



농업비점 오염을 고려한 모델링 기법 비교

조영권 ykcho@ekr.or.kr 농어촌연구원 미래정책연구실 수석연구원

1. 머리말

국내 농촌 환경에서 발생하는 농업비점오염 모의를 위해서는 논, 밭과 같은 농경지 내 수문·수질 프로세스 모의, 저수지·보·배수문 등과 같은 농업용 수리시설에 의한 수문·수질 변화 모의, 관개 용수와 같은 용수 공급 프로세스 모의, 퇴비 또는 비료와 같은 영양물질의 투입과정 모의가 가능해야 한다. 특히, 우리나라 농경지의 대부분을 차지하는 담수 논의 수문해석을 정량적으로 평가할 수 있어야 하며, 유역 내 지역별 농경지에 대한 관개지구 모식을 모델에 반영할 수 있어야 한다. 담수 논에 대한 해석을 기반으로 유역 단위의 수문해석으로 확대 적용할 수 있으며, 농업용수가 유역 내 수문현상에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 농경지 물소비량과 하천으로 회귀 유입하는 유량의 관계성 규명이 필요하다.

2. 농업비점오염 고려를 위한 기존연구의 한계

현재 국내·외에서 사용되고 있는 비점오염원을 모의할 수 있는 모델은 밭을 대상으로 한 예측 모델이기 때문에, 논농사 중심의 우리나라 현실에 있어서 그 모델을 그대로 적용하기에는 한계가 있다. 국내 유역환경에 적합한 유역모델, 즉 논에서 발생하는 농업비점오염물질의 유입과 유출 과정과 함께 영양물질의 거동을 예측하여 평가할 수 있는 모델이 필요하다. 이러한 연구의 필요성은 과거 많은 연구자를 통해 꾸준히 제기되어 왔으며, 기존 모델의 한계를 극복하기 위해 모델을 개선하여 적용한 연구사례가 있었다. 김남원 등(2005)은 미국 EPA에서 개발된 농업비점오염 모델 SWAT의 담수 논 모의 시 한계점을 개선하여 SWAT-AGRIMAN(AGRICulture MANagement)를 개발하여 적용하였다. SWAT-AGRIMAN은 SWAT 모델의 기

본적인 구조는 유지하되 논 지역의 담수, 관개량 및 관개일정 제어 등을 반영하여 담수 논 의 수문성분이 유역의 수문성분에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있도록 개선하였다. 진영민 등(2002)은 미 농무성에서 포장규모(Field Scale)에서 장기간의 유출 및 유사량을 추정하기 위해 개발된 CREAMS 모델의 수문해석을 논 의 조건에 맞도록 수정하고, 담수상태에서 물질운송기작을 모의할 수 있도록 개선하였다. 그러나 현재 국내에서 개발된 이러한 모델은 현재 지속적으로 실제 유역에 적용되어 농업 비점오염을 평가하는 도구로써 이용되지 못하고 있는 실정이다. 이는 외국에서 개발된 모델을 수정하여 사용한 한계점으로써 외국의 개발자에 의해 기존 모델이 수정될 경우 수동적으로 모델을 수정해야 하는 문제, 모델 구조 자체가 우리나라의 유역환경을 반영하지 못하는 문제 때문인 것으로 판단된다. 따라서 국내 유역환경에 적합하고, 담수 논 의 수문과정과 영양물질 유출과정에 대한 모의기능을 포함하는 유역모델을 개발하여 국내 농업비점오염을 유출 특성을 해석하고, 이에 대한 대응책을 마련하는 도구로 활용할 필요가 있다.

3. 농업비점오염 고려를 위한 모델링 기법 비교

분포형 모델(CAMAL)과 준분포형 모델(SWAT)이란?

유역모델링은 유역분할 구조에 따라 총괄형(Lumped), 준분포형(Semi-distributed), 분포형(Distributed)으로 구분된다(그림 1). 총괄형 모델(Lumped Model)은 유역 전체를 하나의 균질한 단위



그림 1. 유역 분할 구조에 따른 모델의 구분 모식도

로 규정하기 때문에 유역의 비균질성을 고려할 수 없으며, 유역 내 물질 이동을 모의할 수 없는 한계가 있다. 하지만 총괄형 모델은 유역의 비균질성이 크지 않거나 개략적인 모의 결과가 요구되는 경우 적합하다. 총괄형 모델은 현재 홍수 예측 등 극한 수문 예측분야 이외에는 거의 사용되지 않고 있다.

