

농업용수 이용이 하천유출에 미치는 영향

Effect of agriculture water use on streamflow

김 남 원*, 신 성 철**, 김 철 겐***
Nam Won Kim, Seong Cheol Shin, Cheol Gyeom Kim

요 지

농업지역에서의 유출 및 물사용에 대한 정확한 계측이 이루어지지 않고 있으며, 농업지역에서 발생하는 관개와 회귀에 따른 정확한 수자원 평가가 어려운 현실이다. 본 논문에서는 가용 수자원의 파악은 물론 효율적인 물관리, 수자원 계획 등 수자원 관련 제분야에 대한 효율성 제고를 위하여 농업용수 사용이 하천 유출을 중심으로 수문성분에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형의 농업용수이용과 관련한 입력자료의 특성 및 구성방법을 고찰하였으며, 그 입력자료를 보충된 유역을 대상으로 구축하여 우리나라 농업지역 특성인 담수상태의 논에 대해 모의 하였다. 농업용수 사용에 따른 각종 입력자료를 구축하여 농업용수의 관개일정을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 비교를 통해 농업용수가 하천유출, 증발산 등에 미치는 영향을 파악하였으며, 유역 전체의 물수지 변화를 살펴보았다.

본 논문은 농업지역의 순물 소모량과 회귀관계를 정량적으로 평가하고, 농업용수로 인한 수문자료의 불확실성 제고에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

1. 서 론

수많은 강우-유출모형 중에 관개를 고려한 하천유출을 산정하는 모형은 거의 소개되지 않았으나 본 연구에서 사용하고 자 하는 SWAT모형은 농업지역에서의 관개에 따른 제반수문요소인 하천유출, 증발산, 토양수분 등을 모사할 뿐만 아니라 모형 구성 또한 상당히 정교한 모형으로 평가되고 있다. 그러나 SWAT 모형 역시 우리나라의 논 농사지역의 특성인 담수상태를 고려할 수 있도록 모형은 구성되어 있으나 그 한계점을 드러내고 있다. 즉, 증발산 산정과 담수상태에서의 토양수분 함양 및 벼 작물에 대한 엽면적 지수산정 등에 많은 문제점을 내포 하고 있는 것이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 일부 해소한 수정 개발된 SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형을 소개하고, 모형내의 농업용수 관개 기능에 대한 이해를 도모하고 수문순환과정에 미치는 수문요소별 영향을 하천 유출과 증발산을 중심으로 파악하였다. 또한, 본 연구를 토대로 SWAT모형의 농업용수 관리 모형인 SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형을 개발하여 우리나라 논 농사 지역의 특수성을 고려하여 농업용수 회귀를 산정에 기여 할 것이며, 궁극적으로 본 연구진에서 개발 중인 SWAT-K 모형의 완성도를 높이는데 그 목표를 두고 있다.

2. 관개용수 적용 방법

SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형으로 우리나라 논 농사지역과 같은 담수와 농업용수의 원활한 공급을 위한 관개용수를 적용하기 위해서는 토지피복과 토지이용도로 구분되는 HRU(Hydrology Response Unit)를 담수가 가능한 HRU로의 재 설정이 필요하며, 해당 HRU에 필요한 토지이용관리를 제어 함으로써 관개가 가능하도록 구축하였다.

핵심용어 : 농업용수, SWAT-AGRIMANAGEMENT모형, 관개

* 정희원 · 한국건설기술연구원 · 수자원연구부 · 수석연구원 · 공학박사 · nwkim@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 · 수자원연구부 · 연구원 · 공학석사 · fe982@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 · 수자원연구부 · 연구원 · 공학석사 · cgkim@kict.re.kr

(가) HRU의 제어

논 농사지역의 담수 상태를 고려하기 위하여 SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형에서 1차적으로 현재 상태의 토지피복과 토양도의 특성으로 구분한 HRU에서 논에 해당하는 HRU를 담수가 가능한 HRU로 재 설정을 해야하며, 재 설정 후에는 추가적인 자료를 구축하고 그 자료의 관리를 통해 물순환의 해석이 가능하다.

