

RICEWQ 모형을 이용한 논에서 농약 이동의 추정

Estimation of Pesticide Fate in a Paddy Field Using RICEWQ Model

정 상 옥* 박 기 중** Christen, Evan***
Chung, Sang Ok · Park, Ki Jung · Christen, Evan

Abstract

The objective of this study was to assess RICEWQ model in simulating the herbicide molinate in a paddy field. The model was successfully calibrated against field data in ponding depths and molinate concentrations for a paddy plot. The sensitivity of the parameter values was analysed. The pesticide application efficiency was the most sensitive followed by volatilization coefficient, bulk density of sediment, and mixing velocity. Simulations for various water and pesticide management scenarios were performed. Target irrigation depths much lower than the drainage outlet height gave lower molinate concentrations in the ponded water, and pesticide application efficiency had large sensitivity on the molinate concentration. Overall, RICEWQ model predicted water depth and molinate concentration well. Hence, it can be used as a tool for the simulation of the pesticide fate in a paddy field and further can be used in establishing environmental standards for the pesticide in the drainage channels.

1. 서론

논에 살포된 제초제는 일부 대기 중으로 비산하고 나머지는 작물에 부착되거나 논 수면에 낙하한다. 작물에 부착된 제초제는 분해되거나 강우에 의해 씻겨내려 논 담수에 포함된다. 논 담수에 포함된 제초제는 신진대사, 가수분해, 광분해 및 휘발되거나 부유물질에 흡착되고 일부는

지하수로 유입하거나 배수시에 하천으로 유출된다¹⁾.

한국농약공업협회²⁾에 따르면 2003년도 연간 제초제 출하량은 전체 농약출하량의 22%인 5,012M/T이며, 이 중 37%인 1,846M/T을 벼 재배용으로 이용하였다. 벼 재배용으로 등록된 제초제는 총 144개 품목이 있으며, 이 중 13개 품목에 molinate가 혼합되어 있다.

*경북대학교 농업생명과학대학
**경북대학교 대학원(yurang@hanmail.net)
***CSIRO Land and Water, Griffith, NSW, Australia

Keywords : RICEWQ 모형, 농약, molinate, 담수심, 환기준

미국 농무성 ARS⁵⁾의 molinate에 대한 물리·화학적 특성을 살펴보면, 비등점은 202°C/10mmHg, 분해점은 200°C, 물에 대한 용해도는 20°C에서 970ppm 정도이다. 휘산과 관련한 Henry's 상수는 25°C 물에서 0.128Pa·m³/mol이며, 증기압은 665mPa(25°C), 유기탄소 흡착계수는 토성에 따라 50~190g/ml까지 다양하고, 물속에서 반감기는 5~21일이며, 가수분해 및 광분해는 안정한 것으로 알려져 있다.

Molinate는 속간선택성, 살초력 및 약효의 지속성이 매우 높으며, 벼 체내에서는 가수분해에 의해 신속히 대사되어 약해를 유발하지 않아 벼 재배용으로 많이 사용한다. 그러나 molinate는 높은 용해성과 부유물질에 대한 부착력이 뛰어나 살포 후 일정 기간 논에 배수에 의해 비표적 생물이나 작물에 대한 위해가 우려된다.

Ross 등⁴⁾은 논에서 molinate 살포 당일 담수에서 75%, 공기중 비산 17%, 토양에서 8%, 식물체에서 0.01% 정도가 검출되었다고 보고하였다. 우리나라에서도 박병훈 등¹⁾에 따르면 1998년 4월에서 8월까지 6대강 유역의 38개 지점에서 128개 품종의 농약 잔류량을 조사한 결과, molinate가 조사기간 일평균 5.8 μ g/L, 6월에는 최고 40 μ g/L 정도까지 나타났으며, 검출빈도 또한 73.7%로 가장 높게 나타났다. 미국의 경우 논에서 배수된 물에 함유된 molinate로 인하여 잉어 수천마리가 폐사하는 사례가 발생함으로써 1990년 molinate가 살포된 논에서 28일간 배수를 금지하도록 법제화하였다⁸⁾. 호주의 New South Wales주 EPA에서는 논 배수의 molinate 농도에 대해 Notification Level로 0.0125mg/L, 그리고 Action Level로 0.025mg/L로 설정하고 있다⁷⁾.