현재 국내에서 널리 사용되는 유역모델은 대부분 외국에서 개발된 준포형 모델로 HSPF, AnnAGNPS, 및 SWAT 등이 있다. 이 중 준포형 모델인 SWAT 모델의 경우 중대규모 유역의 물과 오염물질 수치 분석에 적합하며, 유역을 소유역 또는 유사수문단위(HRUS)로 구분하고, 미국의 EPA에서 개발한 농 어비점모델로서 국내외에서 다수 적용된 사례가 있다(그림 2). 준분포형 모델의 경우 모델의 구조가 비교적 간단하면서 유역의 비균질성을 어느 정도 고려할 수 있기 때문에 대규모 유역에 적용하기 적합하다. 그러나 각각의 소유역을 하나의 균질한 단위로 규정하기 때문에 소유역 규모에서도 비균질성이 큰 경우에는 적합하지 않으며, 소유역 내에서의 물질이동은 모의 할 수 없는 단점이 있다. 최근 소유역의 비 균질성을 고려하기 위하여 소유역 내에서 동일한 지형-토양-식생 특성을 갖는 징경을 별도의 균질적 단위로 정의하고 이들의 수문, 수질 특성을 독립적으로 모의할 수 있는 구조를 갖춘 유역모델들이 널리 이용되고 있다.

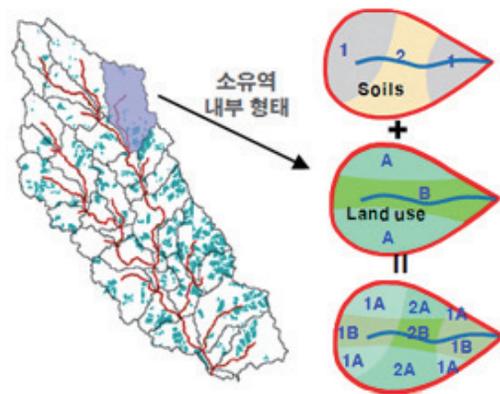


그림 2. 준분포형 유역모델 SWAT

표 1. 국내·외 주요 유역모델 비교

Criteria	AnnAGNPS	SWAT	HSPF	ANSWERS 2000	CAMEL
Watershed representation	Homogeneous land areas (amorphous cells)	Sub-basins with HRUs	Pervious and impervious areas (land segments)	Square grids (uniform characteristics)	Square grids (uniform characteristics)
Temporal scale	Daily or sub-daily	Daily	1 min. to 1 day	Daily and 30 seconds	1 min. to 1 day (variable timesteps)
Water	Conceptual (SCS CN and TR55 method)	Conceptual (SCS CN method)	Conceptual	Physically-based	Physically-based
Sediment transport	Empirical (RUSLE) and physically-based	Empirical (MUSLE)	Physically-based	Physically-based	Physically-based
Temperature	X	O	O	X	O
C	O	X	X	X	O
N	O	O	O	O	O
P	O	O	O	O	O
Si	X	X	X	X	X
CSOs/SSOs	X	X	X	X	O
Source code availability	X	O	O	X	O

국내에 소개된 분포형 유역모델로는 ANSWER (Bouraoui and Dillaha, 1996), SHETRAN(Abbott et al, 1986a, 1986b) 등이 있으며, 국내환경에 적합하도록 개발된 CAMEL(Koo et al., 2004, 2005)등이 있다(표 1).

분포형모형인 CAMEL모델의 경우 우리나라에서는 시화지구에서 적용된 사례가 있으나, 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다. 분포형 유역모델인 CAMEL 모델의 특징은 중소규모 유역의 물과 오염물질의 물질수지 분석에 적합하며, 유역을 정방형 격자로 구분하여 Cell 단위로 계산하고, 토지이용이 미세하게 구분되어 물리식을 기반으로 물과 오염물질의 이동을 모의 할 수 있는 특징이 있다.