이러한 HRU에 추가적으로 구축되는 일반 특성자료 중 대표적인 것은 관개용수 수원의 종류와 그 위치 자료가 있으며, 또한 HRU의 최대 담수용량 및 하천유지 유량 등을 포함한다. 관개용수의 수원은 크게 5가지로 하천, 저수지, 천층대수층, 심층대수층, 유역밖 으로 구분되며, 그 위치는 소유역으로 대신되고, HRU의 최대 담수량은 강우와 관개수량의 유입으로 그 최대량을 초과하는 양을 제한하며, 일 최대 관개수량 및 일 유량의 비를 설정 하여 하천유지유량을 확보하도록 구성하였다.

(나) 토지피복 제어 관리

현재 시스템에서 발생하는 실제적인 땅과 물의 관리에 대해 제어하기 위해 식생생장, 수확, 관개적용, 자양분의 살포, 살충제 살포, 저류/방류 및 토관배수 관리 등을 사용하고 있다. 본 연구에서는 실제 작물 생장과 그에 따른 물관리 체계에서 우선적으로 고려되는 식생생장시기, 관개, 수확에 대해 모형을 구성하였으며, 저류시기와 방류시기를 제어 함으로써 담수상태의 논에 대한 모의가 가능하도록 하였다.

① 식생의 생장 관리 (planting/begining of growing seasion)

식생 생장 관리에 필요한 정보는 식생의 생장시기와 해당 작물 생장에 필요한 온도자료 등을 구축하여야 하며, 이양 작물(예) 벼)의 경우 초기 엽면적지수와 생물량(biomass) 역시 구축되어야 한다. 또한, 해당 HRU에 생장하게 되는 작물에 대한 유출 곡선번호를 구축하여 토양수분 함양의 변화를 반영하게 된다.

식생 생장에 있어 수관높이와 엽면적의 성장은 최적의 엽면적 성장곡선으로 제어하게 되며, 엽면적 지수는 토지면적당 녹색잎의 면적으로 정의 된다(Watson, 1947). 엽면적 지수가 최대가 되면, LAI는 잎의 생장이 초과하기 시작하여 시들기 전까지 일정하게 유지되고, 이러한 작물의 잠재 성장에 대해 실제 작물은 온도, 수분, 자양분의 부족등의 이유로 생장이 억제된다.

② 관개용수 공급 관리(Irrigation Operation)

관개용수의 공급시기와 위치를 설정하여 작물 생장에 필요로 하는 수분량을 확보위해 관개수량의 외부 입력 혹은 자동산정에 따라 고정관개와 자동관개관리로 구분된다. 관개수량의 크기는 하천유지 유량과 밀접한 연관성을 띠고 있으며, 토양층의 포장용수량을 초과하게 되면 담수 혹은 유출되는 구조를 가지고 있다.

③ 수확 및 피복 제거 관리(Harvest and kill operation)

HRU의 식생 생장이 멈추고 수확을 하게 되는 시기를 결정하여, 토지피복에 남은 생체량을 산정하고 수확시기 이전동안의 작물 생장에 관련되는 모든 코드는 수행을 멈추게 된다. 즉, 특정 작물 생장이 없는 일반 HRU의 모의 과정으로 돌아가게 된다.

