농약과학회지 제18권 제4호 (2014)
Vol. 18, No. 4, pp. 236-246 (2014)
Open Access http://dx.doi.org/10.7585/kjps.2014.18.4.236
ORIGINAL ARTICLES / RESIDUE

Online ISSN 2287-2051
Print ISSN 1226-6183

농약의 노출 평가를 위한 수계예측모형의 적용

손경애* · 김찬섭 · 길근환 · 김택겸 · 권혜영 · 김진배 · 임건재 · 임양빈
농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부

Application of Water Model for the Evaluation of Pesticide Exposure

Kyeong-Ae Son*, Chan-Sub Kim, Geun-Hwan Gil, Taek-Kyum Kim, Hyeyoung Kwon Jinbae Kim, Geon-Jae Im and Yang-Bin Ihm

*Department of Agro-food safety, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju, 565-851, Korea

(Received on October 21, 2014. Revised on October 27, 2014. Accepted on November 8, 2014)

Abstract Pesticide is used to protect the crops, but also become a cause of polluting the environment. Perform a risk assessment using physical and chemical properties, environmental fate and toxicity data in order to determine the pesticide registration. The aquatic model estimates pesticide concentrations in water bodies that result from pesticide applications to rice paddies and apple orchard. The used models are the PRZM, EXAMS and AGRO shell (PA5), Rice Water Quality Model (RICEWQ) and Screening Concentration In GROund Water (SCI-GROW). The residual concentration of water body was estimated using meteorological data, crop calendar and soil series of Korea. The chosen pesticides were butachlor, carbofuran, iprobenfos and tebuconazole. It has shown the potential that the RICEWQ is possible to predict residue level in water of butachlor and iprobenfos, because the maximum value in water monitoring data is lower than the peak concentration of the model, and the minimum value is lower than the average annual concentration of the model. But RICEWQ was insufficient to predict exposure concentrations in ground water. The estimated exposure concentrations of carbofuran in ground water is very higher than in surface water because of its low soil adsorption coefficient. Although tebuconazole were not detected in the water monitoring that means very low concentration, it is possible that the PA5 can be used to predict residue level in water.

Key words rice paddies, water model, RICEWQ, SCI-GROW, PA5

서 론

농약을 등록하기 위하여 물질의 독성평가와 인체 및 환경에 대한 노출평가가 필요하다. 농약살포로 인한 수계 중 잔류농도 추정에는 수계예측모형이 활용되는데 단계별 의사결정체계를 미리 적용함으로써 신규물질 등록 및 개발에 관한 위험을 최소화한다. 미국 EPA는 지표수 예측모형으로 Surface Water Concentration Calculator (SWCC), Tire I Rice Model, FQPA Index Reservoir Screening Tool (FIRST), 지하수 예측모형으로 Screening Concentration In GROund Water (SCI-GROW), The Pesticide Root Zone Model for Ground Water (PRZM-GW)를 사용한다(US EPA, 2014). 미국 EPA에 음용수 및 생태 노출 평가를 수행하기위한 2단계 표준 rice 모형이 없기 때문에 fipronil 및 propanil의 위해성을 평가하는 과정에서 평가를 지원하기 위해 RICEWQ 모형이 사용되었다(US EPA, 2006, US EPA, 1998). SWCC는 이전에 the PRZM and EXAMS model shell (PE5)를 대신한 모델이며, 캐나다에서 연구목적으로 이용되는 the PRZM, EXAMS and AGRO shell (PA5)는 EPA의 PE5로부터 개발되었다(US EPA, 2014; Stone environment, 2008). 유럽연합은 FOrum for Co-ordination of pesticide fate models and their USe (FOCUS)의 지표수 모델, 벼재배용 모델 Med-rice 및 the European Union System for the Evaluation of Substances (EUSES)를 위해성평가에 이용하

*Corresponding author
Tel: +82-63-238-3356, Fax: +82-63-238-3839
E-mail: sky199@korea.kr

고 있다(FOCUS, 2001; Med-Rice, 2003; EU, 2008). 일본은 면적 100 km^2 의 모델 면적 중에 논 500 ha, 밭 750 ha를 배치하고, 하천 면적 2.0 km^2 의 60%는 본천, 40%는 지천으로 배분하여, 농약 살포량과 비산을 고려한 수계예측농도를 구해 생태독성 시험 값과 비교한다(JMAFF, 2014).

국내 환경추정농도는 농약제품, 적용작물, 사용방법별로 산출하지만 노출량이 많을 것으로 예상되는 경우를 대표 조건으로 평가한다. 환경추정농도 산출에는 EU, 미국, 일본 등의 등록당국에서 사용하는 예측모형이나 적합성이 검토된 모형을 사용하거나, 적합성이 충분히 검토되지 않은 모형은 안전계수를 적용하여 제한적으로 적용할 수 있지만 적절한 예측모형의 활용이 어려운 경우에는 실제조건의 포장시험 성적으로 평가하고 있다.

이 등(2005)은 생태 위해성평가를 수행하기 위해 농약의 분자량, 수용성, 증기압, 매질별 반감기, 토양 흡탈착계수, 매질별 확산계수 같은 물리화학적 특성값과 살포방법을 입력 매개변수로 하였다. 살포 횟수, 시기, 살포량 등의 자료를 이용하여 미국 EPA의 GENeric Estimated Environmental Concentration (GENECE)와 FOCUS 모형을 이용하여 수계노출평가를 수행하였다.

본 연구에서는 선진국에서 이용되고 있는 예측모형들의 입력값 중 기상자료와 작물 시나리오를 국내 자료로 수정하여 노출평가에 이용할 수 있는 예측모형을 구축하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

본 연구에서 농약의 환경 중 분배와 행적을 예측하기 위한 수계 예측모형은 RICEWQ와 PA5를 이용하였다. 유럽이나 미국 EPA에서 제공하는 수계노출 프로그램은 파라미터를 변경 할 수 없게 되어 있으므로 매개변수를 바꿀 수 있는 Waterborne Environmental Inc.의 무료 다운로드 버전인 RICEWQ version 1.90를 사용하였다. RICEWQ는 FORTRAN 언어로 만든 모델이다(Williams et al. 2011). 미국 EPA의 PE 예측모형은 모든 시나리오를 바꿀 수 없는 반면에 Perl 언어로 짜여진 PA5는 기상파일을 대체할 수 있고 작물시나리오를 변경해도 구동이 가능하다. 두 모형은 연구용으로 사용되고 있지만 단순한 살포량과 농약의 물리화학적 특성뿐 아니라 대상작물의 재배력, 기상자료, 토성 등 농약 이외의 다른 요인들을 고려하여 runoff에 따른 지표수 중 잔류농도를 예측할 수 있다.

