SWAT과 MODSIM-DSS 모형을 연계한 금강유역의 농업용수 공급능력 평가

안소라* · 박근애** · 김성준***

Ahn, So Ra*, Park, Geun Ae**, Kim, Seong Joon***

Assessment of Agricultural Water Supply Capacity Using MODSIM-DSS Coupled with SWAT

ABSTRACT

This study is to evaluate agricultural water supply capacity in Geum river basin (9,865 km²), one of the 5 big river basin of South Korea using MODSIM-DSS (MODified SIMyld-Decision Support System) model. The model is a generalized river basin decision support system and network flow model developed at Colorado State University designed specifically to meet the growing demands and pressures on river basin management. The model was established by dividing the basin into 14 subbasins and the irrigation facilities viz. agricultural reservoirs, pumping stations, diversions, culverts and groundwater wells were grouped and networked within each subbasin and networked between subbasins including municipal and industrial water supplies. To prepare the inflows to agricultural reservoirs and multipurpose dams, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was calibrated using 6 years (2005-2010) observed dam inflow and storage data. By MODSIM run for 8 years from 2004 to 2011, the agricultural water shortage had occurred during the drought years of 2006, 2008, and 2009. The agricultural water shortage could be calculated as 282 10⁶m³, 286 10⁶m³, and 329 10⁶m³ respectively.

Keywords : SWAT, MODSIM-DSS, Dam operation, Agricultural water supply capacity, Water balance analysis

초 록

본 연구에서는 SWAT 모형과 MODSIM-DSS 모형을 이용하여 금강유역(9,865 km²)의 농업용수 공급능력을 평가하고자 하였다. 하천유역 네트워크 물수지 모형인 MODSIM-DSS를 이용하여 금강유역을 14개의 소유역으로 구분하고 다목적댐과 농업용 수리시설을 고려한 물수지 네트워크를 소유역별로 구성하여 물수지 분석을 수행하였다. MODSIM-DSS의 유역별 유입량(공급량) 자료는 SWAT 모형의 소유역별 유출 결과를 사용하였다. SWAT 모형의 신뢰성 있는 유출량 보정을 위해 금강유역 내 위치하는 2개의 다목적댐(용담, 대청)의 실측 방류량을 이용하여 댐 운영모의를 고려하여 모형의 보정(2005~2007)과 검증(2008~2010)을 실시하였다. 이후 MODSIM-DSS를 이용하여 8개년(2004~2011) 동안의 물수지 분석을 수행한 결과 과거 실제로 가뭄이 발생했던 기간인 2006년, 2008년, 2009년에 농업용수 부족량이 평년에 비해 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 부족량은 각각 282 10⁶m³, 286 10⁶m³, 329 10⁶m³로 분석되었다. 유역평균 농업용수 공급능력이 86.4%인데 비해 2006년, 2008년, 2009년에 각각 81.6%, 81.5%, 78.5%로 농업용수 공급능력이 떨어지는 것을 알 수 있었다.

검색어 : SWAT, MODSIM-DSS, 댐 운영, 농업용수 공급능력, 물수지 분석

* 정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과, 박사과정 (ahnsora@konkuk.ac.kr)