국내의 관련 연구를 살펴보면, 박병준 등³⁾과

박병준²⁾은 실내에 설치한 라이시미터에서 molinate의 수중 잔류성과 분해 및 휘산 특성에 대하여 연구한 바 있으나, 경제적 및 시간적 제약과 농약의 이화학적 다양성에 따른 분석 방법의 한계 등으로 인하여 극히 제한된 환경여건 및 재배·관리 방법 등에 대한 연구만이 수행되고 있는 실정이다.

논에서 농약 이동을 다루는 모형으로는 PADDY¹⁰⁾, RICEMOD¹³⁾ 및 RICEWQ¹⁵⁾등이 있다. 특히 RICEWQ 모형은 유럽연합이 논 인근의 지표수에 대한 농약 노출위험도를 평가하는데 이용되었으며¹²⁾, 이탈리아 북부의 논에서도 농약반응을 잘 모의하는 것으로 검증되었다⁶⁾.

농업 비점원오염과 관련한 제초제에 대한 환경기준의 설정은 필수적이다. 그러나 제초제의 반응은 살포지역의 환경여건 및 재배·관리 방법 등에 따라 매우 다양하게 나타나므로 환경기준 설정을 위한 기초 자료의 확보를 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 환경에 살포된 제초제의 반응에 대한 연구와 관련된 제한점을 극복하고 단점을 보완하며 다양한 형태의 토양조건, 경작형태, 기후조건 및 관리 방법 등에 대한 제초제의 반응을 시뮬레이션 할 수 있는 적합한 모형의 개발 및 적용은 제초제의 환경기준 설정시 매우 유용할 것이다.

본 고에서는 논에서의 농약 추적 모형인 RICEWQ를 평가하기 위하여 국내에서는 농약 관측 자료의 획득이 어려워 호주의 New South Wales주의 Murrumbidgee Irrigation Area의 포장에서 관측한 논 담수 및 molinate 농도값을 사용하였다. 비점원 오염물질 중의 하나인 제초제의 환경기준 설정을 위해서는 광범위한 기초자료 및 지속적인 연구가 수행되어야 하며 적절한 모형을 이용하면 많은 시간과 노력을 절감할 수 있을 것이다.

II. RICEWQ 모형의 개요

RICEWQ(Pesticide Runoff Model for Rice Crops) 모형은 논에서 농약 이동을 모의하기 위하여 개발되었으며¹⁵⁾, 모형 내에서 농약의 반응 개요는 Fig. 1과 같다.

모형은 논 물수지와 농약 물질수지를 모의한다. 물수지 기본식은 식 (1)과 같다. 물수지 항목은 강우량, 관개량, 증발산량, 침투량, 배수량 등이며, 일별 강우량, 관개량, 증발산량, 침투량 관측값을 입력자료로 하여 담수심 추적기법에 의해 일별 담수심과 배수량을 계산한다. 농약 물질수지 기본식은 식 (2)와 같으며, 공기 중으로 비산, 엽면 차단, 식물체 내에서의 신진대사, 그리고 담수에서의 분해, 희석, 휘발, 침전, 흡착 등의 과정이 포함되며, 엽면, 담수 및 토양에서의 물질수지는 각각 식 (3), (4), (5)로 나타낼 수 있다.

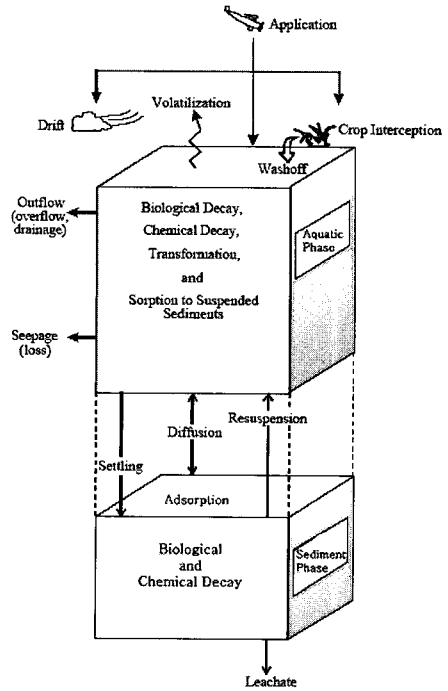


Fig. 1. Schematic of RICEWQ chemical processes

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum I - \sum O \quad (1)$$

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = \sum M_{influx} - \sum M_{outflux} - \sum M_{react} \quad (2)$$

$$\frac{\partial Mf}{\partial t} = Mf_{app} - Mf_{deg} - Mf_{tran} - Mf_{wash} - Mf_{harv} \quad (3)$$

$$\frac{\partial Mw}{\partial t} = Mw_{app} - Mw_{deg} + Mw_{tran} + M_{wash} - M_{voalt} - M_{out} - M_{seep} - M_{bed} - M_{setl} - M_{resus} \pm M_{diffus} \quad (4)$$

$$\frac{\partial Ms}{\partial t} = Ms_{deg} + Ms_{tran} + M_{bed} + M_{setl} - M_{resus} \pm M_{difus} \quad (5)$$

