 (hq_{ij})는 각 측정지점 (i)에서 검출농약의 농도 (j)에 대한 위해 지수를 의미하며 다음과 같은 식에 의해 평가되었다.

$$hq_{ij} = \frac{C_{ij}}{PNEC_j}$$

Where C_{ij} : 시료 i에서 j 검출농약의 농도

$$PNEC_j = \frac{EC50_j}{100} : j \text{ 검출농약에 대한 예측무영향농도}$$

한 측정지점의 시료에서는 검출되는 농약이 하나 이상으로 존재하기 때문에, 그들의 결합영향(joint effect)이 고려되어야 한다. 검출되는 농약에 대한 additive 모델을 적용하여 측정지점별 전체적인 위해성을 평가하기 위해 HQ indexes를 적용하여 평가할 것을 제안한다(Von der Ohe 등, 2009). 따라서, 각 하천수역의 수서생물에 대한 위해 가능성은 검출

Table 2. Pesticides detected in six major rivers of Korea

Detected pesticides	Mean (μg/L)	95th percentile (μg/L)	Min.~Max. (μg/L)	Detection frequency (%)	Detection limit (μg/L)
Isoprothiolane	0.092	0.162	N.D.~0.179	67.5	0.010
Hexaconazole	0.027	0.039	N.D.~0.040	17.5	0.010
Diazinon	0.029	0.096	N.D.~0.123	15.0	0.005
Chlorpyrifos	0.165	0.251	N.D.~0.252	25.0	0.010
Prothiofos	0.086	0.121	N.D.~0.125	32.5	0.020
Alachlor	0.095	0.178	N.D.~0.197	15.0	0.030
Butachlor	0.113	0.194	N.D.~0.242	37.5	0.020
Molinate	12.871	25.176	N.D.~30.263	17.5	0.040

N.D.: Not Detected

된 농약의 작용기전이 동일하다는 가정하에 측정지점별로 농약이 조류, 물벼룩, 어류 중에 노출되었을 때 나타나는 위해 지수를 합하여 전체적인 위해 가능성을 다음과 같은 식에 의해 산출하였다.

$$HQ_i = \sum_j hq_{ij}$$

측정지점별로 조류, 물벼룩, 어류 종별 위해 가능성에 대한 각 검출농약의 상대적인 기여도를 평가하는 것은 하천 수계별로 농약관리를 위한 우선순위를 결정하는 데 있어서 중요한 자료이며 다음과 같은 식에 의해 산출하였다.

$$hq_{ij} (\%) = \frac{hq_{ij}}{\sum_j hq_{ij}} \times 100 = \frac{hq_{ij}}{HQ_i} \times 100$$

결과 및 고찰

하천 수역 내 검출된 농약 분포

국내 주요 하천수역 내 검출빈도가 높은 농약성분은 살균제 isoprothiolane과 hexaconazole, 살충제 diazinon, chlorpyrifos, prothiofos, 제초제alachlor, butachlor, molinate 총 8종으로 확인되었고, 검출 빈도와 검출 수준은 Table 2에 제시하였다. 벼 이앙 초기에 주로 발생하는 목도열병과 육묘상도열병에 사용하는 isoprothiolane 성분은 평균 0.092 µg/L로 검출되었고, 67.5%의 높은 빈도로 검출되었다. 이는 단위면적당 투하량이 많은 입체 형태로 살포되어 논물에 주로 잔류되면서 강우나 배수시에 하천으로 유출되기 때문인 것으로 판단된다. 농약 성수기에는 논물에서의 중점적인 농약관리를 통해