** 정회원 · 위성탄대학교 사회환경공학과, 박사후연구원 (parkga@uw.edu)

*** 정회원 · 교신저자 · 건국대학교 사회환경시스템공학과, 교수 (Corresponding Author · Konkuk University · kimsj@konkuk.ac.kr)

Received July 26 2012, Revised October 15 2012, Accepted February 13 2013

1. 서론

지구온난화에 따른 기후변화의 영향으로 극한 가뭄과 홍수가 국지적 양상을 띠며 동시 다발적으로 발생되고 있으며, 특히 가뭄은 주기가 짧아지고 지속기간이 길어지면서 강도도 더욱 심해질 전망이다. 이러한 극한 가뭄으로 인한 심각한 피해는 농업에 미치는 재해라고 할 수 있으며, 특히 농업 수자원 측면에서 생산자로서로서의 가치와 기후변화에 미치는 영향을 고려할 때 매우 심각한 위협 요소가 아닐 수 없다. 우리나라와 같이 물이 절대적으로 필요한 벼농사 위주의 농업에서 가뭄으로 인한 농업용수의 부족은 심각한 사태에 직면하고 있다(안소라 등 2009). 전국의 농업용저수지 약 17,531개 중 저수량 1,000만톤 이상이 농업가뭄에 견디는 수준이며, 가뭄에 대응하도록 개발되었던 양수장, 보 등 농업용 수리시설도 앞으로 다가올 가뭄에는 취약할 수밖에 없다. 이처럼 농업용수의 부족이 극심해지고 있는 상황에서 극심한 가뭄에 대응함과 더불어 현실에 부합하는 농업용수의 공급을 위해서는 기존 농업용 수리시설물의 물 공급 능력의 평가 및 물 부족지역과 풍족지역의 정확한 파악이 선행되어야 하며 이를 통해 유역단위의 수자원 계획이 수립되어야 할 것이다.

유역의 물공급 안전도를 평가하기 위한 물수지 분석에 대한 연구로는 이광만 등(1998, 1999)은 MODSIM을 이용하여 한강 수계 및 경상북도 동해동향·남부 지역의 용수공급 능력을 평가하였고, 유주환(2005)은 전국을 5대강 유역에 대하여 물 공급 안전도를 평가할 수 있는 물수지 분석 시스템을 구축하는데 MODSIM

을 도입하였다. 안상진 등 (2006)은 네트워크 모형인 MODSIM을 장래 용수수급계획 수립시의 적용 여부를 검토하기 위하여 충청 지역의 행정중심복합도시 건설 전·후의 용수공급에 대해서 분석하였다. 정태성 등 (2008)은 의사결정지원시스템으로서의 기존의 네트워크 모형 이론을 기반으로 미 콜로라도 주립대학과 한국수자원공사 K-water 연구원과 공동연구로 개발된 K-Modsim 모형을 이용하여 금강유역에서 검정 및 운영모의를 수행하여 적용성을 검토하였다. 차기욱 등 (2007)은 KModSim을 이용하여 지표수-지하수-저수지 연계운전을 모의를 수행하였으며, 가뭄시 저수지와 하천수-지하수를 적절하게 이용할 경우 물 부족과 댐 하류지역의 하천유지용수 부족을 현저히 줄일 수 있다고 제안하였다. 김수진 등(2010)은 SLURP와 K-WEAP 모형을 이용하여 기후변화에 따른 한강유역의 물수지 분석을 통해 물 수요 시나리오에 따른 미래 물부족에 대한 영향평가를 수행하였으며, 최시중 등(2010)은 K-WEAP 모형을 이용하여 물수지 분석 및 지표수-지하수 연계모의를 통해 지하수 공급가능량을 평가하고, 수량-수질 연계모의를 통해 수질분석의 적용성을 검토하였다. 또한 국외 연구로는 Faux *et al.* (1996)은 필리핀의 Pampanga강 유역의 통합 관개시스템을 위해 MODSIM2 모형을 적용하였고, Fredericks *et al.* (1998)은 MODSIM 모형을 이용하여 콜로라도 Platte강 유역을 대상으로 지표수-지하수 모의를 통해 적용성을 평가하였다. Miller *et al.* (2003) 또한 미국 Snake강 유역을 대상으로 USBR MODSIM 모형을 이용하여 지표수-지하수의 상호작용을 포함한 물수지 분석을 수행하여 적용성을 평가하였다.

Fig. 1. Flowchart of study procedure.

이처럼 현재까지 많은 연구들이 이루어지고 있지만, 물수지 분석을 통한 물 공급능력에 관한 대부분의 연구 중 농업용수 공급능력 평가에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 농업용수 평가에 관한 국내 연구로 한국농어촌공사(2009)에서는 기후변화에 따른 농업용수 영향평가를 위해 HOMWRS 모델을 이용하여 대표 농업용 저수지 8개소에 대한 물수지 분석을 수행하고 미래 농업용수 부족량을 제시한 바 있으며, 남원호 등(2012)은 농업용 저수지의 공급량과 관개지구의 수요량의 확률통계적인 해석을 통해 저수지의 용수공급능력을 정량적으로 제시하여 농업용 저수지의 물 공급 취약성을 분석하였다. 이처럼 농업용수 관련 대부분의 연구가 농업용 저수지만을 고려하여 수행되고 있으나, 안소라 등(2009)의 연구에서는 탱크모형과 MODSIM 모형을 이용하여 농업용 저수지를 포함한 농업용 수리시설을 고려한 네트워크를 구성하고 물수지 분석을 수행하여 다양한 시나리오에 따른 농업용수공급 가능성을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 금강유역을 대상으로 장기 강우유출 모형인 SWAT을 이용하여 유역 유입량을 산정하고 하천유역 네트워크 물수지 모형인 MODSIM-DSS를 연계하여 물수지 분석을 통해 가뭄 시 권역별 물 부족의 정도를 파악하고 농업용수 공급능력을 평가하고자 한다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도이다.