여기서 S 는 저류량, t 는 시각, $\sum I$ 는 강우량과 관개량, $\sum O$ 는 배수량, 침투량, 증발산량의 합이다. V 는 담수량, C 는 농약 농도, M 은 농약 질량을 나타내며, 첨자 $influx$ 는 유입량, $outflux$ 는 유출량, $react$ 는 반응을 나타내며, 첨자 f, w, s 는

각각 엽면, 담수 및 토사를 나타낸다. 첨자 app 는 살포량, deg 는 분해되는 양, $tran$ 은 물질대사에 의해 변환되는 양, $wash$ 는 엽면에 부착된 농약이 씻겨지는 양, $harv$ 는 수확되는 양, $volat$

는 휘발하는 양, out 는 배수에 의해 손실되는 양, $seep$ 는 침투에 의해 손실되는 양, bed 는 침전 토사에 부착되는 양, $setl$ 은 침전되는 양, $resus$ 는 침전 토사에서 재부유하는 양, $difus$ 는 물과 토양사이의 확산을 나타낸다.

III. 모형의 보정 및 적용

1. 포장관측

호주의 벼 재배기간은 10월 중순에서 이듬해 3월 중순까지이며, 모형의 보정은 호주 New South Wales(NSW)에 위치한 Murrumbidgee Irrigation Area의 포장에서 2001년 10월 5일부터 2001년 11월 25일까지 벼 재배 전반기에 대해 포장관측한 자료를 이용하였다. 실험기간의 선정은 molinate 살포 후 거의 없어질 때까지로 선정하였다. 시험포장은 7개의 구획으로 구성된 14ha의 논이다(Fig. 2). 포장의 용수공급은 제일 상단 구획의 유입구를 통해서 이루어지며, 상단의 구획이 채워지면 다음 구획으로 관개되어 제일 하단 구획의 담수심이 목표수위에 도달할 때까지 계속된다.

시험포장의 토성은 점토질 롬이며 침투량은 1~2mm/d로 조사되었다. 기상자료는 인근의 CSIRO Land and Water Griffith 연구소의 자료를 이용하였다. Humphreys 등¹⁰⁾에 따르면,

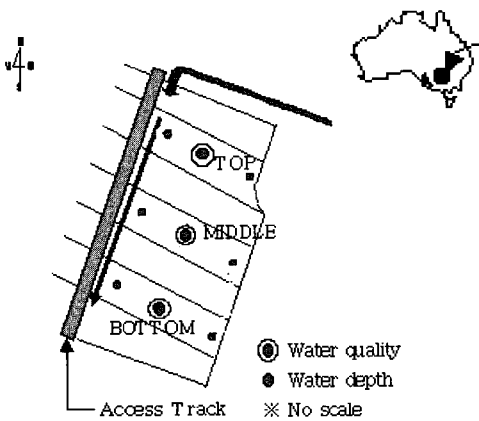


Fig. 2. Layout of the experimental paddy field

호주 남동부 지역의 증발산량은 증발계 관측값과 잘 일치하는 것으로 조사되었으며, 본 연구에서는 시험포장의 증발산량은 pan 증발계의 관측값을 그대로 이용하였다.

Molinate는 논에서 초기 제초제로 사용되며 2001년 10월 17일 1.92kg/ha(순성분)를 살포한 날로부터 2001년 11월 19일까지 농도를 조사하였다. 담수심 관측은 각 구획별로 2개 지점의 값을 평균하였으며, 농도 관측은 관측지점별로 3반복으로 시료를 채취하여 평균하였다.

시험포장이 위치하는 Murrumbidgee Irrigation Area는 건조한 지역으로 연평균 강우량이 400mm 정도이며, 논에서의 배수는 거의 발생하지 않는다. 분석기간은 2001년 10월 5일부터 2001년 11월 25일까지로 하였으며, 이 기간 동안에 관측한 총 강우량은 57.3mm, 관개량은 424.0mm, 증발산량은 354.0mm, 침투량은 76.6mm, 저류량의 변화량은 54.3mm 였으며, 배수는 발생하지 않았다.