하천으로의 배출을 최대한 억제하는 방안이 요구되어진다. Isoprothiolane 이외의 농약은 15~37.5% 범위의 검출빈도를 보여주었다. 또한, 벼 이앙 후 14일 이전에 중기 제초제로 많이 살포되는 butachlor와 molinate성분의 검출빈도는 각각 37.5%, 17.5%로 조사되었다. 2001년 하천수 중 molinate의 검출빈도는 6월에 53%, 7월에 21%로서 높게 나타났으나, 2003년도에는 검출빈도가 크게 감소하였다(김 등, 2009). 이는 농약안전성 재평가로 출하제한에 따른 농약관리에 의한 농경지에서의 살포량이 감소되었기 때문으로 판단되며, 2009년부터는 사용이 제한되었다. Molinate 평균 농도는 12.87 µg/L로 음용수 허용기준인 6 µg/L를 초과하였고, 최대 30.26 µg/L까지 검출되었다(WHO, 1996). 2001년 하천수에서 측정된 molinate는 평균 4.8 µg/L, 최대 39.4 µg/L로 검출되어 유사한 검출범위 보여주었다(김 등, 2009). 위 물질은 일본 후쿠시마현과 나가노현, 미국 캘리포니아에서 대량 잉어 폐사의 원인물질로 밝혀졌고(Fin-layson과 Faggella, 1986). 설치류와 어류에 대한 독성을 유발함으로써 인해 미국 보호환경청에서는 설치류와 어류에 대한 molinate 독성자료를 제출토록 하였다(US EPA, 2002). Isoprothiolane 성분은 평균 0.092 µg/L, 최대 0.179 µg/L으로 검출되었고, 이러한 검출수준은 1997년과 1998년에 남한강 지류 복포천에서 검출된 농도(0.2~1.9 µg/L)에 비해서 낮았다(박 등, 2007). 벼 이화병 나방 및 굴파리 방제용인 diazinon 성분은 평균 0.029 µg/L, 최대 0.123 µg/L으로 현 국내 음용수 기준인 20 µg/L를 초과하지 않았다. 또한 1996년 측정된 남한강 지류 복포천에서의 2.0 µg/L의 검출수준에 비해 낮은 수준으로 조사되었다. 벼 제초제인 butachlor 성분 또한 평균 0.113 µg/L, 최대 0.242 µg/L로 검출되었다. 이는 1997년과 1998년 남한강 지류 복

Table 3. EC50 value used to calculate PNEC (by dividing EC50 by an assessment factor of 100) for algae, *Daphnia*, and fish for pesticides detected in six major rivers

Detected pesticides	EC50 or LC50 (mg/L)			References
	Algae (<i>P.subcapitata</i>)	Daphnia (<i>D.magna</i>)	Fish (<i>C.carpio</i>)	
Isoprothiolane	4.58	19.00	11.40	BCPC, 2009
Hexaconazole	1.70 ^a	2.90	5.94 ^b	BCPC, 2009
Diazinon	6.40	0.00096	7.60	Hughes, 1988; BCPC, 2009
Chlorpyrifos	0.48 ^a	0.0017	0.002 ^c	BCPC, 2009
Prothiofos	2.30 ^d	0.014	0.50 ^e	BCPC, 2009
Alachlor	0.012	13.00	5.80 ^e	BCPC, 2009
Butachlor	0.0018	2.40	0.574	BCPC, 2009
Molinate	0.22	14.90	16.00 ^e	BCPC, 2009

^a; Unknown species (AERU, 2009), ^b; Mirror carp, ^c; Bluegil sunfish, ^d; *Scenedesmus subspicatus*, ^e; Rainbow trout

포천에서 측정된 1.1~4.2 $\mu\text{g/L}$ 와 0.3 $\mu\text{g/L}$ 검출수준에 비해서 낮게 나타났으며 시간이 지남에 따라 감소되는 경향을 보여 주었다(박 등 2007).

수서 생물에 대한 위해성평가

국내 주요 6대 하천 수역 내 검출된 농약에 대한 수서 생물 3종의 노출에 따른 위해 가능성을 위해 지수(HQ indexes)에 의해 평가하였다(Table 4). 본 연구에서 검출된 농약이 수서 생물에 노출되었을 때, 모든 하천수역에서 위해 지수가 1.0을 초과하지 않았기 때문에 수 생태계 위해 가능성은 없는 것으로 조사되었다(Water Environment Research Foundation, 1996). 그러나, 영산강 수역에서 물벼룩에 대한 위해 지수가 0.1을 초과하여 잠재적인 위해 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 위해 지수를 각 하천 수역별로 살펴보면, 한강 수역에서는 0.003~0.020, 금강 수역에서는 0.006~0.032, 만경강 수역에서는 0.003~0.037, 영산강 수역에서는 0.054~0.109, 낙동강 수역에서는 0.003~0.042, 그리고 섬진강 수역에서는 0.080~0.100으로 평가되었다. 영산강과 섬진강 수역을 제외한 나머지 하천수역에서는 조류에 대한 위해 가능성이 물벼룩과 어류에 비해 높은 것으로 나타났다. 특히 영산강과 섬진강 내 잔류된 농약은 조류와 어류 중에 비해 물벼룩에 대한 위해 가능성이 높게 나타났다. 그러나, 수계에 검출된 농약이 환경 중 지속성이 크지 않아서 수서 생물로의 축적성 또한 높지 않을 것으로 판단된다(BCPC, 2009; AERU, 2009). 하천 수역 내 수서 생물 종에 대한 위해성을 나타내는 각 검출 농약별 위해 지수의 기여도를 평가하는 것은 수계 농약 관리를 위한 우선순위를 선정하는 데 있어서 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 국내 주요 하천 수계 내 수서 생물 3종에 대한 위해 지수결과를 토대로 각 검출농약의 위해 지수 기여도를 Fig. 1에서 나타내었다.

