

# RICEWQ-RIVWQ 연계모형을 이용한 농약 PECs 모의

## Simulating the Pesticide PECs Using the Integrated RICEWQ-RIVWQ Model

박기중\* · 정 상 옥

Park, Ki Jung\* · Chung, Sang Ok

### Abstract

In order to assess the environmental risk of pesticides, information is usually required on the likelihood of exposure of organisms to the constituents of pesticides, expressed as a predicted environmental concentrations (PECs) and the likely effects of the constituents of pesticides on aquatic and terrestrial organisms, expressed as a predicted no-effect concentrations (PNECs). In this paper, the pesticide fate model, RICEWQ alone and coupled with the pesticide movement model, RIVWQ was used to simulate the potential for predicting the environmental concentrations of pesticides in paddy fields and adjacent surface water systems. The RICEWQ model was successfully calibrated against field data in ponding depth for paddy field. For the assessment of importance for water and pesticide management conditions and field scales, the integrated RICEWQ-RIVWQ model was simulated by the scenario analysis. The results of this study can be used as a basic information for assessing the environmental risk of pesticides

Keywords : RICEWQ, RIVWQ, PECs, PNECs, Scenario, Pesticide

### I. 서 론

주변 환경으로 유출된 농약들은 대기 중으로 휘발하거나 비표적 생물체에 의한 흡수·분해되는 것을 제외한 대부분이 강우에 의한 직접유출 및 기저유출, 그리고 농약이 흡착된 토사의 유실로 인하여 주변 수계환경으로 유출되어 수생태계에 위해를 끼치는 오염원으로서 작용 한다 (Fig. 1). 농약의 주변 수계환경으로 이동하는 가장 큰 발생원은 논으로 나타났으며, 이는 강우 시 직접유출로 인하여 이동하는 것으로 나타났다 (Kim, et al., 1997, Lee, et al., 1995, Lee, et al., 1983). Snyder and Williams (2004)에 의하면 미국 캘리포니아주 Sacramento 강 유역의 154 km<sup>2</sup>의 논 포장에서 1992년부터 2001년까지 10년 동안 농약 거동을 관측한 결과, 90.1 ~ 99.8%까지 직접유출로 인해 주변 수계환경으로 이동하며, 나머지 0.2 ~ 8.9%는 비산하거나 지하로 침투한 농약이 이동하여 수계환경에 도달하는 것으로 나타났다.

국내외 살포된 농약의 수계환경에 대한 위해성 평가체계는 Fig. 2와 같이 각종 수계환경생물에 대한 생태독성시험을 통하여 구한 무영향농도 (predicted no-effect concentration, PNEC)와 방대한 관측연구 자료를 이용하거나, 혹은 적합한 수치모형을 이용하여 구한 수계환경 중에서의 예측환경농도 (predicted environmental concentration,

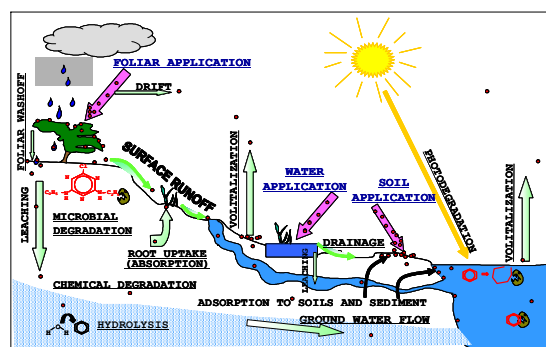


Fig. 1. Pesticide movement to the adjacent water system

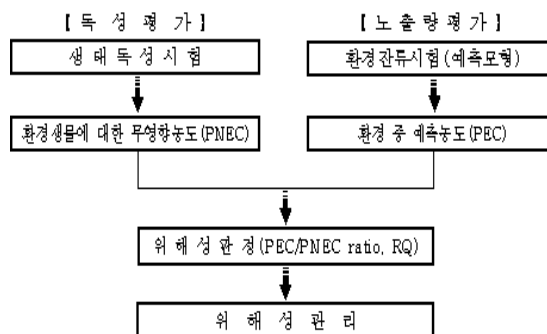


Fig. 2. Risk assessment step

PEC) 와의 비 (Risk Quotient, RQ) 에 의하여 위해성 판정을 한다 (ECOFRAM, 1999, Ryu, 2002).