분포형 모델 CAMEL과 준분포형 모델 SWAT을 적용하여 농업비점오염 모의결과를 비교·평가 한 결과, 기본적으로 분포형 모델과 준분포형 모델의 차

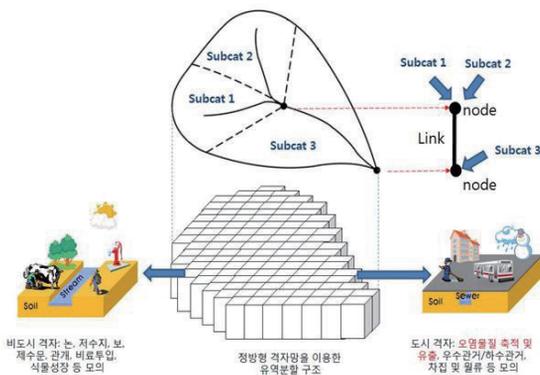


그림 3. 분포형 유역모델 CAMEL

표 2. 논의 담수심

생육 시기	물대는 요령	담수심(cm)
이앙기 (5/25~5/30)	얕게 댈 것	2~3
활착기 (5/30~6/5)	깊이 댈 것	5~7
분얼성기 (6/5~6/25)	얕게 댈 것	2~3
무효분얼기 (6/25~7/10)	중간물떼기	0 (논 표면에 금이갈 정도)
유수형성기 (7/10~7/25)	얕게 댈 것	2~4
수잉기 (7/25~8/15)	물 걸러대기	2~4
출수기 (8/15~8/20)	보통으로 댈 것	3~4
등숙기 (8/20~9/20)	물걸러대기	2~3
황숙기 (9/20~)	완전물떼기	0

이점을 가지고 있다.

분포형 모델은 유역을 세분화하여 정방향 격자를 기본 계산단위로 하기 때문에, 유역 내부의 공간적 이질성을 명시적으로 표현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 유역면적이 커질수록 모델의 계산량이 기하급수적으로 증가하는 단점이 있어 대규모의 유역에 적용하기에는 한계가 있다. 준분포형 모델은 유역을 소유역 또는 유사수문단위로 구분하고 이를 기본 계산단위로 하기 때문에, 계산속도가 상대적으로 빠르다는 장점이 있다. 그러나 소유역이나 유사수문단위는 크기와 모양이 일정하지 않기 때문에 특정 매개변수의 평균치를 각 계산단위에 대해 모의하기 위한 집성 정도가 불일치할 수밖에 없다. 따라서 대상 유역 내에서 특정 프로세스에 대한 계산이 일관되도록 평가할 수 없는 한계가 있다.

분포형 유역모델 CAMEL과 준분포형 유역모델 SWAT의 농업비점오염 모의에 적합성을 평가하기 위해 모델 내부의 구조적 특성을 살펴보면 다음과 같다. CAMEL 모델은 모든 격자 Cell마다 토지이용단위로 둑(dyke)의 높이와 계획담수심을 입력할 수 있다(표 2). 둑의 높이는 격자 Cell의 유출량을 결정하는 인자로 담수심이 둑의 높이보다 높을 경우 유

출이 발생하게 되며, 계획담수심은 관개량을 결정하는 인자로 현재 담수심이 계획담수심보다 낮을 경우 관개가 발생하도록 한다(그림 4). 둑의 높이와 계획담수심은 사용자가 시기에 따라 값을 조절할 수 있도록 되어 있어, 재배시기에 따른 영농관리를 반영할 수 있다.

SWAT 모델은 논의 담수기능을 고려하기 위하여 최소 계산단위인 HRU를 저류지(Pothole)로 설정하여 모의할 수 있다. 저류지로 설정된 HRU는 최대담수심, 담수 및 방류 시기 지정, 관개를 위한 수원의 형태(하천, 저수지, 천층대수층, 심층대수층, 유역

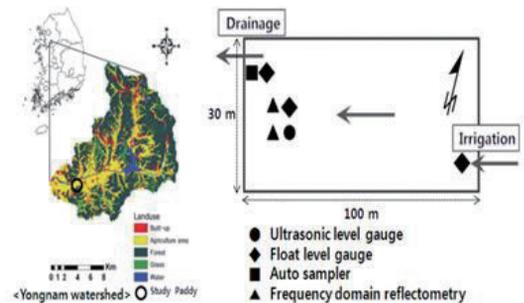


그림 4. 경기도 용남유역의 논 계획 담수심 적용

외부)와 위치 지정 등의 자료를 입력할 수 있다. 담수 상태에서 강수량, 증발량, 침투량을 계산하기 위해서는 담수면적 자료가 필요하며, 저류지를 큰 모양으로 가정하여 담수면적을 계산한다. 저류지의 최대 담수심은 일정한 값을 입력하도록 되어 있어 영농시기에 따른 담수심의 변화를 고려할 수 없는 한계가 있다.