Table 1은 시험포장의 주요 관리일정을 나타내며, Table 2와 Table 3은 각각 시험기간 물수지 및 담수 내 molinate 농도 관측자료이다.

2. 모형의 보정

모형의 입력자료는 기상자료 파일과 매개변수 파일로 구성된다. 기상자료 파일에는 일별 강우량, 증발산량 및 평균 기온 등을 포함하며, 매개변수 파일은 물수지와 농약수지를 계산하기 위한 변수 값을 포함한다.

물수지 매개변수 값은 매개변수의 보정 없이 관측값을 사용하였다. 농약수지 매개변수값은 관측값과 관련 문헌의 값을 적용하였으며, 농약 적용효율, 침전 토사의 혼합 깊이 및 혼합 속도에 대해서는 시행착오법을 통해 보정하였다.

Table 1. Sequence of events for simulation period(2001)

Date	Event
10. 6	Field filling started
10. 12	Field "locked up" i.e. no water inflow or surface drainage
10. 15	Field sown
10. 17	Field aerially sprayed with liquid concentrate Molinate at 1.92kg/ha (active ingredient)
10. 19	Crop Emergence
11. 19	Last sampling(molinate)
Irrigation	6, 7, 8, 24 October and 2, 18 November
Remark	- No drainage - Crop harvesting : 2002. 3. 15

Table 2. Observed water balance in the experimental paddy field(2001)

(unit : mm)

Month	Days	Inflow			Outflow				Relative error(%)
		Rainfall	Irrigation	Total	ET	Seepage	Ponded water	Total	
10	5~10	1.2	189.0		36.1	7.6			
	11~20	16.0	0.0		96.8	15.0			
	21~31	20.2	60.0		71.2	16.5			
11	1~10	18.3	90.0		68.7	15.0			
	11~20	1.4	85.0		81.9	15.0			
	21~30	0.2	0.0		49.3	7.5	54.3		
Total		57.3	424.0	481.3	354.0	76.6	54.3	484.9	0.7
Remark		No drainage							

Table 3. Observed molinate concentrations in the experimental paddy field(2001)

(unit : mg/L)

Date	10.18	10.20	10.22	10.24	10.28	10.31	11. 2	11. 5	11. 7	11.14	11.19
Molinate	1.015	0.756	0.438	0.228	0.148	0.072	0.010	0.006	0.005	0.002	0.001

Table 4. Input parameters used for calibration of water depth

Parameter Name	Value	Source/comment
Date simulation begins and ends	10.5~11.25	Field data
Emergence date	19/10/2001	Field data
Maturity date and Harvest date and Deposition of pesticide residues at harvest	Not relevant	Model run finished prior
Date to start and stop irrigations	Field data	
Type of irrigation	Fixed volume	
Height of drainage outlet	20 cm	General standard
Maximum drainage rate	5 cm/day	Varies
Surface area of paddy	2 ha	Average bay size
Seepage	0.15 cm/day	Field data
Evapotranspiration - read daily data file or input monthly values	daily	CSIRO Griffith data

보정된 매개변수 값은 적용효율이 0.95, 침전 토사의 혼합 깊이가 0.1cm, 혼합 속도는 0.001m/day로 나타났다. Table 4는 물수지 매개변수 값이며, Table 5는 농약수지 매개변수 값이다.

관측된 담수심과 보정된 모형이 추정한 담수심은

Fig. 3과 같으며, 관측값과 모형 추정값의 최대 오차는 1.8cm, 평균오차는 0.9cm, 결정계수는 0.915, RMSE는 1.3cm로 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 모형 보정에서의 물수지는 Table 6과 같으며 강우량이 5.7cm, 관개량이 42.4cm이고 증발산량이 35.4cm로 나타났으며,