3. 담수상태 논의 물순환 해석 알고리즘

HRU를 담수가 가능한 논지역으로 분류하게되면, HRU의 물수지 해석은 다음과 같다.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (1)$$

여기서, V : 하루동안 저류된 물의 양 (m^3), V_{stored} : 초기 저류된 물의 양 (m^3), V_{flowin} : 하루동안 유입된 물의 양 (m^3), $V_{flowout}$: 하루동안 유출된 물의 양 (m^3), V_{pcp} : 하루동안 내린 강수량 (m^3), V_{evap} : 하루동안 증발된 물의 양 (m^3), V_{seep} : 침투로 손실된 물의 양 (m^3)

(가) 수표면적 (Surface Area) 계산

수표면 위에 내린 강수량 및 증발량, 침투량을 계산하기 위해 저수지 수표면적이 필요하다. 표면적은 논에 저류된 물의 양에 따라 변하게 되는데, 담수상태 논을 원추형으로 가정하여 다음과 같은 식을 이용하여 일별로 갱신된다.

$$SA = \frac{\pi}{10^4} \cdot \left(\frac{3 \cdot V}{\pi \cdot slp} \right)^{2/3} \quad (2)$$

여기서, SA : 수표면적 (ha), V : 저류량 (m^3), slp : HRU의 경사 (m/m)이다.

(나) 강수 (Precipitation) 및 유입량

주어진 날 동안 담수 논에 내린 강수량은 다음식(3)과 같으며, 유입량은 식(4)와 같이 계산된다.

$$V_{pcp} = 10 \cdot R_{day} \cdot SA \quad (3)$$

여기서, V_{pcp} : 강수에 의해 추가된 물의 체적 (m^3), R_{day} : 강수량 (mm), SA : 수표면적 (ha)

$$V_{flowin} = irr + \sum_{hru=1}^n [fr_{pot, hru} \cdot 10 \cdot (Q_{surf, hru} + Q_{gw, hru} + Q_{lat, hru}) \cdot area_{hru}] \quad (4)$$

여기서, V_{flowin} : 유입량 (m^3), irr : 관개량, n : HRU 번호, $fr_{pot, hru}$: 배수 면적비, $Q_{surf, hru}$: HRU에서의 지표 유출 (mm), $Q_{gw, hru}$: HRU에서 발생하는 지하수 흐름 (mm), $Q_{lat, hru}$: HRU에서 발생하는 측방 흐름 (mm), $area_{hru}$: HRU 면적 (ha)이다.

(다) 증발 (Evaporation) 및 침투(Seepage)

주어진 날에 증발로 손실되는 물의 양은 다음과 같이 계산된다.

$$V_{evap} = 10 \cdot \left(1 - \frac{LAI}{LAI_{evap}}\right) \cdot E_0 \cdot SA \quad \text{if } LAI < LAI_{evap} \quad (5)$$

$$V_{evap} = 0 \quad \text{if } LAI \geq LAI_{evap} \quad (6)$$

여기서, V_{evap} : 증발량 (m^3), LAI : 벼의 엽면적지수, LAI_{evap} : 수표면으로부터 증발량이 없을 때의 엽면적지수, E_0 : 잠재증발산량 (mm), SA : 수표면적 (ha)이다.

주어진 날에 논 바닥을 통해 손실되는 물의 양은 바닥 토양층의 토양수분함량의 함수로서 다음과 같이 계산되며, 침투량은 토양층에 추가된다.

$$V_{seep} = 240 \cdot K_{sat} \cdot SA \quad \text{if } SW < 0.5 \cdot FC \quad (7)$$

$$V_{seep} = 240 \cdot \left(1 - \frac{SW}{FC}\right) \cdot K_{sat} \cdot SA \quad \text{if } 0.5 \cdot FC \leq SW < FC \quad (8)$$

$$V_{seep} = 0 \quad \text{if } SW \geq FC \quad (9)$$

여기서, V_{seep} : 침투로 손실된 물의 총량 (m^3), K_{sat} : 첫 번째 토양층의 유효포화수리전도도 (mm/hr), SA : 수표면적 (ha), SW : 토양층 수분함량 (mm), FC : 토양의 포장용수량 (mm)

(라) 유출량 (Outflow)

물은 세 가지 다른 형태의 유출로 논에서 빠져나가게 되는데, 논 저류량이 최대저류량을 초과하는 경우와 방류시기의 설정을 통한 경우 및 논에 설치된 배수관을 통한 흐름의 형태를 취하도록 구성되어 있다.