일부 선진국에서는 1970 년대 초반부터 농약의 수계환경으로의 이동을 시뮬레이션하기 위한 다수의 모형들을 개발하여 농약 위해성 평가에 이용하고 있다. 미국 환경청 (U.S. EPA) 산하의 FIFRA EMWQ (the FIFRA exposure modeling work group) 에서는 농약의 수계환경에 대한 위해성 평가에 적용 가능한 모형을 Table 1 과 같이 제시하고 있다 (ECOFRAM, 1999). 여기서 screening model 은 개괄적인 농약 거동을 다루는 모형이며, primary model 은 대단위 유역을 대상으로 하는 정책 결정 등에 이용하는 모형이다. Secondary model 은 primary model 을 이용하여 표현하기에는 적합하지 않은, 즉 논 포장과 같은 특정 지점 및 특정 농약에 대한 환경농도를 예측하는데 이용 가능한 모형을 나타낸다. 이들 모형들은 농약의 개발 및 등록, 사용 단계에서 환경에 대한 위해성 평가에 중요한 역할을 하고 있다.

Table 1. Recommended models for the risk assessment

Model Type	Leaching	Runoff	Spray Drift	Surface Water Receiving	Surface Water Watershed	Groundwater Receiving
Screening	CHEMRANK CMLS PATRIOT SCIGROW	GENEEC	AgDRIFT	GENEEC		reconsidered
Primary		PRZM3	AGDRIFT	EXAMS	SWAT EXAMS	
Secondary	LEACHM LEACHP GLEAMS MACRO	EPICWQ RICEWQ GLEAMS	FSCBG AGDISP	WASP5 RIVWQ	SWRRBWQ HSPF	

본 고에서는 논 포장에서의 농약의 운명과 주변 수계환경으로의 이동을 시뮬레이션하기 위하여 국내 여건에 적용 가능한 모형을 소개하고, 시험 포장을 선정, 시나리오 모델링을 통하여 다양한 환경 여건에서의 포장에 살포된 농약의 거동을 예측하였다. 논 포장 내에서의 농약 운명을 모의할 수 있는 모형인 RICEWQ 와 포장에서 유출된 농약의 주변 수계시스템 내에서의 거동을 모의할 수 있는 모형인 RIVWQ 의 연계운명을 위하여 부프로그램을 개발하였다.

본 고에서는 논 포장에서의 농약의 운명과 주변 수계환경으로의 이동을 시뮬레이션하기 위하여 국내 여건에 적용 가능한 모형을 소개하고, 시험 포장을 선정, 시나리오 모델링을 통하여 다양한 환경 여건에서의 포장에 살포된 농약의 거동을 예측하였다. 논 포장 내에서의 농약 운명을 모의할 수 있는 모형인 RICEWQ 와 포장에서 유출된 농약의 주변 수계시스템 내에서의 거동을 모의할 수 있는 모형인 RIVWQ 의 연계운명을 위하여 부프로그램을 개발하였다.

## II. Integrated RICEWQ-RIVWQ model

### 1. 물질수지

RICEWQ 1.7.2 (Pesticide Runoff Model for Rice Crops) 모형은 논에서 농약 운명과 이동을 시뮬레이션 하기 위하여 개발되었다 (Williams, et al., 2004). 모형은 물질수지를 계산하기 위하여 공기 중으로 비산, 엽면 차단, 식물체 내에서의 신진대사, 그리고 담수에서의 분해, 회석, 휘발, 침전, 흡착 등의 과정을 포함한다. RIVWQ 2.02 (Chemical Transport Model for Riverine Environments) 모형은 수로 시스템 내에서의 농약의 이동을 시뮬레이션 하기 위하여 개발되었다 (Williams, et al., 2004). 모형은 농약 부하 지점 및 주요 관심 지점을 나타내는 node 와 이를 연결시켜주는 link 로 구성되어 있으며, 농약 농도는 수로 시스템 내 부하 지점으로부터 총 농약 잔류량을 수치적으로 추적하여 구한다.

### 2. 물수지

RICEWQ 와 RIVWQ 모형은 논 포장과 한 개 node 내에서의 물수지를 계산하기 위하여 저류량의 변화량을 이용하였다. 즉, 시간의 변화량에 대한 저류량의 변화량은 유입량의 합에서 유출량의 합을 뺀 것과 같다.

### 3. Integrated RICEWQ-RIVWQ model

논 포장 내에서의 농약 운명을 모의할 수 있는 모형인 RICEWQ 와 포장에서 유출된 농약의 주변 수계시스템 내에서의 거동을 모의할 수 있는 모형인 RIVWQ 의 연계운명을 위하여 부프로그램을 개발하였다. 통합 모형의 경계는 RICEWQ 모형의 유출 지점과 RIVWQ 모형의 외부 유입 node 이다. 즉, RIVWQ 모형의 수로 시스템 내의 외부 유입 및 농약 부하량 유입은 통합 모형의 경계 지점인 RICEWQ 모형의 유출 지점에서의 배수량과 농약 배출 부하량에 의해 결정된다.