지하수 중 잔류농도를 예측하기 위하여 미국 EPA에서 1단계 평가에 사용하는 SCI-GROW를 이용하였다. 이 예측모형은 기상자료나 작물 시나리오가 필요하지 않다.

농약 선정

예측모형에 적용한 농약은 butachlor, iprobenfos, carbofuran, azoxystrobin, tebuconazole으로 수계 모니터링에서 검출빈도가 높거나 사용량이 많은 것들이다(박, 1998; 박, 2008). 농약의 처리방법은 농약사용지침서의 내용에 준하여 다음과 같이 가정하였다(KCPA, 2014).

Butachlor 5% 입제는 이앙 후 5~7일에 3 kg/10a (1.5 kg a.i./ha) 수준으로 수면처리 하는 것으로 설정을 하고, iprobenfos 17% 입제는 6월 10일, 17일에 4 kg/10a (6.8 kg a.i./ha)을 살포하는 것으로 하였다. Carbofuran 3% 입제는 5월 25일에 4 kg/10a (1.8 kg a.i./ha)을 모내기 직전 수면전면처리 하는 것으로 하였다.

원예용 살균제인 azoxystrobin과 tebuconazole는 살포 횟수가 많고 적용대상 작물이 다양하다. 포도나무에 azoxystrobin 10% 수화제를 1,000배액으로 희석하여 10a 당 450 L를 살포한다면 1회 살포시 투여되는 유효성분량은 0.45 kg a.i./ha이다. 노균병, 갈색무늬병, 탄저병을 방제하기 위하여 10일 간격으로 최대 5회까지 살포한다. 사과나무에 tebuconazole 25% 수화제를 1,000배액으로 희석하여 10a 당 450 L를 살포한다면 1회 살포시 유효성분량은 1.125 kg a.i./ha이다. 갈색무늬병, 점무늬병, 겹무늬썩음병, 탄저병을 방제하기 위하여 10일 간격으로 최대 3회 살포한다.

Azoxystrobin, tebuconazole 등 농약의 물리화학적 특성은 EU의 농약 데이터베이스, JMPR(1995) 평가 보고서 및 농약 매뉴얼을 참고하였다(EFSA, 2009; MacBean, 2012).

기상파일

수원지역의 기상파일을 RICEWQ, PA5 두 모형에 함께 사용하였다. 기상자료는 기상청으로부터 1981년부터 2010년까지의 수원 기상자료를 받아 모형에 필요한 기상파일로 가공하여 이용하였는데 txt 파일로 받아 엑셀에서 편집하여 dvf 파일로 저장하였다. 파일명은 'W00000.dvf' 형태를 사용하였다. 미국에서는 기상자료로 1961년부터 1990년까지 30년 자료를 사용하고 있는데, 기상자료의 연도가 바뀌면 모형이 구동되지 않으므로 우리나라 기상자료의 1981년을 1961년으로, 2010년을 1990년으로 변경하였다. 기상파일에는 강수량, 증발량, 평균온도, 풍속, 일사량, 증발산량, 습도, 운량, 에어로졸이 포함되어 있다(Fig. 1). 증발산량(Evapotranspiration from a reference surface)은 FAO ETo Calculator를 이용하여 구하였다(Raes, 2012). 에어로졸 광학깊이(AOD, Aerosol Optical Depth)는 태양복사가 대기의 상한에서 지표까지 도달하는 동안 기체 중에 존재하는 여러 성분들에 의해 감쇄되는 효과를 나타내는 척도인데 기상청에서 자료를 제공받을 수 없어서 미국 NASA (2014) 홈페이지에 게재된 안면도 등 국내 7개 지역의 월 평균값을 매년 같은 값으로 입력하였다. 일별로 기록된 AOD값을 적용해

Date	Precipitation	Pan Evaporation	Temp.	Wind Speed	Solar Radiation	FAO Short Grass Eto	Daylight Station Pressure	Daylight Relative Humidity	Daylight Opaque Sky Cover	Daylight Temp	Daylight Broad-band Aerosol	Daylight Prevailing Wind Speed	Daylight Prevailing Wind Direction
mmddyy	cm/day	cm/day	℃	cm/sec	Langleys /day	mm /day	KiloPascal	%	Tenths of sky covered	℃	Optical Depth	m/sec	degrees(N=0, E=90, ...)
010161	0.90	0.02	-3.1	390.0	329.8	0.4	101.0	97	9	-1.9	0.370	3.2	171
010261	0.02	0.07	-9.1	390.0	1675.5	0.6	101.4	64	6	-7.0	0.370	4.9	290
010361	0.00	0.13	-14.5	170.0	2409.2	0.3	102.1	61	0	-9.6	0.370	3.0	221
010461	0.00	0.12	-17.3	50.0	2227.6	0.2	102.4	62	0	-15.3	0.370	1.4	159
010561	0.00	0.15	-16.7	110.0	2426.0	0.3	102.5	5	0	-9.0	0.370	2.0	199

Fig. 1. A example of meteorological file of Suwon in 1981.

Table 1. Irrigation and drainage in RICEWQ

Month to drain, irrigate, or stop irrigation paddy	5	5	5	6	7	7	7	8	9	9
Day to drain, irrigate, or stop irrigation paddy	13	20	25	1	10	17	20	15	15	25
Flag for drain/no irrigation (0), automatic irrigation (1)	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0
Depth of water to initiate irrigation (cm)	2	2	2	2	2	2	5	2	2	2
Depth of water to termiate irrigation (cm)	5	5	5	5	5.1	5.1	7	4	3	3
Irrigation rate (cm/day)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Depth of paddy outlet (cm)	15	15	0	15	0	15	15	15	15	0
Maximum drainage rate (cm/day)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

야 하지만 그 값을 구할 수 없어서 월별로 기록된 값을 해당 월에 일괄 적용하였다. 우리나라 관측지점(년도)은 안면도(1999, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2006, 2007), 백령도(2010, 2011), 진해(1999), 고산(2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011), 광주(2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012), 고려대(2012), 경일대(2012), 부산대(2012), 서울대(2000, 2001, 2002, 2003, 2012, 2013), 연세대(2011, 2012, 2013)이며 500 nm에서 관측된 AOD 값을 이용하였다.