4. 모형의 구조개선

(가) LAI 산정방법 개선

SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형에서 제공하는 벼 작물의 DB를 사용하여 일별 LAI를 산정하게 되면, 실제 우리나라의 벼의 성장곡선과는 아주 큰 차이를 나타낸다. 이렇게 산정된 LAI는 해당 HRU의 증발산량, 토양수분 등을 포함하는 수문성분에 해석에 직간접적으로 많은 영향을 미치게 되므로 벼의 엽면적 성장 곡선을 우리나라의 벼에 맞는 유사한 형태로 개선하였다.

다음 그림 1은 기존의 방법 및 DB를 이용하여 산정한 벼의 LAI와 그 알고리즘을 개선한 결과를 도시하였다.

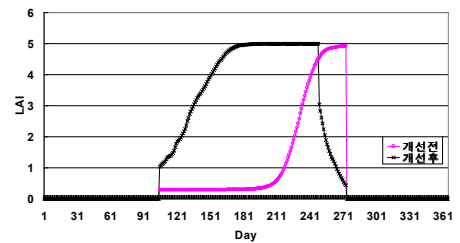


그림 1. 벼의 LAI 비교

(나) 담수면적과 수표면증발산

논의 담수면적을 산정함에 있어 기존 모형에서는 식(2)와 같이 원추형으로 가정하여 HRU의 평균경사를 고려하여 계산하고, 그 담수면적에 대한 증발량과 유출량 등을 산정하도록 되어있다. 그러나 실제 논 농사지역의 경우 경사가 진 곳은 없으며, 경사진 지역이더라도 계단식으로 논 농사지역이 형성되어 있다.

이러한 모순을 개선하기 위하여 기존의 원추형으로 되어있는 담수지역의 수표면적 산정방법을 지호의 면

적비와 HRU면적의 함수로 간략화 하였으며, 이렇게 계산된 수표면적을 이용하여 담수기간동안 수표면 증발량 등을 산정하도록 모형을 수정 보완하였다.

(다) 담수HRU의 침투량과 토양수분

담수기간동안의 HRU의 토양층으로의 침투량은 식 (7)~(9)로 계산한다. 이렇게 계산된 침투량은 토양층의 첫 번째 레이어의 토양수분에 더해지고 해당레이어의 공극률에 해당하는 수분량으로 포화상태에 이르게 하며 포화상태가 되고 남은 초과분은 다시 하부토양층으로 침투되도록 모형은 구성되어 있다. 이러한 과정을 거치면서 토양수분을 추적하게 되는데 토양층 수분량에 대한 초과분을 산정하는데 있어 모형은 큰 오류를 범하고 있음을 발견하였다. 즉, 침투량이 더해진 토양층의 수분량이 각 토양층이 가질수 있는 최대수분량보다 큰 경우에 대한 토양수분 모의가 불가능하도록 되어 있다. 이러한 오류의 영향으로 농업용수의 관계가 이루어지지 않도록 되어있다. 일반적으로 담수가 되면 토양층은 거의 포화상태에 이르게 되며, 그 침투량은 공극율에 해당하는 토양수분을 당연히 초과하게 될 것이다. 또한, 이러한 초과수량은 지하수로 함양되고 혹은 지표하 흐름으로 귀결될 것이나 기존에 구성된 모형 구조로는 이러한 현상을 반영할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 토양수분의 물리적 현상을 모의할 수 있도록 모형을 수정 보완하였다. 현재까지의 연구에는 토양수분의 추적에 국한시켜 모형을 개선하였으며, 담수로 인한 지표하 흐름과 지하수 함양에의 영향은 연구를 진행 중에 있다.