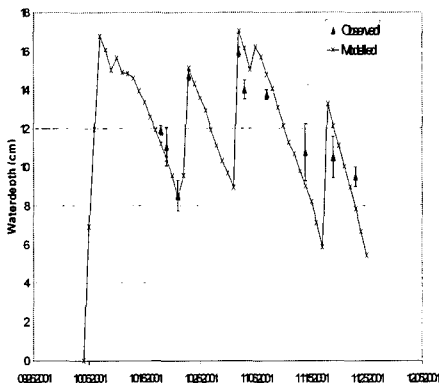


Fig. 3. Calibrated and observed water ponding depth in top plot

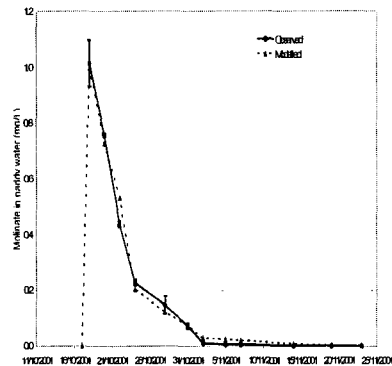


Fig. 4. Calibrated and observed molinate concentration in top plot

Table 5. Input parameters used for calibration of pesticide dissipation

Parameter name	Value	Source/Comment
Depth of active sediment layer	5 cm	A horizon, Hornbuckle and Christen ⁹⁾
Field capacity of sediment	0.35 v/v	Rice soil typical, Hornbuckle and Christen ⁹⁾
Wilting point of sediment	0.24 v/v	
Initial soil moisture of sediment	0.35 v/v	Assumed
Bulk density of sediment	1.5 g/cc	Rice soil typical, Hornbuckle and Christen ⁹⁾
Porosity of sediment	0.43 v/v	
Suspended sediment concentration	15 mg/L	Field data
Application date	17/10/2001	Field data
Application rate	1.92 kg/ha	Field data
Incorporation depth	0 cm	Field data
Application efficiency	0.95	Calibrated
Aqueous metabolism decay rate	0.019/day	From Inao and Kitamura ¹¹⁾
Aqueous hydrolysis decay rate	-	Included in metabolism decay
Aqueous photolysis decay rate	-	Included in metabolism decay
Saturated sediment decay rate	0.017/day	From Inao and Kitamura ¹¹⁾
Unsaturated sediment decay rate	0.034/day	Assumed
Foliar decay rate coefficient	0.034/day	Assumed - little foliage
Wash off coefficient	0.2/cm rain	Assumed model default
Water-sediment partition coefficient	1.57 cc/g	From Karpouzias and Capri ¹²⁾
Volatilization coefficient	0.02 m/day	
Settling velocity	2.0 m/day	Velocity for clay particles
Mixing depth for direct partition to sediment bed	0.1 cm	Calibration, mixing depth calibrated which is linked to mixing velocity
Mixing velocity	0.001 m/day	Calibration
Solubility	800 mg/L	From Karpouzias and Capri ¹²⁾

Table 6. Water balance for model calibration(05/10/2001 to 25/11/2001)

Inflow (cm)			Outflow (cm)			Relative error(%)	
Rainfall	Irrigation	Total	ET	Seepage	Ponded water		Total
5.7	42.4	48.1	35.4	7.7	5.4	48.5	0.8

상대오차는 0.8% 이었다.

Molinate 농도의 관측값과 모형 추정값의 비교는 Fig. 4와 같으며, 최대 오차는 0.093mg/L, 평균 오차는 0.032mg/L, RMSE는 0.048mg/L로 서로 잘 일치하였다. Molinate 농도는 살포 후 약 28일이 경과한 후 호주의 Notification Level인 0.0125mg/L 이하로 내려가는 것으로 나타났다.

3. 민감도 분석

여러 가지 매개변수의 민감도를 분석하기 위하여 보정된 매개변수 값을 50% (살포 유효율은 5%) 증감 시켜서 논 담수 속의 molinate 농도를 비교하여 민감도를 계산, 분석하였다. 보정 값이 0인 가수분해율이나 광분해율 등은 임의의 적정한 값을 당초 값으로 하고 분석하였다. 농약 살포후의 시간에 따른 매개변수 값의 민감도를 조사하기 위하여 살포 당일과 살포 후 4, 15, 32일째의 농도를 분석하였다. 민감도 S는 다음 식으로 계산된다.

$$S = (dR/R) / (dP/P)$$

여기서 R은 결과 농도이고 P는 매개변수이며, d는 미분을 나타낸다. 민감도(절대값)는 대체적으로 선형을 나타내었으므로 +50%에 대한 값만 Table 7에 나타내었다. 살포 유효율과 휘발상수 등이 높은 민감도를 나타내었다. 휘발상수는 50% 증가와 감소 때 큰 차이를 나타내었으며 감소 때 훨씬 더 민감한 것으로 나타났다.