토양자료

농촌진흥청이 누리집 '흙토람'을 통하여 제공하는 토양통의 토층별 토심, 수분장력, 유기물 함량 등 물리화학적 특성을 이용하였다(RDA NAAS, 2014). 예측모형 RICEWQ에는 논토양 토양통인 부용, 덕평, 강서, 김제, 광활, 규암, 함창, 호남, 화동, 전북, 지산, 만경, 옥천, 평택, 사촌, 석천, 신답, 신현, 월곡, 예천, 용지, 유가통을 적용하였고, PA5 모형에는 과수원 토양통인 용지통을 적용하였다.

작물 시나리오

작물 시나리오는 농촌진흥청이 제공하는 작물재배기술 정보 및 사과와 포도 탑프루트 매뉴얼에서 발췌하여 자료를 입력하였다(RDA, 2012a; RDA, 2012b). RICEWQ의 입력값은 이앙일, 수확일, 관개와 배수 일자, 수심, 관개와 배수 속도 등 이다. PA5에 입력되는 작물 시나리오는 재배지 경사, 토층별 용적밀도, 포장용수량, 최대용수량, 작물의 최대 뿌리 깊이, 최고 수관 높이, 수관의 최대 면적밀도, 경작기간 등 이다.

노출 평가

살포 방법, 시기, 횟수, 살포량 등의 자료를 이용하여 SCI-GROW, RICEWQ 및 PA5에 의한 토양통별 노출 농도를 비교, 평가하였다. 30년 동안 예측농도를 추정하여 RICEWQ의 90th percentile 농도와 PA5의 상위 10 백분위 농도를 평가에 이용하였다.

결과 및 고찰

RICEWQ 입력값

논에서 농약유출을 예측하기위한 모형식에서 벼 이앙기를 5월 25일, 수확기를 10월 15일, 엽 최성기를 8월 15일로 설정하고 이에 따른 관개 및 배수 자료는 Table 1과 같이 작성하였다. 토양변수 중 삼출율(Seepage rate)은 0.2 cm/ha/day, 논의 표면적은 10 ha로 하였다. 부유된 저니토의 농도는 50 ppm, 저니토의 용적밀도는 1.2 g/mL로 고정하였다. 포장용수량과 유기탄소 함량 등은 '흙토람'의 22종 토양통 자료에 따라 Table 2와 같이 입력하였다. 농약의 흡착에 영향을 주는 유기탄소의 함량은 광활통이 0.29%로 가장 낮고, 사촌통이 2.20%로 가장 높았다. 대부분의 농약은 유기물 함량이 낮은 토양에서는 이동성이 증가하며, 유기물 함량이 높은 토양에서는 이동성이 감소하는 것으로 알려져 있다(오 등, 2002).

모형의 구동에 사용된 농약의 살포 방법은 Table 3과 같으며 선정된 농약의 물리화학적 특성은 Table 4와 같다. Carbofuran은 이앙 당일 육묘상 처리하였으며, iprobenfos는

2회 살포, butachlor는 이앙 후 입제로 처리하였다. 농약의 처리시 비산은 고려하지 않고 살포효율은 1로 하였다.

Table 2. Input soil parameters for RICEWQ

Soil series	Field capacity (cm/cm)	Wilting point (cm/cm)	Organic carbon (%)
Buyong	0.377	0.116	1.450
Deogpyeong	0.364	0.159	1.618
Gangsseo	0.339	0.073	1.061
Gimje	0.552	0.226	1.050
Gwanghwal	0.184	0.056	0.290
Gyuam	0.444	0.127	1.346
Hamchang	0.425	0.193	0.951
Honam	0.372	0.100	1.218
Hwadong	0.369	0.146	1.566
Jeonbug	0.303	0.086	1.224
Jisan	0.444	0.286	1.879
Mangyeong	0.251	0.076	0.812
Ogcheon	0.356	0.130	1.328
Pyeongtaeg	0.365	0.144	0.789
Sachon	0.404	0.138	2.204
Seogcheon	0.404	0.153	1.468
Sindab	0.098	0.029	0.418
Sinhyeon	0.420	0.125	0.916
Weolgog	0.238	0.086	1.566
Yecheon	0.392	0.178	0.847
Yongji	0.380	0.146	1.369
Yuga	0.442	0.228	1.340

RICEWQ 결과값

RICEWQ는 10 ha의 경작지에서 나온 물이 인근의 20,000 m^3 수계로 흘러간다는 가정을 하고 벼재배용 농약의 수계노출 평가를 하였다. 기존 시나리오는 미국의 쌀 재배지 캘리포니아(CA), 아칸소(AR), 미시시피강 유역의 루이지애나를 포함하는 걸프(Gulf) 지역에 관한 시나리오만 제공하지만 예측모형의 변수들을 변경할 수 있었다. 토양의 특성, 관개와 배수, 작물 시나리오, 농약의 이화학성 및 농약처리방법이라는 5가지의 매개변수로 구성된다(Williams et al. 2011).

위 조건들을 반영한 벼 재배용 농약의 수계 예측모형인 RICEWQ 결과값을 토양통별로 살펴보면 90th percentile 연평균 잔류농도는 Table 5와 같다. Butachlor를 1.5 kg a.i./ha로 처리했을 때 최대값은 광활통 0.6626 μg/L, 최소값은 사촌통 0.1823 μg/L이었고 중위수는 0.2560 μg/L이었다. Carbofuran을 1.8 kg a.i./ha로 처리했을 때는 최대값 0.3801 μg/L, 최소값 0.2528 μg/L이었다. Iprobenfos를 6.8 kg a.i./ha로 7일 간격 2회 처리했을 때 최대값은 광활통 4.711 μg/L, 최소값은 사촌통 1.011 μg/L이었고 중위수는 1.672 μg/L이었다. 유기탄소 함량이 높은 사촌통보다 함량이 낮은 광활통에서 butachlor와 iprobenfos 농도가 높았지만 토양 흡착계수가 낮은 carbofuran은 토양통간 잔류농도의 차이가 작았다.