RICEWQ 모형의 논 포장에서의 배수량과 농약 부하량에 대한 출력 자료를 RIVWQ 모형의 입력 자료로 변환하기 위하여 C++ 언어를 이용하여 부프로그램을 개발하였다.

### III. 재료 및 방법

#### 1. 시험구역

본 연구를 위해 선정된 대상 지구는 대구시 북구 동호동 소재 경북농업기술원 답작포 실험포장이다. 포장의 관개용수는 시험 지구로부터 약 3.0 km 떨어진 경북 칠곡군 동명면 동명저수지에서 도수하여 공급하며, 배수된 물은 배수된 물은 포장의 유말부분인 node 800에서 약 1.2 km 떨어진 팔거천을 거쳐 금호강으로 유입되어 낙동강으로 합류한다. 포장의 용·배수로는 모두 콘크리트 수로이다. 시험구역에 살포된 농약은 thiocarbamate 계 제초제인 molinate이다. Molinate는 1999년 농약안전성 심의위원회에서 발암성 및 어독성의 우려로 안전성 종합평가 대상 농약으로 선정되어 있으나, 최근까지 수도용 제초제 살포량의 30% 이상을 차지하고 있다 (KCPA, 2005b).

#### 2. 포장관측

RICEWQ 모형의 물수지 검정을 위해 2002년 벼 재배 기간동안 100 m × 100 m 크기의 포장에서 관측한 자료를 이용하였다. 포장의 물관리 방법은 국내 관행적인 심수 관리이며, 일별 관개량, 배수량, 증발산량, 침투량, 담수심 및 강우량 등을 관측하였다. 시험구역의 기상자료는 인근 대구기상대의 자료를 이용하였다. 2002년 시험포장에서 관측된 강우량은 932.6 mm, 관개량은 430.0 mm, 증발산량은 392.2 mm, 침투량은 167.0 mm, 배수량은 766.9 mm, 저류량의 변화량은 36.5 mm로 나타났다. 포장에서의 농약 운명을 시뮬레이션 하기 위한 RICEWQ 모형의 입력자료는 물수지 검정에 사용한 값을 적용하였으며, 주변 수계시스템 내에서의 농약 이동을 시뮬레이션 하기 위한 RIVWQ 모형의 하천 형상과 흐름 특성 등에 대한 입력자료들은 RICEWQ 모형의 물수지 검정을 위한 포장 관측 기간에 주변 수로시스템에 대하여 조사하였다.

#### 3. 입력자료

RICEWQ는 작물 생육 시기, 농약 살포 시기 및 양, 관개 시기 및 양, 담수심, 침전토사층의 깊이 및 물과 침전토사의 분배계수 등의 재배관리방법에 대한 매개변수, 물관리방법에 대한 매개변수, 농약 특성에 관한 매개변수 등을 포함하는 다수의 입력자료를 이용한다. RIVWQ는 수로 시스템내로 유입하는 수량 및 농약 유입량, 하천의 길이, 배수면적, 하천단면의 형태, 저질 침전토사층의 깊이, 침전토사의 공극 및 밀도, 부유사 농도, link - node의 위상관계 등의 유입량에 대한 매개변수, 하천 특성에 대한 매개변수, 수리·수문학적인 매개변수 등을 포함하는 다수의 입력자료를 이용한다. RICEWQ와 RIVWQ 모형의 물수지 입력자료에 대해서는 실제 포장 관측값을 이용하였으며, 물관리 및 재배관리 방법과 농약 살포량 및 시기 등에 대해서는 청문조사를 병행하였다. 획득하기 어려운 자료에 대해서는 관련 연구문헌을 참고하였다.