4. 시나리오 모델링

가. 물관리

물관리가 농약 이동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 배수물꼬 높이가 20cm일 때 관개목표 담수심을 물꼬 높이 보다 1, 2, 3, 4, 5cm 낮게 하였을 때 담수의 농약 농도 변화를 분석하였다. 시험 포장 인근의 1963년부터 2004년까지 41년간의 기상자료와 설정한 담수심에서 관개가 시작되는 자동관개 기법을 적용하여 모형을 실행하였다. 관개목표 담수심이 물꼬높이 보다 4cm 이하로 하였을 때에는 농약농도가 NSW 환경기준인 0.0125 mg/L보다 높게 나타났다(Fig. 5)

나. 농약관리

농약관리가 농약 이동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 농약 살포량과 농약살포 방법을 달리하여 모형을 실행하였다. 농약 살포량은 2.4 또는 3.6kg/ha이며, 농약살포 방법은 담수상태 (Scenarios C, D, E) 또는 비담수상태 (Scenarios A, B)의 논에 지상살포(Scenario A) 및 항공살포(Scenarios B, D) 등이 있으며, 본 연구에서 채택한 시나리오는 Table 8과 같다. 살포방법 중 SCWIIRT(Soluble Chemical Water Injection In Rice Technique, Scenarios C, E)는 호주에서 개발한 저압살포 방법이다. 비담수 상태에서는 농약살포 다음날 담수한다. 비산손실을 고려한 살포방법별 살포효율은 전문가

Table 7. Sensitivity of pesticide concentration in ponded water to input parameters

Parameter	Days after application				Mean
	0	4	15	32	
Application Efficiency (APPEFF)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Release rate for slow release formulation (RREAC)	0.78	0.17	0.43	0.41	0.45
Volatilisation coefficient (VVOL)	0.14	0.72	1.45	1.29	0.90
Volatilisation coefficient (VVOL) (-50%)	0.16	1.11	5.69	11.22	4.55
Fraction of pesticide intercepted by water and immediately transformed to innocuous product (SNK)	0.11	0.11	0.11	0.09	0.11
Metabolism degradation rate in water (KWM)	0.00	0.09	0.27	0.27	0.16
Soil bulk density (BD)	0.01	0.04	0.17	0.74	0.24
Degradation rate in saturated soil (KSW)	0.00	0.00	0.00	0.15	0.04
Degradation rate on foliage (KF)	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02
Water/sediment partition coefficient (KD)	0.00	0.04	0.12	0.40	0.14
Settling velocity (VSETL)	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01
Mixing depth for direct partitioning to sediment (VBIND)	0.00	0.04	0.10	0.02	0.04
Mixing velocity (VMIX)	0.01	0.05	0.10	0.44	0.15
Hydrolysis degradation rate in water (KWH)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02
Photolysis degradation rate in water (KWP)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02
Wash off rate per cm rain (WO)	0.00	0.00	0.03	0.05	0.02
Degradation rate in unsaturated soil (KSD)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesticide solubility (SOLUB)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

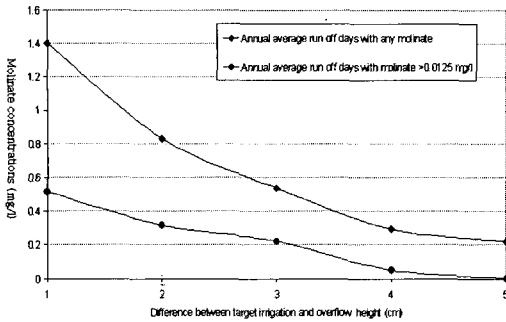


Fig. 5. Molinate contaminated run off water, over 41 seasons

의 판단으로 적정하게 가정하였다.

여러 가지 시나리오를 2001년 10월 5일부터 2002년 3월 31일까지 모형을 실행하였다. 비담수 상태의 논에 공중살포와 지상살포시의 molinate 농도는 Fig. 6과 같다. 지상살포시에 유효살포율을 높게 가정한 결과로 지상살포시의 농도가 훨씬 높게 나타났다. 살포 18일째 농도가 올라간 것은 강우로 인해 옆면의 농약이 씻겨진 때문으로 판단된다.

담수상태 논에 공중살포와 SCWIIRT 살포시의 농도 비교는 Fig. 7과 같다. 살포효율이 높은

SCWIIRT 살포시의 농도가 훨씬 높은 것을 알 수 있다. Fig. 8은 담수시 및 비담수시에 공중살포한 경우이다. 살포 초기에는 담수 논 농도가 높았으나 살포 3주 후에는 토양으로부터 확산되는 농약으로 인하여 비담수 논 농도에 농도가 더 높았다.

시나리오 C와 E는 농약살포량이 차이가 나는 경우이며, 농도차이는 Fig. 9와 같다. 이 그림은 높은 살포량의 경우에 초기에 높은 농도를 보이지만 살포 6일 이후에는 비슷한 농도를 보여주었으며, 배출허용농도 초과일수는 29일로 낮은 살포량의 경우의 26일보다 3일 더 길었다.