(라) HRU 증발산

SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형은 유역의 증발산량은 토양증발량과 식생증산량을 각각의 항목으로 나누어 산정하여 두 항목을 더하여 총 증발산량을 산정하도록 구성되어 있다. 담수 기간동안에 한해서는 토양증발량은 없어지며 대신 수표면 증발량이 생기는 것이 일반적인 현상이다. 그러나 현재의 SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형에서는 담수지역의 증발산량이 단지 식생의 증산량만이 증발산값으로 대체되고 있다. 즉, HRU의 증발산 산정에 있어 식 (5)~(6)으로 계산된 수표면 증발량을 포함시키지 않고 해당 HRU의 증발산량을 산정하도록 구성되어 있다. 또한, 수표면의 증발량은 일반적으로 잠재증발량에 거의 육박하는 수준으로 산정되어야 함에도 불구하고 수표면이 아닌 토양증발량에도 미치지 않도록 그 알고리즘이 형성되어 있으며, 이는 수표면 증발량 산정식이 엽면적 지수의 비로 구분되는데 모형에서 제시하는 작물의 DB가 실제 현상과는 다른 상이한 값으로 구축되어 있음으로 발생하는 문제임을 밝혔다. 이러한 모순을 해결하기 위하여 담수기간동안 수표면 증발량을 HRU 총 증발산량에 포함시키고, 작물 DB의 수정보완으로 수표면 증발량의 산정이 실제 담수지역에서 발생하는 증발산량을 모의할 수 있도록 모형을 수정 보완하였다.

5. 대상유역에의 적용

(가) 대상유역 개황

농업용수를 관개를 이용하여 확보하는 경우 실제 수문현상의 변화를 살펴보기 위해 보청천 유역을 대상으로 관개전후의 수문성분의 변화를 살펴보았다. 보청천 유역내 산성, 탄부, 이평, 기대, 산계교 지점의 수위 관측소 중 기대교 지점의 상류유역을 대상으로 1990년~1999년까지의 수문자료를 이용하여 분석하였다. 기대교 지점 상류 유역면적은 348.15 km²이며 농경지 면적은 65.73 km²로 전체 유역에 약 19%를 차지하고 있다. 또한, 중규모 이상의 농업용 저수지는 궁, 보청, 구룡, 송평, 삼가, 박석제 등이 있어 농업용수 수급에 크게 문제가 없으며, 하천변을 따라 농경지가 길게 분포하고 있는 우리나라에 산재한 대표적인 농경지역의 형태를 띄고 있다. 보청천 유역의 토지이용 현황과 대표 수문관측소와 저수지의 위치는 다음 그림 2와 같다.

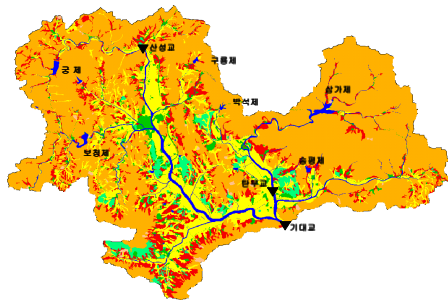
(나) 소유역 구분

보청천 유역의 논농사 지역에 대한 관개용수의 수원을 현지조사의 경험을 바탕으로 현실성있게 분포 시키기 위해 총 11개의 소유역으로 구분하였으며, 토지이용도와 토양도의 특성을 대표하는 HRU는 총 76개로 구분하였으며, 그 중 논에 해당하는 HRU는 2번 소유역에 4개, 5번 소유역에 3개, 8번 소유역에 5개, 10번 소유역에 4개, 11번 소유역에 6개로 총 22개의 HRU를 생성시켰다.