#### 4. 물수지 검정 및 시나리오 모델링

포장 내에서의 농약 운명 및 주변 수계환경 중으로 농약 이동은 물관리 방법 및 수계시스템 내

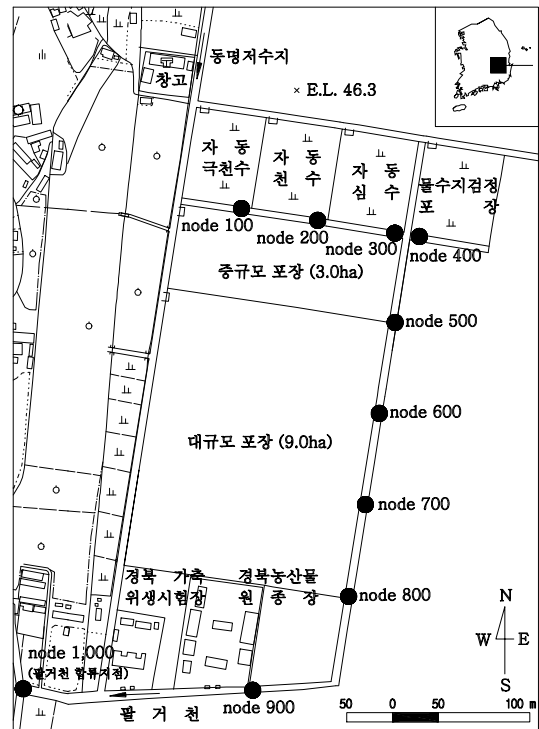


Fig. 3. Layout of the experimental paddy field

에서의 물의 흐름 특성에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 농약의 운명과 이동을 예측하기 위해서는 물의 거동을 동시에 고려하여야 할 것이다.

실제 포장 및 주변 수계시스템 내에서의 물의 흐름을 고려한 농약 농도관측 자료는 국내에서는 거의 없는 실정이다. 따라서 RICEWQ 모형의 물수지 검정은 2002년 실험포장에서 관측한 담수심과 모형 출력값을 비교하였으나, 다양한 재배·관리 방법들에 대한 농약 운명 및 이동에 미치는 영향은 시나리오 모델링을 통하여 분석하였다.

모형 물수지 검정에 사용한 통계학적 지표는 상대편향 (relative bias, RB), 제곱근평균제곱오차 (root mean square error, RMSE) 와 평균절대오차 (mean absolute error, MAE) 이다.

통합 RICEWQ-RIVWQ 모형의 시나리오 분석을 위하여 물관리 방법, 농약 관리 방법 및 포장 크기를 각각 달리하였을 때의 모형 출력값들을 서로 비교하였다. 물관리 방법에 따른 시나리오 분석을 위하여 각 포장의 물관리는 2

cm (극천수), 4 cm (천수), 10 cm (심수) 의 담수심을 유지하도록 자동 관개되는 것으로 가정하였다. 극천수 관리는 배수물꼬 높이를 2 cm 로 하여 논 바닥이 드러나면 자동관개 되는 것으로 하였으며, 천수 관리는 배수물꼬 높이를 4 cm 로 하여 담수심이 1 cm 정도 되면 배수물꼬 높이까지 자동관개 되는 것으로 하였다. 심수 관리는 배수물꼬 높이를 10 cm 로 하여 담수심이 6 cm 가 되면 배수물꼬 높이까지 자동관개 되는 것으로 하였다. 농약은 표준 살포량을 처리하였다. 농약관리 방법에 따른 시나리오 분석은 농약사용지침서 (KCPA, 2005a) 의 표준 시비량과 표준 시비량의 2 배를 살포하였을 경우에 대하여 수행하였다. 포장의 크기에 따른 시나리오 분석을 위하여 소규모 (1.0 ha), 중규모 (3.0 ha), 대규모 (9.0 ha) 포장으로 나누어 수행하였다. 기상자료는 2002년 인근 대구기상대의 관측자료를 이용하였으며, 증발산량은 Allen (Utah State University, 1991) 이 개발한 REF-ET v2.15 를 이용하여 구하였다. Table 2 는 본 고에서 이용한 시나리오 방법들을 나타낸다.

Table 2. Scenarios for simulating water and pesticide management conditions

Scenarios	Ponded water depth and field scale	Application rate	Node
water and pesticide management (automatic irrigation)			
①	very shallow	label rate	100
②	shallow	label rate	200
③	deep	label rate	300
④	very shallow	double label rate	100
⑤	shallow	double label rate	200
⑥	deep	double label rate	300
field scale (automatic deep irrigation and label rate)			
⑦	100 m × 100 m	1.0 ha	300
⑧	300 m × 100 m	3.0 ha	500
⑨	300 m × 300 m	9.0 ha	800
worst conditions (automatic deep irrigation and double label rate)			
⑩	total field scale	15.0 ha	800

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 물수지

RICEWQ 모형의 물수지 검정을 위하여 2002년 실험포장의 담수심 관측값과 모형 추정값을 비교한 결과 Fig. 4 와 같이 나타났다. 모형의 적합성 관정을 위한 통계학적 지표를 계산한 결과, RB 는 0.0042, RMSE 는 0.2207 mm, MAE 는 0.1542 mm 로 나타났다.