RICEWQ는 예측농도를 초기(instant), 96시간, 21일, 60일, 90일 농도로 나타낸다. 노출 평가에서 급성 노출은 잔류농도가 가장 높은 peak 농도를 이용하고, 만성 노출은 60일 농도를 이용한다(이 등, 2005). 약제처리 후 경과일수별 수계노출농도는 90th percentile 농도로 표현되며 butachlor는

Table 3. Applied application method of test pesticides for RICEWQ

Parameter	Pesticide		
	Butachlor	Iprobenfos	Carbofuran
Number of application	1	2	1
Application rate (kg/ha)	1.5	6.8, 6.8	1.8
Application typer	Ground spray	Ground spray	Ground spray
Application date	June 2	June 10, 17	May 25

Table 4. Physicochemical properties of test pesticides

Property	Pesticide		
	Butachlor	Iprobenfos	Carbofuran
Molecular weight	311.9	288.34	221.26
Water Solubility (mg/L)	16	540	353.9
Koc (L/kg)	1747	580	22
Photolysis half-life (days)	17.2	11.6	108
Hydrolysis halflife (days)	1000	276	46
Sediment halflife (days)	36	15	53
Unsaturated soil halflife (days)	72	15	27

Table 5. 90th percentile estimated environmental annual average concentration by RICEWQ (Unit: μg/L)

Soil series	Pesticide		
	Butachlor	Iprobenfos	Carbofuran
Buyong	0.2369	1.470	0.3545
Deogpyeong	0.2211	1.328	0.3380
Gangsseo	0.2868	1.983	0.3462
Gimje	0.2891	2.002	0.3792
Gwanghwal	0.6626	4.711	0.2570
Gyuam	0.2486	1.585	0.3801
Hamchang	0.3064	2.181	0.3275
Honam	0.2639	1.745	0.3539
Hwadong	0.2258	1.368	0.3427
Jeonbug	0.2625	1.738	0.3313
Jisan	0.2012	1.160	0.3290
Mangyeong	0.3372	2.476	0.3007
Ogcheon	0.2496	1.605	0.3373
Pyeongtaeg	0.3426	2.534	0.3165
Sachon	0.1823	1.011	0.3689
Seogcheon	0.2350	1.454	0.3513
Sindab	0.5177	3.938	0.2528
Sinhyeon	0.3149	2.249	0.3564
Weolgog	0.2255	1.368	0.3195
Yecheon	0.3293	2.396	0.3164
Yongji	0.2455	1.557	0.3419
Yuga	0.2482	1.592	0.3337

Table 6, iprobenfos는 Table 7과 같았다. Butachlor의 instant 농도는 1.386~4.992 μg/L, 60일 농도는 0.659~2.482 μg/L이었으며, iprobenfos의 instant 농도는 11.43~62.82 μg/L, 60일 농도는 5.295~26.06 μg/L이었다. 미국 EPA Tier I Rice Model은 처리량과 토양 흡착계수만을 입력하여 논에서 사용된 농약으로부터 지표수 중 농도를 추정한다(US EPA, 2014). Table 3의 살포량과 Table 4의 토양흡착계수로 지표수 중 농도를 추정하면 butachlor 451.7 μg/L, carbofuran 1669 μg/L로 추정되어 RICEWQ를 통해 토양통별로 추정한 butachlor의 instant 농도 1.386~4.992 μg/L와 carbofuran의 instant 농도 9.919~12.13 μg/L보다 매우 높음을 알 수 있었다(Table 9). 여러 변이요인이 반영된 2단계 예측모형 값은 1단계 예측모형 값보다 매우 낮으므로 단계별 평가를 위해서는 국내 환경을 반영할 수 있는 2단계 모형이 유용하다고 생각된다.

RICEWQ로 산출한 지표수 중 instant 농도는 butachlor 4.992 μg/L, carbofuran 12.13 μg/L, iprobenfos 62.82 μg/L로서 어류의 96시간 반수치사농도는 butachlor 0.574 mm/L(잉어), carbofuran 22 mm/L(무지개송어), iprobenfos 18.2 mg/L(잉어)와 비교하면 산출된 농도가 어류의 반수치사농도보다 매우 낮음을 알 수 있었다(MacBean, 2012). 실제 모니터링에서 벼 재배기간인 7월에 주요 강에서 iprobenfos가 0.02~0.2 μg/L, butachlor가 0.02~1.08 μg/L로 검출되었고,

Table 6. 90th percentile estimated environmental concentration of butachlor according to days after treatment by RICEWQ (Unit: μg/L)

Soil series	Instant	96 hour	21 day	60 day	90 day
Buyong	1.836	1.755	1.390	0.8717	0.6633
Deogpyeong	1.707	1.631	1.292	0.8102	0.6161
Gangsseo	2.236	2.134	1.693	1.064	0.8289
Gimje	2.259	2.156	1.710	1.075	0.8381
Gwanghwal	4.992	4.707	3.788	2.482	1.951
Gyuam	1.929	1.842	1.458	0.9161	0.6975
Hamchang	2.396	2.285	1.813	1.140	0.8971
Honam	2.054	1.961	1.554	0.9758	0.7503
Hwadong	1.744	1.667	1.320	0.8281	0.6296
Jeonbug	2.041	1.948	1.544	0.9697	0.7457
Jisan	1.541	1.474	1.167	0.7321	0.5568
Mangyeong	2.630	2.505	1.991	1.260	0.9869
Ogcheon	1.942	1.855	1.469	0.9222	0.7020
Pyeongtaeg	2.687	2.560	2.034	1.290	1.004
Sachon	1.386	1.327	1.052	0.6589	0.5012
Seogcheon	1.820	1.740	1.378	0.8644	0.6578
Sindab	3.892	3.717	2.973	1.973	1.558
Sinhyeon	2.458	2.343	1.860	1.171	0.9197
Weolgog	1.740	1.663	1.317	0.826	0.6280
Yecheon	2.571	2.450	1.946	1.225	0.9632
Yongji	1.901	1.816	1.439	0.9028	0.6871
Yuga	1.929	1.843	1.461	0.9162	0.6975

Table 7. 90th percentile estimated environmental concentration of iprobenfos according to days after treatment by RICEWQ
(Unit: μg/L)