2. 적용 모형의 개요

2.1 SWAT 모형

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)은 미국 농무성 농업 연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 모형이다. 이 모형은 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출의 영향을 예측하기 위해 개발되었으며 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 토양수분 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(HRUs, Hydrologic Response Units) 별로 계산 할 수 있다(Arnold *et al.*, 1996).

SWAT에서 일별 유출량은 SCS 방법을 통하여 산정하며, 측방 유입량은 Kinematic Storage Model을 이용하고 침투는 10개 이하의 층으로 나누어 선형저수량 추적기법을 이용하여 계산한다. 잠재증발산의 산정에는 Hagreaves, Priestly-Taylor, Penman-Monteith을 이용한다(Neitsch *et al.*, 2001).

SWAT 모형에서는 저수지 모의는 Emergency spillway와 Principal spillway의 수위와 수표면적을 바탕으로 저류량에 대한 수표 면적을 다음 Eqs. (1), (2) and (3)과 같이 계산하며,

$$SA = \beta_{sa} \cdot V^{expsa} \quad (1)$$

$$expsa = \frac{\log_{10}(SA_{em}) - \log_{10}(SA_{pr})}{\log_{10}(V_{em}) - \log_{10}(V_{pr})} \quad (2)$$

$$\beta = \left(\frac{SA_{em}}{V_{em}} \right)^{expsa} \quad (3)$$

식(1)의 SA 는 수표면적(ha), V 는 저류된 물의 양(m^3), $expsa$ 는 먹지수이다. SWAT 모형에서는 주여수로와 비상여수로의 각각 두 개의 기지점을 사용하여 수표면적과 저수량을 산정한다. Eqs. (2) and (3)의 SA_{em} 은 비상여수로까지 채워졌을 때 저수지 표면적, SA_{pr} 은 주여수로까지 채워졌을 때 저수지 표면적, V_{em} 은 비상여수로까지 채워졌을 때 저수지에 채워진 물의 양, V_{pr} 은 주여수로까지 채워졌을 때 저수지에 채워진 물의 양이다.

저수지 저류량을 산정하는 물수지는 다음 Eq. (4)와 같다.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (4)$$

Eq. (4)의 V 는 하루 동안 저류된 저류량, V_{stored} 는 초기 저류량, V_{flowin} 은 하루 동안 유입량, $V_{flowout}$ 은 하루 동안 유출량이며, V_{pcp} 은 하루 동안 내린 강수량, V_{evap} 은 하루 동안의 증발량, V_{seep} 은 침투로 손실된 물의 양이다. 또한 SWAT에서는 저수지 모의시 실측 일방류량, 실측 월방류량, 연 평균 방류율 또는 목표 저류량 방법을 선택적으로 사용한다.

본 연구에서는 다목적댐을 모의하기 위해 저수량의 크기에 제한이 있는 ArcSWAT2005 대신 AVSWAT2005 모형을 이용하였다. ArcSWAT2005에서는 비상여수로까지 채워졌을 때의 저수량을 $15 \sim 3000 \cdot 10^6 m^3$, 주여수로까지 채워졌을 때의 저수량과 초기저수량을 $10 \sim 100 \cdot 10^6 m^3$ 로 제한하여 댐 운영모의를 하도록 되어있다.