국내 주요 6대 하천 수역에서 검출된 농약 중 조류에 노출되었을 때의 위해 지수의 기여도는alachlor, butachlor, molinate

성분이 타 농약에 비해 상대적으로 높게 조사되었다. 전 하천 수역에서 조류 노출에 대한 위해 지수의 기여도는 butachlor 성분이 59~98%로 가장 높았다. Molinate성분은 한강, 금

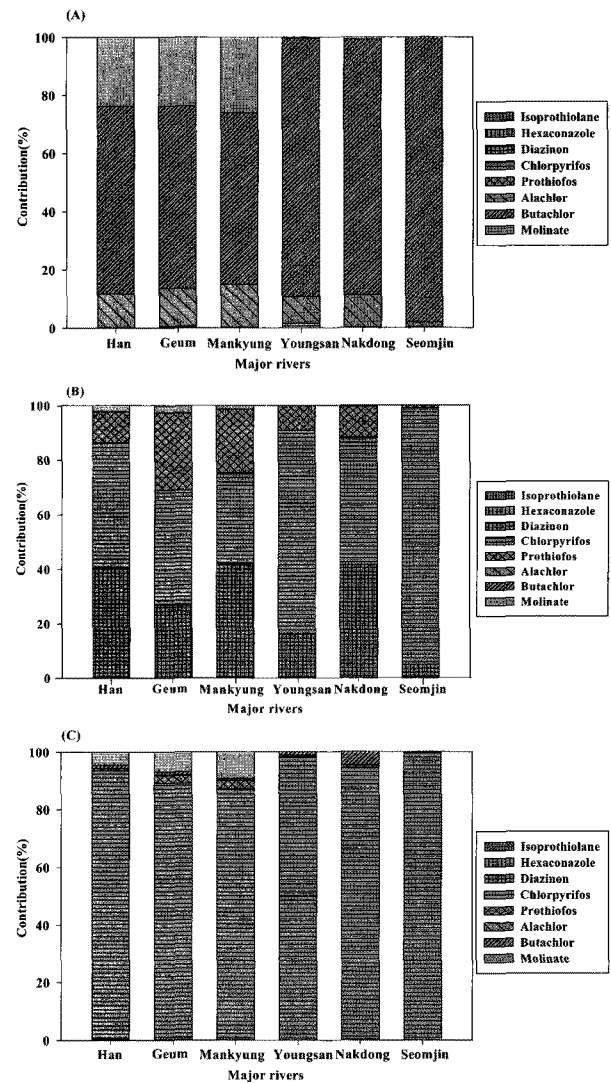


Fig. 1. Percent contribution of detected pesticides to HQ indexes for algae (A), *Daphnia* (B), and fish (C) in major rivers of Korea.

Table 4. Hazard Quotient indexes for algae, *Daphnia*, and fish in six major rivers

Major rivers	Number	HQ indexes		
		Algae	<i>Daphnia</i>	Fish
Han	11	0.020	0.006	0.003
Geum	6	0.032	0.013	0.006
Mankyung	6	0.037	0.027	0.003
Youngsan	7	0.054	0.109	0.082
Nakdong	7	0.042	0.006	0.003
Seomjin	3	0.085	0.100	0.080

강, 만경강 수역에서 24~26%의 조류 노출에 따른 위해 지수 기여도를 보여주었고, alachlor 성분은 섬진강 수역을 제외한 나머지 하천수역에서 9~15%의 조류 노출에 따른 위해 지수 기여도를 보여주었다. 물벼룩에 대해서는 전 하천수역에서 chlorpyrifos 성분에 대한 위해 지수 기여도가 33~94%로 가장 높게 조사되었고, 그 외 diazinon, prothiofos 순으로 나타났다. 특히 섬진강 수역에서 chlorpyrifos 성분에 대한 물벼룩 노출에 따른 위해 지수가 94%로 다른 수역에 비해 높았다. Diazinon와 prothiofos 성분의 물벼룩 노출에 대한 위해 지수 기여도는 섬진강을 제외한 전 하천수역에서 각각 16~42%와 9~28%로 나타났다. 한강, 금강, 만경강 수역에서 molinate 성분에 대한 물벼룩 노출에 따른 위해 지수 기여도는 1.3~2.2%으로 조류 종에 비해 낮게 조사되었다. 전 하천수역에서 chlorpyrifos 성분에 대한 어류 노출에 따른 위해 지수 기여도는 87~99.6%로 매우 높게 나타났다. 그 다음으로는 한강, 금강, 만경강 수역에서 molinate 성분이 4.5~9.2%의 어류에 대한 위해 지수 기여도가 조사되었다. 특히 prothiofos 성분은 금강과 만경강 수역에서 2.7~2.8%의 어류 노출에 따른 위해 지수 기여도를 보여주었고, butachlor 성분은 낙동강 수역에서 4.5%, 그 외 농약성분은 모든 하천수역에서 1% 이하의 위해 지수 기여도를 보여주었다.