Soil series	Instant	96 hour	21 day	60 day	90 day
Buyong	17.08	15.55	13.54	8.060	5.688
Deogpyeong	14.70	13.42	12.08	7.175	5.072
Gangsseo	24.97	22.72	18.72	10.95	7.699
Gimje	25.26	23.00	18.92	11.06	7.775
Gwanghwal	62.82	57.61	48.79	26.06	18.12
Gyuam	18.83	17.14	14.63	8.705	6.136
Hamchang	28.03	25.51	20.86	12.07	8.474
Honam	21.28	19.37	16.24	9.607	6.764
Hwadong	15.38	14.03	12.48	7.427	5.248
Jeonbug	21.18	19.28	16.16	9.569	6.737
Jisan	12.60	12.01	10.41	6.109	4.324
Mangyeong	32.61	29.67	24.25	13.74	9.635
Ogcheon	19.13	17.42	14.85	8.817	6.215
Pyeongtaeg	33.50	30.49	24.88	14.06	9.858
Sachon	11.43	10.89	9.013	5.295	3.725
Seogcheon	16.79	15.30	13.38	7.956	5.615
Sindab	52.28	47.57	40.22	21.68	15.10
Sinhyeon	29.08	26.46	21.64	12.45	8.742
Weolgog	15.38	14.03	12.48	7.427	5.248
Yecheon	31.37	28.54	23.30	13.29	9.319
Yongji	18.39	16.75	14.39	8.549	6.028
Yuga	18.93	17.24	14.70	8.741	6.161

양평과 밀양지역의 농경지 하천수 중에서 butachlor가 0.7~4.2 μg/L, iprobenfos가 0.3~9.4 μg/L로 검출되었다고 보고된 바 있다(박, 2008; 박, 1998). 모니터링 시료에서 검출된 잔류량은 RICEWQ로 산출한 butachlor 및 iprobenfos의 instant 농도보다 낮았고, 검출된 최소값은 두 농약의 연평균농도보다 낮아서 우리나라 논 조건에서 사용되는 농약의 유출평가에 RICEWQ 예측모형을 이용 할 수 있다고 생각된다.

SCI-GROW

무료로 다운로드한 RICEWQ version 1.90는 outflow에 따른 오염정도를 예측할 수 있지만, leaching에 따른 지하로의 오염정도를 확인할 수 없어서 미국 EPA 에서 지하수 1단계 평가 모델로 사용하는 SCI-GROW를 구동하여 농약별 잔류농도를 비교하였다. 변수들을 입력하여 SCI-GROW의 예측농도는 carbofuran 137 μg/L, iprobenfos 0.394 μg/L, butachlor 0.0375 μg/L으로서(Table 10) RICEWQ에서 산출한 Carbofuran의 지표수 중 instant 농도 9.919~12.13 μg/L (Table 8)보다 지하수 중 농도가 매우 높았으며 iprobenfos 및 butachlor의 지하수 중 농도는 지표수 중 농도보다 낮음을 알 수 있었다. 토양 흡착계수가 낮은 carbofuran은 이동성이 높아 leaching에 따른 오염 가능성이 높고, iprobenfos 및 butachlor는 leaching보다 outflow에 따른 유실량이 많은 것으로 판단된다. 논에서 사용된 농약의 환경 중 잔류농도를 예측하기 위하여 RICEWQ를 이용할 경우는 SCI-GROW를 함께 비교할 필요가 있었다.

PRZM-GW는 EPA가 지하수 중 잔류 농도를 예측하는 2단계 모형이다. PRZM-GW의 입력 변수 중 Screen length (m)는 지하 1 m가 보편적이므로 국내 '흙토람' 토양통의 자료를 이용할 수 있지만, 지하 10 m의 depth of aquifer에 관한 자료를 구하지 못하여 구동할 수 없었다.

PA5 입력값

과수원에서의 농약유출을 예측하기위한 예측모형식으로서 본 시험에서 사용한 예측모형은 PA (PRAM, EXAMS and AGRO shell)5_v1.4b 이다. PA는 기존 미국 62개의 지역 작물 시나리오와 지역별 기상자료를 이용하여 환경 중 잔류농도를 예측한다(Stone environmental Inc, 2008). 기존의 모델에 별도의 파일을 추가할 수 없어 파일 폴더에서 기존의 자료 대신 새로 만든 자료로 대체하여 운영하였다.

미국 EPA에서 제공하는 수계노출 프로그램 EXPRESS 또는 PE는 입력 변수를 변경하여 이용할 수 없었으므로 연구용으로 사용되는 프로그램 PA5를 사용하였다. PA5는

Table 8. 90th percentile estimated environmental concentration of carbofuran according to days after treatment by RICEWQ
(Unit: μg/L)

Soil series	Instant	96 hour	21 day	60 day	90 day
Buyong	11.28	8.330	4.937	2.155	1.437
Deogpyeong	10.69	8.060	4.713	2.054	1.371
Gangsseo	11.36	8.237	4.880	2.105	1.404
Gimje	12.13	8.774	5.250	2.305	1.538
Gwanghwal	10.90	7.753	4.077	1.563	1.042
Gyuam	11.69	8.752	5.210	2.311	1.542
Hamchang	11.14	7.963	4.674	1.992	1.328
Honam	11.35	8.297	4.952	2.152	1.435
Hwadong	10.85	8.157	4.785	2.084	1.390
Jeonbug	10.84	8.002	4.678	2.014	1.343
Jisan	10.67	7.923	4.552	2.000	1.334
Mangyeong	10.95	7.637	4.333	1.828	1.219
Ogcheon	10.88	8.113	4.751	2.050	1.367
Pyeongtaeg	11.33	7.842	4.574	1.925	1.283
Sachon	11.72	8.606	5.019	2.243	1.496
Seogcheon	11.14	8.248	4.898	2.136	1.424
Sindab	9.919	7.673	3.884	1.538	1.025
Sinhyeon	12.04	8.492	5.002	2.167	1.445
Weolgog	10.59	7.617	4.464	1.943	1.295
Yecheon	11.15	7.799	4.548	1.924	1.283
Yongji	10.96	8.142	4.797	2.079	1.386
Yuga	10.75	8.081	4.697	2.029	1.353

Table 9. Estimated environmental concentration in surface water by Tier I Rice Model

Pesticide	Butachlor	Carbofuran
Parameters		
Application rate (kg/ha)	1.5	1.8
Koc (L/kg)	1747	22
Result (μg/L)	451.7	1668.8

EPA의 PE와 동일한 입력 변수와 동일한 결과값 양식으로 구성되어 있다. 모형에서는 실제 미국 일리노이주의 Shipman City Lake를 '지표 저수지'로 설정하고 있다. 427 에이커의 경작지에서 유출된 농약이 인근의 Shipman City Lake로 흘러들어가며, 저수지 면적은 13 acre이고 깊이는 2.74 m로 가정된다. 쌀을 제외한 미국의 지역별 작물별로 62개의 시나리오가 작성되어 있다. 경작지에서 지표 저수지로 흘러간 후 저니토와 수계 중 잔류농도를 추정한다. 지표저수지의 수계 부피는 144,000 m^3, 저니토 부피는 1314 m^3, 저니토 깊이는 0.05 m이다(Stone environmental Inc, 2008).