시험 포장의 물수지 검정 기간에 대한 농약수지의 검정은 이루어지지 않았으나, 실제 포장의 물관리 환경에서 농약의 운명 및 이동을 파악하기 위하여 농약 표준 사용량을 이용하여 RICEWQ-RIVWQ 모형을 연계하여 모의하였다.

시뮬레이션 결과, 담수심 내에서의 농약 최대 PECs 는 살포 당일  $2.0 \times 10^3 \mu\text{g/L}$  였으며, 살포 3일 경과 후 (3 days after the treatment,

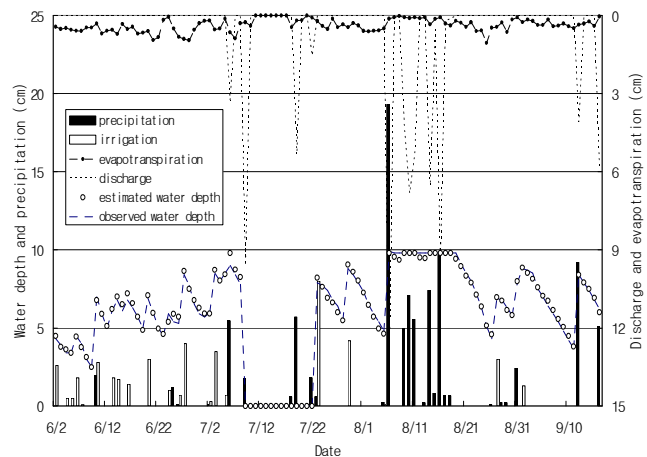


Fig. 4. Comparison of Estimated and observed ponding depth

3 DATs) 반감기에 도달하였다. 중간 낙수 전인 27 DATs에  $6.3 \mu\text{g/L}$  까지 감소하였으며, 중간 낙수 이후에는 논 담수 내에서 나타나지 않았다. 일본 (Hamilton, et al., 2003)의 배수기준인  $50 \mu\text{g/L}$ 에 도달하는 경과일수는 13 DATs가 소요되었다. 또한 호주 (Christen, et al., 2004)의 배수에 대한 Action Level인  $25 \mu\text{g/L}$ 에 도달하는 경과일수는 14 DATs가 소요되었다. 시험기간 포장에서 배수되어 주변 수계시스템으로 유입되는 농약 총량은  $12.37 \times 10^3 \text{ mg}$ 이었으며, 일 최대  $5.08 \times 10^3 \text{ mg}$ 이 배수에 포함되어 수계로 유입되었다. 포장에서 주변 수계시스템으로 유출된 농약 농도는 살포 지점의 배출구에서 추정된 값보다 전반적으로 높게 나타났으며, 이는 침전토사에 흡착된 농약이 배수 시 유출되어 흐름 내에서 분리됨으로써 증가한 것으로 판단된다. 살포 지점의 배수 내 농약 최대 PECs는 28 DATs에  $3.92 \mu\text{g/L}$ 였으며, 살포 지점에서 1.6 km 떨어진 팔거천에서의 최대 PECs는 29 DATs에  $6.47 \mu\text{g/L}$ 으로 나타났다.

## 2. 시나리오 분석

농약의 운명 및 이동은 살포 지점의 다양한 환경 인자들의 혼합된 상호작용에 의해 결정된다. 본 고에서는 환경 인자들 중에서 담수심 관리 형태 및 농약 처리 방법, 그리고 포장의 크기가 농약 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 2와 같이 시나리오 분석을 수행하였다.

담수심 관리 형태 (Scenarios ①, ②, and ③)에 따른 농약 거동을 시뮬레이션 하기 위하여  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  크기의 포장에 대하여 각각 극천수, 천수, 심수 관리로 구분하였으며, 관개는 담수심 유지를 위하여 자동관개 방식을 적용하였다. 농약은 표준 살포량이 처리되었다.