전반적으로 담수 논에 살포한 경우에 초기 농도는 비담수 논에 살포한 경우에 비해 매우 높았으나 배출허용농도 초과일수는 두 처리가 비슷하였다. 이상의 농약관리 시나리오 실행 결과의 요약은 Table 9와 같다.

IV. 결론

본 연구에서는 논에서의 농약 추적 모형인 RICEWQ의 적용성을 평가하고 매개변수의 민감도 분석과 여러 가지 물관리 및 농약관리 시나리오에

Table 8. Scenarios for testing pesticide management options

Scenario	Application method	Application rate (kg/ha)	Application efficiency (%)	Water management
A	Ground rig.	3.6	70	Dry bay at application, flooded next day, irrigate to maintain depth
B	Aerial dry bay	3.6	60	Dry bay at application, flooded next day, irrigate to maintain depth
C	SCWIIRT	3.6	100	Ponded water at application, irrigate to maintain depth
D	Aerial ponded	3.6	95	Ponded water at application, irrigate to maintain depth
E	SCWIIRT	2.4	100	Ponded water at application, irrigate to maintain depth

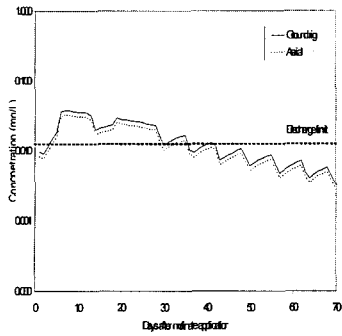


Fig. 6. Comparison of ground rig and aerial application to dry bays (Scenarios A and B)

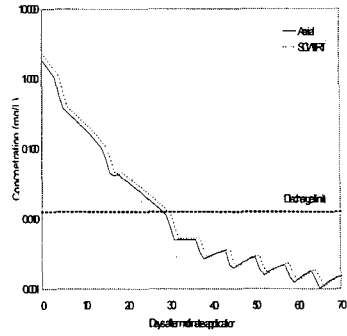


Fig. 7. Comparison of aerial and SCWIIRT application to ponded bays (Scenarios C and D)

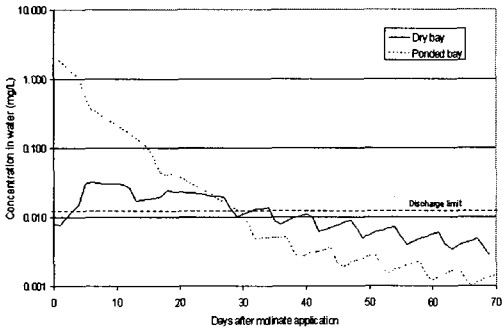


Fig. 8. Comparison of aerial application onto dry and ponded bays (Scenarios B and D)

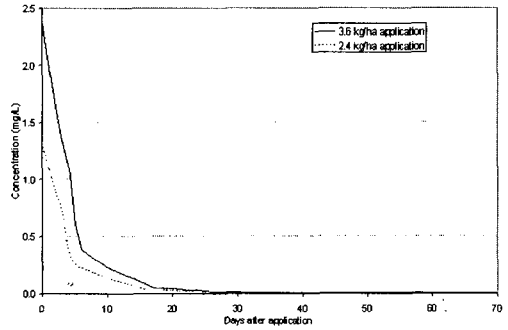


Fig. 9. for modelled molinate mass with SCWIIRT at 3.6 and 2.4 kg/ha application rate (Scenario C and E)

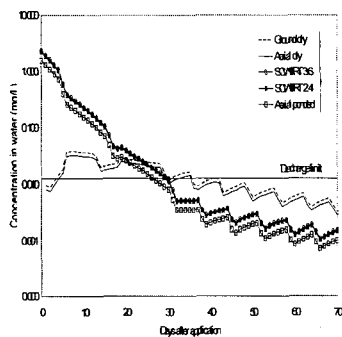


Fig. 10. Comparison of modelled molinate concentrations in water (All scenarios)

대하여 모의발생하여 그 결과를 분석하였다. 국내 농약 관측자료의 획득이 어려워 호주 New South

Wales주의 Murrumbidgee Irrigation Area에 위치한 시험포장의 관측 값을 이용하여 모형을 보정하였다. 모형의 보정에는 2001년 10월 5일부터 2001년 11월 25일까지의 논 담수심과 molinate 관측자료를 이용하였다. 모형보정 결과 담수심과 제초제 molinate 농도에 대한 모형 추정값과 관측값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

매개변수의 민감도 분석결과를 보면 유효 살포율이 가장 민감하였으며, 휘발상수, 논바닥 토양의 가비중, 혼합속도 등이 비교적 민감한 것으로 나타났다.