이상의 결과를 토대로 2006년 농약 성수기인 6월과 8월에 주요 6대 하천수역에서 검출된 농약 중 위해 지수의 기여도는 수서 생물 종별로 다양하게 나타났는데, 조류는 butachlor와 molinate 성분에 의해, 물벼룩은 chlorpyrifos, diazinon, prothiofos 성분에 의해, 어류는 chlorpyrifos 성분에 의해 위해 지수의 기여도가 높게 나타난 것으로 조사되었다. 그러나, 수서 생물 종에 대한 위해 지수의 기여도가 높은 농약성분들이 환경 중 분해 및 흡착능이 매우 강하지 않고, 중간 정도의 지속성(persistence)을 가진 것으로 보고되고 있다. Molinate, butachlor, 그리고 chlorpyrifos는 토양의 호기성 조건에서의 분해 반감기가 각각 28일, 56일, 50일이었고, 수계에서의 반감기는 molinate를 제외하면 지속성이 없이 다소 빠르게 분해되는 것으로 보고되고 있다(AERU, 2009). 또한, 본 연구는 실험실 내 제한된 조건에서 얻은 수서 생물 종에 대한 독성값을 토대로 위해 가능성을 평가한 결과이므로, 실제 환경 내 발생하는 수서 생물에 대한 위해 영향을 파악하지 못하는 한계가 있다. 따라서, 실제 환경 내 발생할 수 있는 흡착/분해 등의 거동과 농약의 물리화학적 특성에 의한 생물 농축성(bioconcentration factor; BCF), 그리고 희석을 고려한 다양한 물리·화학적·생물학적 환경 요인들을 고려하여 향후 통합적인 위해 가능성을 평가할 필요성이 있음을 제안한다.

>> 인 / 용 / 문 / 헌

- Agriculture and Environment Research Unit (AERU) (2009) Pesticide Properties Data Base (PPDB).
- Albanis, T. A., D.G. Hela, T.M. Sakellarides, and I.K. Konstantinou (1998) Monitoring of pesticide residues and their metabolites in surface and underground waters of Imathia (N. Greece) by solid phase extraction disks and gas chromatography. *J. Chromatogr. A* 824:59~71.
- British Crop Production Council (BCPC) (2009) *The World Compendium-The Pesticide Manual I,II Fifteenth Edition.*
- Brock, T.C.M. (2000) Ecological risks of pesticides in freshwater ecosystems. Part 1: Herbicides. *Alterra-report 088*, Wageningen, The Netherlands. 127.
- Brock, T.C.M., G.H.P. Arts, L. Maltby, and P.J. Van den Brink (2006) Aquatic risk of pesticides, ecological protection goals, and common aims in European Union Legislation. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 2(4):e20~e46.
- Brock, T.C.M., R.P.A. Van Wijngaarden, and G.J. Van Geest. (2000) Ecological risks of pesticides in freshwater ecosystems. Part 2: Insecticides. *Alterra-report 089*, Wageningen, The Netherlands. 142.
- Byard, J.L. (1999) The impact of rice pesticides on the aquatic ecosystems of the Sacramento River and Delta (California). *Reviews of environmental contamination and Toxicology* 159:95~110.
- DeCoursey, D. G. (1985) Mathematical models for nonpoint water pollution control. *J. soil water conservat.* 40:408~413.
- Finlayson, B.J. and G.A. Fagella (1986) Comparison of laboratory and field observation of fish exposed to the herbicides molinate and thiobencarb. *Trans. Am. Fish. Soc.* 12:212~215.
- Hughes, J. (1988) The Toxicity of Diazinon Technical to *Selens-trum capricornutum*. US EPA-OPP Registration Standard.
- Muñoz, I., M.J. Martínez Bueno, A. Agüera, and A.R. Fernández-Alba (2010) Environmental and human health risk assessment of organic micro-pollutants occurring in a Spanish marine fish farm. *Environ. Pollut.* 158:1809~1816.
- [SANCO] Santé des Consommateurs. (2002a) Guidance document on aquatic ecotoxicity in the context of the Directive 91/414/EEC. European Commission, Health & consumer protection Directorate-General, SANCO/3268/2001 rev. 4(final). Brussels (BE).
- US EPA (2000) Data quality assessment: statistical methods for practitioners EPA QA/G-9S, EPA/240/B-06/003.
- US EPA (2002) Molinate; Availability of Risk Assessment, <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-PEST/2002/April/Day-02/p7946.htm>.
- Von der Ohe, P.C., E. De Deckere, A. Prüß, I. Muñoz, G. Wolfram, M. Villagrassa. (2009) Towards an integrated risk assessment of the ecological and chemical status of European river basins.