(다) 관개용수 공급을 위한 입력자료 구축

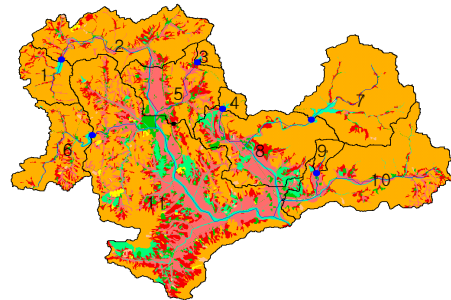
SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형을 구동하기 위한 기본적인 자료를 구축하고 분석한 결과를 토대로

논 으로 분류된 HRU에 대해 관개용수를 공급하고 담수가 가능한 지역으로 설정하기 위해 그에 따르는 매개 변수를 포함하는 입력자료를 구축하였다. 먼저 하천의 유지유량을 확보하기 위해 하천에서 관개용수를 공급 하는 경우 일별 하천유량의 75%만을 취수하도록 설정하였다. 또한 수원에서 하루동안 취수할 수 있는 관개 수량은 최대 30 mm로 제한하였다. 담수상태를 고려하게 되면 담수 HRU 즉, 지호의 최대저류량을 추가로 구성하여야 하므로 각 지호HRU의 최대 담수량은 지호면적에 가상의 눈 두께 높이 60 mm를 고려하여 개별적 으로 구성하여 담수심이 최대담수량을 초과하게 되면 전량 유출되도록 하였다. 상기의 방법으로 구축된 HRU 입력자료를 효과적으로 활용하고 작물생장과 관개용수의 공급시기 및 담수지속 기간 등을 제어하기위 한 추가의 입력자료 구축이 필요하다. 현재 우리나라의 벼 농사의 형태는 일반적으로 4월 중순경에 이앙을 하고 9월 말 혹은 10월 초순에 수확을 하고 있으며, 담수기간 역시 비슷한 시기에 이루어 지고 있다. 이러한 벼 농사 일반의 제반사항을 고려하여 작물의 생장시기를 4월 15일부터 9월 30일까지로 하며, 담수기간 및 관 개용수 공급 기간을 동일하게 설정하여 적용하였다.



■ 발
■ 활엽수림
■ 혼합림
■ 목초지
■ 침엽수림
■ 눈
■ 도시
■ 물

그림 2. 보청천 유역 토지이용도



● : 저수지
 1~11 : 소유역 번호

그림 3. 소유역 구분도

(라) 관개용수 적용 결과

농업용수의 사용으로 인한 하천 유출의 변화는 그림 4에서 알 수 있듯이 관개시작월인 4월부터 9월까지 그 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다. 관개전과 비교하여 4월에 약 7 mm의 차이를 보이며 점점 증가하여 8월에 최고치인 약 54 mm의 차이가 나타남을 알 수 있다. 이는 농경지에서 사용하는 소모량이 증가로 더 많은 관개수량이 요구됨을 역으로 판단할 수 있다.

증발산의 경우에는 하천 유출의 경우와 반대의 경향을 띄고 있다. 즉, 관개후의 증발산량이 관개전의 증발산보다 크게 산정되는 것으로 나타났다. 이는 담수가 됨으로 인해 수표면 증발량이 일반 토양증발량 보다 더 크고, 식생의 증산량이 더해져 생기는 결과로 일반적으로 알려진 물리적인 현상에 부합되는 결과를 도출 할 수 있었다. 증발산량은 4월에 약 9 mm의 차이를 나타내다가 5월~9월사이에는 약 35~45 mm의 차이를 나타냈다.