여러 가지 물관리와 농약관리 시나리오에 대한 논 담수의 molinate 농도를 분석한 결과, 배수물꼬보다 4cm 이상 낮은 목표 담수심이 농도를 낮출 수

Table 9. Summary results for all pesticide management scenarios

Scenario	Applicn method	Applicn. condition	Applicn. efficiency (%)	Applicn. rate (kg/ha)	Effective applicn. rate (kg/ha)	Maximu M. conc. (mg/L)	Median M. conc. (mg/L)	Days conc. above discharge limit
A	Ground rig	Dry	70	3.6	2.52	0.038	0.010	28
B	Aerial	Dry	60	3.6	2.16	0.032	0.009	24
C	SCWIIRT	Ponded	100	3.6	3.60	2.370	0.003	29
D	Aerial	Ponded	95	3.6	3.42	2.250	0.003	28
E	SCWIIRT	Ponded	100	2.4	2.40	1.580	0.002	26

있었으며, 농약 유효살포율이 농약농도에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

전반적으로 RICEWQ 모형이 논에서의 담수심 및 농약의 농도 변화를 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 논 배수의 농약추정에 적용할 수 있을 것이며, 나아가 농약의 환경기준 설정을 위한 기초자료 확보에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 박경훈, 김찬섭, 이병무, 박병준, 1998, 주요 하천 수중 농약 잔류량 조사, 농업과학기술원 1998 시험연구사업보고서, <http://www.niast.go.kr>.
2. 박병준, 2003, 벼 재배환경 중 제초제 molinate의 행적에 관한 연구, 전남대학교 박사학위논문.
3. 박병준, 박현주, 이병무, 최주현, 2002, 수도용 제초제의 수중 잔류성과 분해 및 휘산특성 연구, 농업과학기술원 2002 시험연구사업보고서, <http://www.niast.go.kr>.
4. 한국농약공업협회, 2004, 농약연보.
5. Agricultural Research Service, The ARS Pesticide Properties Database, USDA ARS, <http://www.arsusdagov>.
6. Capri, E., and Miao, Z., 2002, Modelling pesticide fate in paddy rice. *Agronomie* 22: pp.363-371.
7. Christen, E., Quayle, W., and Chung, S. O., 2004, Modelling the herbicide Molinate in rice paddies of South Eastern Australia using RICEWQ. IRRIGN FUTURE, RICE CRC AND CRC CH Joint Technical Report. CSIRO Land and Water, Griffith, NSW, Australia.
8. Environment Protection Agency, 2001, EFED RED Chapter for Molinate, EPA, USA, <http://www.epa.gov>.
9. Hornbuckle, J., and Christen, E., 1999, Soils of the MIA and CIA: a compilation of 30 years of study. *Farmers Newsletter*, August(152): pp.30-32.
10. Humphreys, E., Meyer, W. S., Prathapar, S. A., and Smith, D. J., 1994, Estimation of evapotranspiration from rice in southern New South Wales: a review. *Australian J. of Exp. Ag.* 34: pp.1069-1078.
11. Inao, K., and Kitamura, Y., 1999, Pesticide paddy field model (PADDY) for predicting pesticide concentrations in water and soil in paddy fields. *Pesticide Science* 55: pp.38-46.
12. Karpouzias, D. G., and Capri, E., 2004, Higher tier risk assessment for pesticides applied in rice paddies: filling the gap at European level. *Outlooks on Pest Management*: pp.36-41.
13. Linders, J., and Alfaro, F., 2001, Mathematical modelling of pesticides applied in rice. Report to the Mediterranean rice working group, Brussels: p.22.
14. Ross, L. J., Sava, R. J., and Oshima, R. J., 1984, Environmental fate of selected rice herbicides (thiobencarb and molinate) under field conditions. *Surface Water Environmental Monitoring Reports* EH 84-01. Division of Pest Management, Environmental Protection & Worker Safety, Dept. of Food and Agriculture, California: p.114.
15. Williams, W. M., Ritter, A. M., Zdinak, C. E., and Chaplick, M. J., 2004, RICEWQ: Pesticide runoff model for rice crops. Users manual and program documentation. Version 1.7.2. Waterborne Environmental Inc., USA.