농업비점오염을 모의할 때 중요한 인자 중 하나는 관개량과 시비량을 산정하는 방식이다. CAMEL 모델은 관개량과 시비량을 사용자가 지정하는 특정 날짜에 입력하도록 하는 방식을 취하고 있다. 반면, SWAT 모델은 사용자가 특정 날짜에 입력하도록 하는 방식과 함께 모델 내부에서 관개량과 시비량을 결정하는 자동방식도 있어 사용자가 선택할 수 있도록 되어 있다. 앞선 연구의 시험포장의 SWAT 모의결과에 따르면, 자동관개의 경우 토양수분의 양에 따라 관개를 하도록 설정되어 있는데, 특정 날짜에 입력하는 방식과 비교하여 한 번에 많은 양의 관개가 일어나고, 관개횟수 또한 적게 발생하는 한계가 있었다. 그리고 CAMEL 모델과 SWAT 모델은 증발산량 모의 시 담수상태인 경우 토양의 증발량은 계산하고, 수표면의 증발량만 계산하는 구조를 가지고 있다. 그러나 CAMEL은 논인 형태를 직육면체 형태로 가정하고 있는 반면, SWAT은 큰 모양으로 가정하고 있음에 따라 담수심이 줄어들수록 수표면적도 함께 줄어들어 수표면적의 증발량이 실제보다 적게 계산될 수 있는 한계가 있다.

논은 일정기간 동안 담수심이 유지되기 때문에 오염물질의 침식과 침전, 이동과정에서 일반 지표면과는 수질기작을 보여준다. CAMEL 모델은 지표면에 담수심이 형성되는 경우 토양 침식을 일으키는 요인으로 강우, 관개수, 지표유출수로 가정하고, 각 프로세스에 의해 생성되는 유사의 이동 및 침전을 모의한다. 그리고 탄소, 질소, 인 기작에서는 입자성 물질은 토양 침식의 형태와 유사하게 생성되며, 용존성 물질은 담수심이 형성되면 담수심의 높이에 따라 생성되는 것으로 가정하여 모의한다. 그

러나 SWAT 모델은 담수가 시작된 시점부터 유사, 질소, 인을 모의하는 수질기작이 작동하지 않는 한계를 보였다. 이는 향후 SWAT 모델을 활용한 논인 담수조건을 고려한 비점오염부하량 계산에 있어서 반드시 해결되어야 할 문제이다.

농경지에 대한 모의에서 관개량 산정 시 관개용수의 공급처가 되는 저수지, 보, 배수문과 같은 하천수리시설에 대한 모의가 중요하다. CAMEL 모델은 하천수리시설로서 보(Weir), 배수문(Under Flow Gate), 저수지(Lake)을 모의할 수 있다. 보는 하천의 중심을 가로지르는 형태의 구조물로서 일정 수심 이상일 경우 물이 흐를 수 있도록 하며, 입력 자료로 보의 높이와 두께를 입력할 수 있다. 배수문은 보와 같이 하천을 가로지르는 수리구조물이지만 일정 수위 이상일 때 수문의 아래로 배수하는 역할을 하며, 배수문의 배수기능은 특정 날짜에 배수를 시키는 방식과 수위에 따라 자동적으로 배수하는 방식으로 이루어져 있다. 저수지는 댐과 같은 구조물을 이용하여 물을 가두어두는 역할을 하며, 사용자가 유역면적, 저수지 등의 높이와 폭, 유출구의 폭, 수문의 수, 배수방식 등을 입력할 수 있다. 저수지의 유출량은 저수지의 수위 변동에 따라 사용자가 입력한 비율에 따라 유출되는 방식 또는 특정날짜에 특정한 값을 배수하는 방식으로 계산할 수 있다. SWAT 모델은 하천수리시설 중 저수지를 모의할 수 있으며, 저수지는 유역 구분 시 하나의 소유역 출구로 지정되어야 한다. 저수지의 유출량은 연평균 유출률을 이용하는 방법, 정해진 목표방류량을 이용하는 방법, 관측 월유량을 이용하는 방법, 관측 일유량을 이용하는 방법으로 계산한다. 월별 목표저수량은 월별로 사용자가 지정할 수 있지만 홍수기에 토양수분을 고려하여 모델 내부에서 계산할 수도 있다. 지표상태가 건조한 경우에는 홍수조절 여유량 최대값의 50%가 사용되며 습윤조건에서는 최대값이 사용된다. 기존 농업비점오염을 고려한 모델링 연구는 국외에서 개발된 모델을 이용하거나 그 모델의 일부 기능을 개선한 형태로 이루어져 왔다.