PA는 새로운 작물 시나리오의 추가가 가능하지 않아 기존의 시나리오 파일을 대체하는 방법으로 이용하였다. 기상파일은 RICEWQ에서 사용된 파일과 동일하다. PA를 구동하기 위한 농약의 물리화학적 특성은 Table 11과 같다.

Table 10. Estimated environmental concentration in underground water by SCI-GROW

Pesticide	Butachlor	Iprobenfos	Carbofuran
Parameters			
Application rate (lb/acre)	1.338	6.067	2.9
Number of application	1	2	1
Koc (L/kg)	1747	580	22
Soil metabolism halflife (days)	36	15	321
Result (μg/L)	0.0375	0.394	137

작물별 농약 살포는 다음과 같이 가정하였다. 사과는 tebuconazole 25% 수화제를 1,000배액으로 희석하여 10a 당 450 L를 살포하는 것으로 설정하였으며 1회 살포시 유효성분량은 1.125 kg a.i./ha이었다. 갈색무늬병, 점무늬병, 겹무늬썩음병, 탄저병을 방제하기 위하여 10일 간격으로 3회 살포한다. 최초 약제 살포일은 6월 1일로 정하였다. 사과 지상부의 엽 출현기는 4월 1일, 엽 최성기 'crop maturation'은 6월 3일, 수확기 'crop harvest'는 엽 최성기의 마지막 일자로 10월 25일로 설정하였다. 포도는 azoxystrobin 10% 수화제를 1,000배액으로 희석하여 10a 당 450 L를 살포하는

Table 11. Chemical properties and environmental fate parameters of pesticides

Chemical property	Pesticide	
	Azoxystrobin	Tebuconazole
Molecular Weight	403.4	307.8
Henry's Law Const. (atm m^3/mol)	7.30E-14	1.45E-10
Vapour Pressure (torr)	8.30E-04	12.75
Solubility (mg/L)	6.7	36
Koc (L/kg)	1133	429.7
log Kow	2.5	3.7
Melting Point (°C)	116	105
Test Temperature (°C)	20	20
Aq. Photolysis halflife (days)	13.9	48
Water halflife (days)	13	365
Benthic halflife (days)	180	1000
Soil halflife (days)	121	91.6

것으로 가정하였는데 1회 살포시 유효성분량은 0.45 kg a.i./ha이다. 노균병, 갈색무늬병, 탄저병을 방제하기 위하여 10일 간격으로 5회 살포하며 최초 약제 살포일은 6월 1일로 입력하였다. 포도 지상부의 출현기는 5월 1일, crop maturation은 6월 1일, crop harvest는 10월 1일로 가정하였다.

토양의 이화학성은 전체 과수원 면적의 12%를 차지하는 용지통을 적용하였다. 경사도 15%, 용적밀도는 1.3 g/cm^3으로 하였고 지층별 입력값은 Table 12와 같다. 살포에 따른 비산은 0.16%, 살포효율은 0.95로 설정하였다. 입력변수 중 범용토양유실공식(Universal soil loss equation, USLE) 값은 적절한 자료가 없어 입력하지 않았다. 펜실베이니아 사과와 뉴욕 포도 시나리오 중 USLE 관련 값을 사용하였다.

Table 12. Input parameters of soil layer with Yongji series

Parameter	Value
Number of horizons	4
Horizon number	1
Thickness of horizon (cm)	15
Initial soil water content in horizon (cm^3/cm^3)	0.38
Thickness of compartments in horizon (cm)	0.1
Field capacity in horizon (cm^3/cm^3)	0.38
Wilting point in horizon (cm^3/cm^3)	0.146
Organic carbon in horizon (%)	1.369
Horizon number	2
Thickness of horizon (cm)	15
Initial soil water content in horizon (cm^3/cm^3)	0.337
Thickness of compartments in horizon (cm)	2
Field capacity in horizon (cm^3/cm^3)	0.337
Wilting point in horizon (cm^3/cm^3)	0.146
Organic carbon in horizon (%)	0.667
Horizon number	3
Thickness of horizon (cm)	50
Initial soil water content in horizon (cm^3/cm^3)	0.446
Thickness of compartments in horizon (cm)	2
Field capacity in horizon (cm^3/cm^3)	0.446
Wilting point in horizon (cm^3/cm^3)	0.24
Organic carbon in horizon (%)	0.551
Horizon number	4
Thickness of horizon (cm)	40
Initial soil water content in horizon (cm^3/cm^3)	0.424
Thickness of compartments in horizon (cm)	2
Field capacity in horizon (cm^3/cm^3)	0.424
Wilting point in horizon (cm^3/cm^3)	0.172
Organic carbon in horizon (%)	0.18

PA5 결과값

사과 과수원에 1.125 kg a.i./ha로 3회 살포한 tebuconazole의 수계 중 연 평균 농도의 30년 평균값은 36.72 μg/L이었으며 저니토 중 평균값은 37.86 μg/L이었다(Table 13). 포도 과수원에 0.45 kg a.i./ha로 5회 살포한 azoxystrobin의 수계 중 평균 농도의 30년 평균값은 0.79 μg/L이었으며 저니토 중 평균값은 0.63 μg/kg이었다(Table 13). 상위 10 백분위에 해당하는 수계 중 peak 농도는 tebuconazole 0.056299 mg/L, azoxystrobin 0.005911 mg/L이었다. 어류의 96시간 반수치사농도는 azoxystrobin 1.6 mg/L(잉어), tebuconazole 4.4 mg/L(무지개송어)인데 모형을 통한 두 농약의 peak 농도는 어류의 반수치사농도보다 매우 낮았다(MacBean, 2012). 수계내 잔류농약은 유기탄소흡착계수가 작고 수용해도가 큰 농약의 잔류 가능성이 높고 반감기가 길수록 장기간에 걸쳐 유출될 수 있다(심, 2009). 총 살포량 대비 지표수 중 연 평균 농도는 농약의 반감기가 길고 수용해도가 높은 tebuconazole이 azoxystrobin에 비하여 높은 경향이었다. Tebuconazole은 2006년과 2008년에 수행된 전국 6대강 수계모니터링에