담수심 관리 형태별 포장의 담수 내에서 농약의 최대 PECs는 살포 당일 천수 관리에서  $2.92 \times 10^3 \mu\text{g/L}$ 까지 나타났다. 극천수 관리보다 천수 관리의 경우 최대 PECs가 높게 나타났으며, 이는 극천수의 경우 낮은 담수심으로 인하여 상당량이 공기 중으로 휘발되기 때문으로 판단된다. 극천수 관리의 최대 PECs는 살포 당일  $1.53 \times 10^3 \mu\text{g/L}$ 였으며, 1 DATs에 초기 농도의 98.7%까지 소실되었다. 천수 관리의 경우 1 DATs에 초기 농도의 68.2%까지 소실되었다. 심수 관리의 경우 최대 PECs는 살포 당일  $1.42 \times 10^3 \mu\text{g/L}$ 였으며, 4 DATs에 반감기에 도달하였다. 2 DATs부터 극천수 및 천수 관리보다 느리게 소실이 진행되는 것은 휘발 및 바닥 침전토사에 도달하여 흡착되는 양이 상대적으로 작기 때문으로 판단된다. 일본의 배수기준인  $50 \mu\text{g/L}$ 에 도달하는 경과일수는 극천수의 경우 살포 당일 도달하지만, 천수의 경우 7 DATs, 심수는 13 DATs가 소요되었다. 또한 호주의 배수에 대한 Action Level인  $25 \mu\text{g/L}$ 에 도달하는 경과일수는 극천수의 경우 살포 당일 도달하지만, 천수의 경우 9 DATs, 심수는 17 DATs가 소요되었다. 시험기간 포장에서 배수되어 주변 수계시스템으로 유입되는 극천수, 천수, 심수 관리 시 농약 총량은 각각  $6.82 \times 10^3$ ,  $9.12 \times 10^3$ ,  $18.34 \times 10^3 \text{ mg}$ 이었으며, 일 최대  $1.12 \times 10^3$ ,  $1.86 \times 10^3$ ,  $5.98 \times 10^3 \text{ mg}$ 이 배수에 포함되어 수계로 유입되었다. 살포 지점의 배수 내 농약 최대 PECs는 극천수의 경우 39 DATs에  $3.14 \mu\text{g/L}$ , 천수의 경우 6 DATs와 28 DATs에  $3.60 \mu\text{g/L}$ , 심수의 경우 5 DATs에  $81.40 \mu\text{g/L}$ 였다. 팔거천에서의 최대 PECs는 극천수의 경우 39 DATs에  $2.85 \mu\text{g/L}$ , 천수의 경우 29 DATs에  $3.70 \mu\text{g/L}$ , 심수의 경우 5 DATs에  $54.70 \mu\text{g/L}$ 으로 나타났다.

담수심 관리 형태별 농약 처리 방법 (Scenarios ④, ⑤, and ⑥)에 따른 농약 거동을 시뮬레이션 하기 위하여 극천수, 천수, 심수 관리포장에 대하여 표준 살포량의 2배를 적용하였다. 담수 내에서의 농약 농도는 표준 살포량을 적용한 경우보다 2배가 더 높았다. 일본의 배수기준인  $50 \mu\text{g/L}$ 에 도달하는 경과일수는 극천수의 경우 살포 당일 도달하지만, 천수의 경우 8 DATs, 심수는 17 DATs가 소요되었다. 또한 호주의 배수에 대한 Action Level인  $25 \mu\text{g/L}$ 에 도달하는 경과일수는 극천수와 천수는 17 DATs, 심수는 23 DATs가 소요되었다. 시험기간 포장에서 배수되어 주변 수계시스템으로 유입되는 극천수, 천수, 심수 관리 시 농약 총량은 각각  $13.63 \times 10^3$ ,  $18.22 \times 10^3$ ,  $36.73 \times 10^3 \text{ mg}$ 이었으며, 일 최대  $2.24 \times 10^3$ ,  $3.71 \times 10^3$ ,  $12.00 \times 10^3 \text{ mg}$ 이 배수에 포함되어 수계로

유입되었다. 살포 지점의 배수 내 농약 최대 PECs 는 극천수의 경우 39 DATs 에 6.28  $\mu\text{g/L}$ , 천수의 경우 6 DATs 와 28 DATs 에 7.18  $\mu\text{g/L}$ , 심수의 경우 5 DATs 에 163.00  $\mu\text{g/L}$  였다. 팔거천에서의 최대 PECs 는 극천수의 경우 39 DATs 에 5.69  $\mu\text{g/L}$ , 천수의 경우 29 DATs 에 7.39  $\mu\text{g/L}$ , 심수의 경우 5 DATs 에 110.00  $\mu\text{g/L}$  로 나타났다.