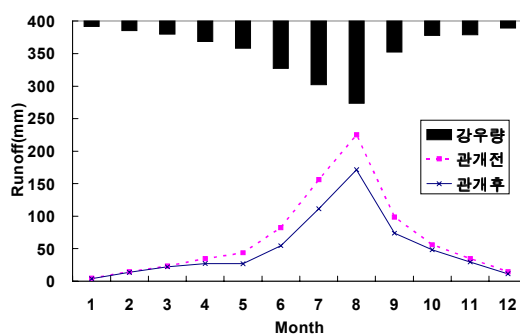


그림 4. 관개전후의 하천 유출 변화

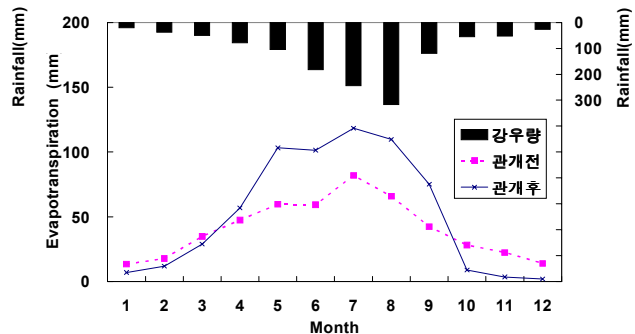


그림 5. 관개전후의 증발산 변화

농업용수의 관개에 대한 영향은 유출과 증발산의 변화 뿐만 아니라 토양수분, 침투량, 지하수 함양량,

지표하 흐름 등 제반 수문요소에 많은 영향을 미치고 있는 것으로 분석 되었으며, 이러한 수문요소의 영향을 정량적으로 나타내면 그림 6~7과 같다. 증발산과 토양수분 함양량은 관개 후가 더 크며, 나머지 표면 유출, 측방유출, 기저유출 등은 관개전이 더 큰 것으로 모의 되었다.

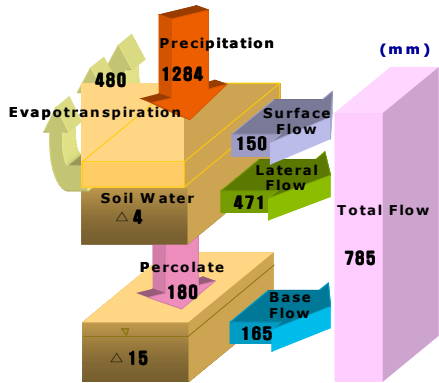


그림 6. 관개전의 물수지 모식도

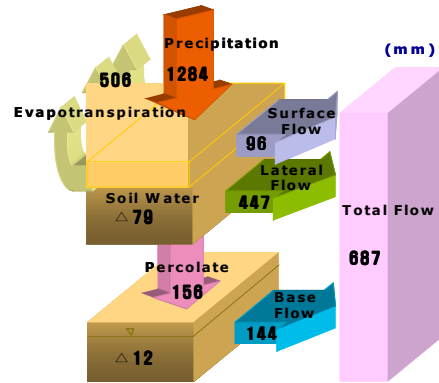


그림 7. 관개후의 물수지 모식도

5. 결론

SWAT모형의 담수 논에 대한 해석 알고리즘을 수정 개선한 SWAT-AGRIMANAGEMENT 모형을 이용하여 농업용수의 관개관리에 대한 모형의 이해를 도모하였으며, 보청천 유역을 대상으로 농업용수 이용이 하천 유출 및 증발산에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

- (1) 하천유출은 관개 시작월인 4월부터 지속적으로 그 차이가 증가하여 8월에 이르러 관개전 유량에 비해 관개후 유량이 현저하게 줄어들음을 알수 있었다.
- (2) 증발산량은 관개전에 비해 수표면 증발과 식생의 증산량 증가의 영향으로 관개후가 월 평균 40 mm 큰 것으로 나타났다.
- (3) 1990년~1999년 간의 평균적인 물수지 분석 결과 관개로 인해 토양수분량의 함양이 많아 짐을 알수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- S.L.Neitsch, J.G.Anold, J.R.Kiniry, J.R.Williams (April, 2001) Soil and Water Assessment Tool User's Manual(Ver.2000)
- S.L.Neitsch, J.G.Anold, J.R.Kiniry, J.R.Williams (April, 2001) Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation(Ver.2000)
- M.Diluzio, R. Srinivasan, J. Arnold(July, 2001) ArcView Interface For SWAT2000 User's Guide.
- 김철겸, 박승우, 임상준(2000), 논·논의 수문특성을 고려한 소유역의 유출곡선 합성, 한국농공학회지, 제42권, 제 6호, pp.56-62
- 서울대학교 농업생명과학대학 농업개발 연구소(1996). 성지지구 성주농조 집중용수관리 시스템(I)