- Integr. Environ. Assess. Manag. 5(1):50~61.
- Water Environment Research Foundation (1996) Aquatic ecological risk assessment: a multi-tiered approach. Alexandria, Virginia.
- WHO (1996) WHO Guidelines for Drinking-water Quality, Chemical hazards in drinking water-molinate.
- 김병석, 박연기, 홍순성, 양유정, 박경훈, 정미혜, 김세리, 박경훈, 예완해, 김두호, 홍무기, 안용준, 신진섭 (2009) 2종의 수서곤충 *Chironomus riparius*와 *Cloeon dipterum*의 유충성장단계별 molinate 급성독성 비교. 농약과학회지 13(4):256~261.
- 박경훈, 김찬섭, 박병준, 이병무, 최주현, 정미혜, 김병석, 박현주 (2007) 남한강 지류 북포천 유역의 농약 잔류량 조사. 농약과학회지 11(4):230~237.
- 박병준, 김진경, 박상원, 이병무, 김원일 (2008) 시험연구사업보고서, 농산물안전성연구(II)-농용수 중 잔류농약 오염도 평가연구, 국립농업과학원.
- 박연기, 배철한, 김병석, 이제봉, 유아선, 홍순성, 박경훈, 신진섭, 홍무기, 이규승, 이정호 (2009) Butachlor의 수서생물에 대한 위해성평가. 농약과학회지 13(1):1~12.
- 배철한, 박연기, 김연식, 조경원, 이석희, 정창국 (2008) 담수조류의 벼재배용 농약 6종에 대한 감수성 비교. 농약과학회지 12(3):222~228.
- 한국작물보호협회 (2010) 농약사용지침서.
- 농촌진흥청 (2010) 농약관리법령 및 고시·훈령집.
- 국립환경과학원 (2010) 고시집.

주요 하천수역에서 검출된 농약의 수서생물에 대한 위해성 평가

이지호 · 박병준* · 김진경¹ · 김원일 · 홍수명 · 임건재 · 홍무기

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부, ¹농촌진흥청 연구정책국 농자재관리과

요약 국내 주요 6대 하천수역 내 농약 성수기에 검출된 농약의 검출수준을 조사하였고, 수서 생물 3종(조류, 물벼룩, 어류)의 농약 노출에 따른 위해 가능성을 위해 지수(HQ indexes)에 의해 평가하였다. 총 40지점의 모니터링을 실시한 결과, 검출농약은 살균제isoprothiolane, hexaconazole, 살충제 diazinon, chlorpyrifos, prothiofos, 제초제 alachlor, butachlor, molinate의 총 8종으로 확인되었다. 그 중 isoprothiolane이 67.5%의 높은 빈도로 검출되었고, 그 이외의 농약은 15~37.5% 범위의 검출빈도를 나타내었다. 검출빈도는 butachlor >, prothiofos >, chlorpyrifos >, hexaconazole, molinate > diazinon, alachlor순으로 조사되었다. 전 하천수역에서 수서 생물 3종(조류, 물벼룩, 어류)에 대한 위해 지수가 1.0을 초과하지 않았기 때문에 수 생태계에 대한 위해 가능성이 없는 것으로 평가되었다. 주요 하천수역 내 수서 생물의 위해 가능성에 대한 각 검출 농약의 상대적인 기여도를 평가한 결과, 수서 생물 종별로 다양하게 나타났다. 조류는 butachlor 와 molinate성분에 의해, 물벼룩은 chlorpyrifos, diazinon, prothiofos 성분에 의해, 어류는 chlorpyrifos성분에 의해 위해 지수의 기여도가 높게 조사되었다. 본 연구결과는 하천 수계별 농약관리의 우선순위를 선정하는 데 있어 필수자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

색인어 수서생물, 주요하천수계, 농약, 위해성평가