포장의 크기 (Scenarios ⑦, ⑧, and ⑨) 에 따른 농약 거동을 시뮬레이션 하기 위하여 소규모, 중규모, 대규모 포장으로 구분하고 각 포장의 크기는 1.0 ha, 3.0 ha, 9.0 ha 로 하였다. 물관리 방법 및 농약 처리 방법은 모두 심수 관리와 표준 살포량을 적용하였다. 포장 크기에 따른 담수 내의 농도 차이는 없는 것으로 나타났으며, 4 DATs 에 반감기에 도달하였다. 담수 내 최대 농약 농도는 포장의 크기에 상관없이 살포 당일  $1.42 \times 10^3 \mu\text{g/L}$  였으며, 일본의 배수기준인 50  $\mu\text{g/L}$  에 도달하는 경과일수는 13 DATs 가 소요되었다. 또한 호주의 배수에 대한 Action Level 인 25  $\mu\text{g/L}$  에 도달하는 경과일수는 17 DATs 가 소요되었다. 시험기간 포장에서 배수되어 주변 수계시스템으로 유입되는 소규모, 중규모, 대규모 포장 크기에 따른 농약 총량은 각각  $18.34 \times 10^3$ ,  $55.14 \times 10^3$ ,  $165.23 \times 10^3 \text{ mg}$  이었으며, 일 최대  $5.98 \times 10^3$ ,  $14.50 \times 10^3$ ,  $15.00 \times 10^3 \text{ mg}$  이 배수에 포함되어 수계로 유입되었다.

Table 3. Summary results for all scenarios

Scenario	Water management	Application rate	Field scale	Max. PECs in ponding depth	Max. PECs in discharge	Max. PECs at joint stream	Days above discharge limit	
							Japaness	Australia
		label rate : 3 kg / 10 a (a.i. 0.15 kg)	ha	$\mu\text{g/L} : \text{DATs}$	$\mu\text{g/L} : \text{DATs}$	$\mu\text{g/L} : \text{DATs}$	50 $\mu\text{g/L}$	25 $\mu\text{g/L}$
①	very shallow	label rate	1.0	$1.53 \times 10^3 : 0$	3.14 : 39	2.85 : 39	0 DATs	0 DATs
②	shallow	label rate	1.0	$2.92 \times 10^3 : 0$	3.60 : 6, 8	3.70 : 29	7 DATs	9 DATs
③	deep	label rate	1.0	$1.42 \times 10^3 : 0$	81.40 : 5	54.70 : 5	13 DATs	17 DATs
④	very shallow	double label	1.0	$3.06 \times 10^3 : 0$	6.28 : 39	5.69 : 39	0 DATs	17 DATs
⑤	shallow	double label	1.0	$5.84 \times 10^3 : 0$	7.18 : 6, 8	7.39 : 29	8 DATs	17 DATs
⑥	deep	double label	1.0	$2.84 \times 10^3 : 0$	163.00 : 5	110.00 : 5	17 DATs	23 DATs
⑦	deep	label rate	1.0-small	$1.42 \times 10^3 : 0$	81.40 : 5	54.70 : 5	13 DATs	17 DATs
⑧	deep	label rate	3.0-medium	$1.42 \times 10^3 : 0$	80.40 : 5	69.70 : 5	13 DATs	17 DATs
⑨	deep	label rate	9.0-large	$1.42 \times 10^3 : 0$	85.70 : 5	80.00 : 5	13 DATs	17 DATs
⑩	deep	double label	15.0-watershed	-	-	352.00 : 5	-	-

모 포장의 경우 80.40  $\mu\text{g/L}$ , 대규모 포장의 경우 85.70  $\mu\text{g/L}$  였으며, 팔거천에서의 최대 PECs 는 소규모 포장의 경우 54.70  $\mu\text{g/L}$ , 중규모 포장의 경우 69.70  $\mu\text{g/L}$ , 대규모 포장의 경우 80.00  $\mu\text{g/L}$  으로 나타났다.

이상에서 살펴보면, 심수의 경우 살포 지점 및 팔거천에서의 농약 최대 PECs 가 극천수 및 천수에 비하여 대단히 높게 나타나는 것은 극천수 및 천수에 비하여 상대적으로 담수 내에서 느리게 분해됨으로써 유출 발생 시 많은 양의 농약이 주변 수계시스템으로 유입되는 것으로 판단된다. 따라서 국내 관행적인 심수 관리의 경우 특히 배수 관리에 주의를 기울여야 할 것이다. 소규모 유역의 천수 관리(시나리오 ②, ④)의 경우 포장의 배수 내 농약 최대 PECs 보다 이 양이 하천에 도달되었을 때의 PECs 가 더 높게 나타나는데, 이는 포장에서의 배수에 함께 유출된 토사에서 농약이 분리됨으로써 증가된 것으로 판단된다.