Table 13. 0.1 Probit Estimated environmental concentration by PA5 (Unit: μg/L)

Pesticide	Segment	Peak	4 days	21 days	60 days	90 days	Yearly	Average of yearly averages
Azoxystrobin	Water	5.911	5.281	4.412	3.512	2.679	0.851	0.792
	Benthic	1.568	1.567	1.546	1.418	1.303	0.676	0.626
Tebuconazole	Water	56.299	55.999	54.771	52.329	50.815	44.248	36.723
	Benthic	44.474	44.474	44.464	44.383	44.273	42.525	37.857

서 4월 중순과 6월 중하순, 8월 하순과 9월 초순에 시료 채취하여 분석한 결과 검출되지 않았다(박, 2008). 수계 모니터링에서 두 농약성분의 검출을 확인하지 못하여 예측모형의 결과값과 비교하지 못하였으나 tebuconazole이 검출되지 않았다는 것은 주변 환경으로 유출되지 않았다는 의미로 해석할 수 있다. 미국은 음용수 및 생태 노출 평가를 위하여 모니터링 결과와 모형을 통한 환경추정농도를 이용하는데 주변의 옥수수 경작지에서 빈번하게 사용되는 제초제 atrazine으로 안전 음용수법(safe Drinking Water Act)의 준수에 문제가 있었던 'Shipman City Lake'를 시뮬레이션을 위한 지표저수지로 선정하고 수계모형 시나리오를 만들었다(Burns, 2006). 국내에서 PA 모형을 적용하기 위한 사례연구는 지표 저수지의 선정과 주변 과수작물의 농약 사용 조사 및 수계와 저니토 중 잔류농약경감양상 조사를 통하여 가능할 것으로 생각된다.

등록신청 농약의 검토시 사용 환경에서의 잔류농약의 행적을 예측하는 모형식을 이용한 단계별 평가방법의 적용이 국제적인 추세이다. 모델이 개발된 북미의 작물재배 형태, 기상과 농약의 살포시기가 우리나라와 다르기 때문에 한국형 모델이 필요하다. 본 연구에서는 외국의 예측모델에 국내 자료들을 대입하여 수계 중 농약의 잔류농도를 예측해 보았다. 그러나 예측값이 실제와 얼마나 근접하는지 확인할 수 있는 사례연구는 수행하지 못하였다. Karpouzas 등(2006)은 이탈리아 북부의 논에서 cinosulfuron과 pretilachlor의 경감과 노출을 계산하는 세 가지 모델의 비교 시험을 하였는데 그 중 RICEWQ 1.6.4v가 모델링 효율 값 0.78-0.93으로 논물과 논토양에서 측정 농도와 예측 농도 사이에 가장 높은 근사값을 나타내었다. 예측모형 Pesticide concentration in paddy field (PCPF-1)는 논물에서 제초제의 손실을 제대로 반영하지만 논토양에서 토양 흡착에 대한 높은 친화력을 가진 화학 물질, pretilachlor의 농도는 크게 과소평가된다고 하였으며 예측모형 Surface water and ground water (SWAGW)는 상대적으로 논물에서 제초제의 경감을 잘 반영 하지만 논토양에서 농약 경감을 실제에 가깝게 예측하는데 실패했다고 보고하였다(Karpouzas, 2006). Watanabe와 Takagi (2000)는 일본 농업환경기술연구소 소재 시험 논 포장에서 pretilachlor를 처리하고 논물과 깊이 1 cm의 저니토 중 농약의 잔류경감양상을 52일간 조사하여, 지표수와 지하수로의 농약이동을 제어하고 농약의 행적과 이동 과정을 조사하는 수단으로써 PCPF-1의 적합성을 조사하는 사례연구를 수행하였다. 국내에서도 지표수로의 이동은 논 포장에서 이화학적 특성이 다른 농약들의 논물과 저니토 중 잔류경감양상을 조사하여 RICEWQ 모형의 적합성을 검증하고 지하수로의 이동은 SCI-GROW와 라이시미터 시험결과를 통하여 2단계 모형인 PRZM-GW의 적용을 검토 할 수 있을 것으로 기대된다. 예측모형을 농약평가에 적용하기 위해서는 수계예측모형의 결과값을 잔류농약 모니터링 자료와 비교하고 또한 모형에 대입한 매개변수가 반영된 실제 포장에서의 유출시험을 수행하여 결과의 근접성을 판단해 보는 사례연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업(과제번호: PJ0086312014)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

Literature cited

Burns, L. A. (2006) User Manual for EXPRESS, the "EXAMS-PRZM Exposure Simulation Shell". EPA/600/R-06/095, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. pp.26-28.

European Food Safety Authority. Conclusion on pesticide peer review regarding the risk assessment of the active substance carbofuran. EFSA Scientific Report (2009) 310. pp.1-132.

EU Pesticides database (1998) Review report for the active substance azoxystrobin. Review Report: Inclusion 1998. http://ec.europa.eu/sanco_pesticides/public/?event=activesubstance.detail. Accessed 30 September 2014.

European Union System for the Evaluation of Substances (2008) EUSES 2.1.1 User Manual http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/our_activities/public-health/risk_assessment_of_Biocides/euses. Accessed 30 September 2014.

FOCUS (2001). "FOCUS Surface Water Scenarios in the EU Evaluation Process under 91/414/EEC". Report of the FOCUS Working Group on Surface Water Scenarios, EC Document Reference SANCO/4802/2001-rev.2. pp.1-245.

Japan Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2014) About attach documents to the registration application of

pesticides. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries production director notification No. 3987. http://www.acis.famic.go.jp/shinsei/13-3987.pdf. Accessed 30 September 2014.

Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues (1995) Pesticide residues in food 1994 Evaluations Part I Residues - tebuconazole. FAO Plant Production and Protection Paper. 131:1055-1056. http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/pests/jmpr/jmpr-rep/en/. Accessed 30 September 2014.