표 3. 논을 대상으로 한 CAMEL과 SWAT 모델 결과 비교

구분	CAMEL		SWAT	
모델 구조적 측면	장점	정방형 격자를 기본 계산단위로 하여 유역 내 공간적 이질성을 명시적으로 해석	장점	유역을 소유역 또는 유사수문단위로 구분하기 때문에 상대적으로 계산속도가 빠름
	단점	유역면적이 넓으면 모델의 계산량이 기하급수적으로 증가함	단점	소유역이나 유사수문단위의 크기와 모양이 일정하지 않기 때문에 각 매개변수의 평균값을 계산 단위별로 적용해야 함
담수심 설정	○ 모든 격자 Cell마다 독(dyke)의 높이와 계획담수심의 높이를 입력	○ 저류지로 설정된 HRU는 최대담수심, 담수 및 방류 시기, 수원의 형태와 위치 등을 입력		
	○ 영농시기별 독의 높이와 계획 담수심을 조절할 수 있음	○ 저류지의 최대담수심은 일정한 값을 입력하며, 계획담수심의 변화를 반영하지 못함		
관개량과 시비량	○ 관개량과 시비량은 사용자가 지정하는 시기에 입력하도록 함	○ 사용자가 특정 날짜에 입력하도록 하는 방식과 모델 내부에서 자동으로 결정하는 방식		
증발량	○ 논·논의 형태를 직육면체 형태로 가정하며, 담수심의 높이에 따라 수표면적이 변하지 않음	○ 저류지를 콘 모양으로 가정하며 담수심이 감소할수록 수표면적도 감소하여 증발량이 상대적으로 적게 계산될 있음		
하천 수리 시설	○ 보(weir), 배수문(underflow gate), 저수지(lake)를 모의할 수 있으며, 각 구조물별 물리식을 기반으로 유출량을 계산함	○ 저수지를 모의할 수 있으며, 저수지는 소유역 구분 시 소유역의 출구로 지정되어야 함 ○ 저수지 유출량은 연평균 유출율을 이용하는 방법, 목표방류량을 이용하는 방법, 관측유량을 이용하는 방법 등이 있음		
수질	○ 담수심 상태에서도 수질 모의가 이루어짐	○ 담수심이 있으면 수질 모의가 이루어지지 않음		

지난 10여 년간 연구 성과를 뒤돌아볼 때 국내 유역 환경에 적용하기에는 어느 정도 한계에 도달하였다고 볼 수 있다. 따라서 매우 이질적인 토지이용 특성을 가진 국내 유역환경을 반영할 수 있는 모델 구조를 가지고 있으며, 논·밭과 같은 농경지 특성과 수리관개시설과 관련된 프로세스를 모의할 수 있는 유역모델에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 필요가 있다.

4. 맺음말

이상에서 농업비점오염원에 고려가 가능한 유역

모델 중 CAMEL 모델과 SWAT 모델을 비교·분석하였다. 환경기초시설(하수처리장 등)에서 유출되는 점오염원의 경우 오염원에 대한 삭감량을 고려가 쉬우나 축산이나 농경지에서 유출되는 비점오염원의 경우 오염원에 대한 삭감량을 고려하기가 매우 어려운 실정이다. 특히, 새만금 유역의 경우 비점오염원이 비중이 높고 배수 체계가 매우 복잡하여 비점오염원을 추정하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서 새만금 유역모델을 수행하는데 있어 비점오염원을 어떻게 고려하느냐에 따라 새만금호의 수질에 미치는 영향이 지대할 것으로 판단되며, 비점오염원에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것이다.