시나리오에 이용된 15.0 ha 의 모든 포장 (Scenario ⑩) 에 대하여 고려할만한 수준의 악조건을 적용하였을 때 포장의 유말부분 및 하천에 도달하는 농약의 거동을 모의하기 위하여 심수 관리와 표준 살포량의 2 배를 적용하였을 때 농약의 최대 PECs 를 시뮬레이션 하였다. 포장의 유말부분 및 하천에 도달하는 농약의 농도를 시뮬레이션 한 결과 유말부분의 농약 최대 PECs 와 팔거천에서의 최대 PECs 는 모두 5 DATs 에서 나타났으며, 각각 394.00  $\mu\text{g/L}$ , 352.00  $\mu\text{g/L}$  로 나타났다.

## V. 결 론

본 고에서는 논 포장에서의 농약의 운명과 주변 수계환경으로의 이동을 시뮬레이션하기 위하여 국내 여건에 적용 가능한 모형을 소개하고, 시험 포장을 선정, 시나리오 모델링을 통하여 다양한

환경 여건에서의 포장에 살포된 농약의 거동을 예측하였다. 논 포장 내에서의 농약 운명을 모의할 수 있는 모형인 RICEWQ와 포장에서 유출된 농약의 주변 수계시스템 내에서의 거동을 모의할 수 있는 모형인 RIVWQ의 연계운명을 위하여 부프로그램을 개발하였다.

시나리오 분석 결과, 일본 및 호주의 배수기준에 도달되기 위한 논 포장에서의 배수 관리가 필요한 일수는 각각 최대 17 DATs와 23 DATs까지 소요되었다. 심수의 경우 살포 지점 및 팔거천에서의 농약 최대 PECs가 극천수 및 천수에 비하여 대단히 높게 나타나는 것은 극천수 및 천수에 비하여 상대적으로 담수 내에서 느리게 분해됨으로써 유출 발생 시 많은 양의 농약이 주변 수계시스템으로 유입되는 것으로 판단된다. 따라서 국내 관행적인 심수 관리의 경우 특히 물관리에 주의를 기울여야 할 것이다.

시나리오에 이용된 15.0 ha의 모든 포장에 대하여 고려할만한 수준의 약조건을 적용하였을 때 농약의 최대 PECs를 시뮬레이션 한 결과, 유말부분의 농약 최대 PECs와 팔거천에서의 최대 PECs는 모두 5 DATs에서 나타났으며, 각각 394.00 µg/L, 352.00 µg/L까지 나타났다.

#### 참고문헌

1. Christen, E., W. Quayle, S. O. Chung, and K. J. Park. 2004. Modelling the herbicide Molinate in rice paddies of South Eastern Australia using RICEWQ. IRRIGN FUTURE, RICE CRC AND CRC CH JOINT TECH REPROT. Draft.
2. ECOFRAM (the ecological committee on FIFRA risk assessment methods) Report
3. Jiménez, B., Ramos, J., Quezada, I. L., 1999, Analysis of water quality criteria in Mexico, Water Sci. Technol. 40(10), pp. 169-173.
4. Korea Crop Protection Association. 2005. Agrochemicals Use Guide Book. (in Korean)
5. Korea Crop Protection Association. 2005. Agrochemical Year Book. (in Korean)
6. Maidment, D.R. 1992. Handbook of hydrology, McGraw Hill Ltd., pp.26.2-26.3.
7. Ryu, G.H., 2002. 한국에서 의 농약안전성 관리현황과 전망, 2002년도 제27회 보건학 종합학술대회, The Korean Public Health Association (KPHA), pp.235-247.
8. Park, B. J. 2003. Studies on the fate of herbicide, molinate in paddy rice ecosystem. Ph.D. diss., Chonnam National University. (in Korean)
9. Park, K. H., C. S. Kim, B. W. Lee, and B. J. Park. 1998. Survey of Pesticide Residue in main river. NIAST 1998 Research. <http://www.niast.go.kr>. (in Korean)
10. Utah State University, 1991. REF-ET : Reference evapotranspiration calculation software, pp.40.
11. Williams, W. M., Zdinak, C. E., Ritter,, A. M. Chaplick, M. J. and Singh, P., 2004. RICEWQ : Pesticide runoff model for rice crops, Users manual and program documentation, Version 1.7.2, Waterborne Environmental Inc., USA : 1-41.
12. Williams, W. M., Zdinak, C. E., Ritter,, A. M. Chaplick, M. J. and Singh, P., 2004. RIVWQ : Chemical transport model for riverine environments, Users manual and program documentation, Version 2.02, Waterborne Environmental Inc., USA : 1-49.