Karpouzas D. G., S. Cervelli, H. Watanabe, E. Capri and A. Ferrero (2006) Pesticide exposure assessment in rice paddies in Europe: a comparative study of existing mathematical models. Pest Manag Sci. 62:624-636.

Korea Crop Protection Association (2014) Agrochemicals Pesticide Use Guide Book; Korea Crop Protection Association; Korea, pp.180, 219, 278, 644, 952

Lee Y. J., K. Kim and Y. H. Kim (2005) Initial risk assessment system of pesticides. The Korean Journal of pesticide science 9:214-220.

MacBean C. (2012) The Prsticide Manual 16th. British Crop Production Council; Hampshire, UK, pp.63, 140, 158, 660, 1063.

MED-Rice (2003). Guidance Document for Environmental Risk Assessments of Active Substances used on Rice in the EU for Annex I Inclusion. Document prepared by Working Group on MED-Rice, EU Document Reference SANCO/1090/2000 – rev.1, Brussels, pp.1-108.

Oh S. S., H. N. Hyun, D. K. Moon, and J. B. Chung (2002) Estimation of pesticide leaching potential using GUS, RF and AF index in Cheju Citrus orchard soils 21:7-16.

Park B. J. (2008) Pollution assessment study of pesticide residues in agricultural water. National academy of agricultural science Research project report. pp.1120-1130. http://lib.rda.go.kr/newlib/search/. Accessed 30 September 2014.

Park K. H. (1998) Survey of pesticide loadings in agricultural environment and biota change. National academy of agricultural science Research project report. pp.72-80. http://lib.rda.go.kr/newlib/search/. Accessed 30 September 2014.

Raes D. (2012) The ETo Calculator reference manual Version 3.2. Food and Agriculture Organization of the United Nations Land and Water Division FAO; Via delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy, pp.1-37. http://www.fao.org/nr/water/docs/ReferenceManualV32.pdf. Accessed 30 September 2014.

Rural Development Administration (2012a) Top fruit production manual for Apple; Rural Development Administration; Korea, pp. 59-72, 151-165.

Rural Development Administration (2012b) Top fruit production manual for Grape; Rural Development Administration; Korea, pp. 77-82, 131-152.

Rural development administration. Crop Technical Information http://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=html&prgId=arg_cropfarmskillEntry#ac_tech_btn. Accessed 30 September 2014.

Rural development administration, National academy of agricultural science (RDA NAAS) Korean soil information system. Soil series. http://soil.rda.go.kr/eng/. Accessed 30 September 2014.

Stone environmental Inc. (2008) PA5 user guide http://www.stone-env.com/agchem/agres.php. Accessed 30 September 2014.

Shim J. H. (2009) Investigation of pesticide residues and evaluation of contaminants distribution characteristics in Yeongsan and Seomjin rivers watershed. National institute of environmental research, Yeongsan environment research center Research project report. pp.8.

US National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddaro Space Flight Center. Aerosol Robotic Network, Aerosol optical depth. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/climo_menu_v2_new. Accessed 30 September 2014.

US EPA. Amendment to reregistration eligibility decision (RED) for propanil (March 2006) and the propanil RED (September 2003), Docket ID: EPA-HQ-OPP-2003-0348, Amendment to the propanil RED (March 7, 2006), EPA-HQ-OPP-2003-0348-0024, Propanil RED (September 30, 2003): EPA-HQ-2003-0348-0002. http://www.epa.gov/oppsrrd1/REDs/propanil_red_combined.pdf. Accessed 20 November 2014.

US EPA. FIPRONIL – Report of the FQPA Safety Factor Committee. Memorandum dated 12-May-1998 from Breda Tarplee and Jess Rowland to Melba Morrow. Office of Pesticide Programs, Health Effects Division, FQPA Safety Factor Committee. Docket ID: EPA-HQ-OPP-2005-0206, Document ID: EPA-HQ-OPP-2005-0206-0011. http://www.regulations.gov/#!documentDetail;D=EPA-HQ-OPP-2005-0206-0011. Accessed 20 November 2014.

US EPA. Pesticides Water Models. http://www.epa.gov/oppefed1/models/water/index.htm. Accessed 30 September 2014.

Watanabe H. and K. Takagi (2000) A simulation model for predicting pesticide concentrations in paddy water and surface soil. II. Model validation and application. Environ Technol. 21:1393-1404.

Williams W. M., Amy M. Ritter, Christienne E. Zdinak and J. Mark Cheplick (2011) RICEWQ: Pesticide runoff model for rice crops users manual and program documentation version 1.9.0. http://www.waterborne-env.com/environmental_model.asp Waterborne Environmental, Inc., SE Leesburg, VA, USA, pp.1-44.

농약의 노출 평가를 위한 수계예측모형의 적용

손경애* · 김찬섭 · 길근환 · 김택겸 · 권혜영 · 김진배 · 임건재 · 임양빈
농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부

요 약 농약은 작물을 보호하기 위하여 사용되지만 환경을 오염시키는 원인이 되기도 한다. 그러므로 농약의 물리화학적 특성, 독성 자료 및 환경행적 자료를 통해 위해성 평가를 수행하여 안전하게 관리가 가능하다면 등록이 결정된다. 환경중 행적을 예측하기 위해 우리나라의 기상자료, 작물 재배력 및 토양통을 이용하여 butachlor, iprobenfos, carbofuran, tebuconazole을 대상으로 수계 중 잔류농도를 추정하였다. 예측모형으로 과수용 농약은 PA5를, 벼재배용 농약은 RICEWQ와 SCI-GROW를 이용하였다. 수계모니터링에서 butachlor와 iprobenfos의 최대값은 예측모형의 peak 농도보다 낮았고 최소값은 예측모형의 연평균농도보다 낮아 RICEWQ를 벼 재배환경 중 잔류농약의 농도 추정에 이용할 수 있음을 확인하였다. 토양흡착계수가 낮은 carbofuran은 RICEWQ와 SCI-GROW에 적용시 지표수계보다 지하수로의 이동량이 훨씬 많은 것으로 산출되어 RICEWQ는 지하수로의 수계노출농도를 예측하기에는 적절하지 못하였다. 수계 모니터링에서 과수용 농약인 tebuconazole이 검출되지 않아 예측모형으로 산출한 값과 비교하기 어려웠으나 수계를 통한 잔류농약의 추정에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

색인어 논, 수계예측모델, RICEWQ, SCI-GROW, PA5