2.2 MODSIM-DSS 모형

MODSIM-DSS (MODified SIMyld-Decision Support System) 모형은 미국 텍사스의 수자원 개발부(1972)가 개발했던 네트워크 모형인 SIMYLD를 미 콜로라도 주립대학교 Labadie 교수가 수정하여 개발한 모형이다. 이모형은 일반화된 하천유역 네트워크 모형(river basin network model)으로 네트워크 최적화기법인 Lagrangian relaxation 알고리즘을 사용하여 실수계산 보다는 효율이 매우 좋은 정수계산 방식을 선형네트워크의 해법으로 적용하였으며, 매트릭스 계산은 개량된 simplex method를 확장한 표준선형프로그램을 사용하여 정수계산방식이 필요한 정도의 정확도를 갖는 해를

계산할 수 있도록 하였다. 하천유역 관리에 있어서 물리적 수문학적, 제도적인 측면에서 물이 배분될 수 있고, 유역 수자원관리 시설의 전체적인 배치 및 운영조건을 다양하게 반영할 수 있도록 구축되어 있다(안소라 등 2009).

MODSIM-DSS는 유역시스템의 물리적 특성을 모형에 유사하게 재현하기 쉽도록 유역도의 입력기능을 제공하며, 노드(저류노드, 비저류노드, 수요노드, 통과노드)와 링크 혹은 아크를 제공한다. 비록 노드와 링크만으로 유역의 물리적, 수문학적 특성들을 똑같이 재현할 수는 없지만, 사용자는 수자원운명을 모형화하기 위하여 이들을 가상적 혹은 개념적으로 요소로 상징화 하여 사용할 수 있다. 네트워크 모의 시 완전 순환네트워크를 위해 사용자에게 의해 정의된 노드와 링크는 모형 내에서 자동으로 생성되고 계산을 수행한다. 이때 노드는 물수요 또는 공급의 단위가 될 것이고 링크는 이를 연결하는 유동 통로가 된다. MODSIM-DSS는 계산시간($t=1, 2, \dots, T$) 동안 비용을 최소화시키는 네트워크 흐름(network flow)의 최적화 알고리즘을 갖는다. 이를 식으로 나타내면 Eq. (5)와 같다.

$$\text{minimize } \sum_{k \in A} c_k q_k \quad (5)$$

여기서, c_k 는 링크 k 에서의 비용, 가중치, 혹은 우선순위를 나타내며, q_k 는 링크 k 에서의 유량을 나타내고, A 는 네트워크의 모든 링크 수이며 이때 제약조건은 Eqs. (6) and (7)과 같다.

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{j \in I_i} q_j = b_i(q) \text{ for all nodes } i \in N \quad (6)$$

$$l_{kt}(q) \leq q_k \leq u_{kt}(q) \text{ for all links } k \in A \quad (7)$$

여기서, O_i 는 노드 i 에서 시작하는 모든 유출 링크, I_i 는 노드 i 에서 끝나는 모든 유입 링크이다. b_i 는 시간 t 일 때 노드 i 에서의

유입 혹은 수요, t 는 네트워크의 모든 노드 수이며, l_{kt} 는 시간 t 일 링크 k 에서의 하한치, u_{kt} 는 시간 t 일 때 링크 k 에서의 상한치를 나타낸다. 이때 최적화 과정은 물리적인 O_i , I_i , N , 그리고 A 의 집합체로서 가정된 초기유입량 q 에 대한 물리적 제약조건들(b_i , l_{kt} , u_{kt})에 의해 정의된다. 두 번째 식은 임의의 노드에서 유입과 유출 총량은 같다는 노드 제약조건으로서 물수지 방정식이 된다. 세 번째 식은 모든 링크 흐름에서의 상한과 하한을 제한하는 물리적인 제한조건이다.

MODSIM-DSS 모형은 물수지 모의에 필요한 입력자료 및 필요한 변수자료를 구성하고 시스템의 물리적인 특성을 나타내는 노드와 링크의 연속적인 연결로 네트워크를 구성한다. 자료를 입력하는 노드의 종류에는 저수지노드(Reservoir Node), 비저류노드(NonStorage Node), 수요노드(Demand Node), 통과노드(Flowthru Node) 등이 있으며, 노드와 노드를 연결하는 링크에도 자료의 입력이 가능하고 각 링크의 방향은 흐름방향과 일치하여야 한다. 이때 노드는 실제 유역의 상황을 나타내는 물리적인 시스템 노드이고, 실선으로 된 링크는 물리적으로 흐름이 존재하는 하천, 수로, 또는 광역용수공급망을 나타낸다.

MODSIM-DSS 모형은 현재 최신버전인 v.8.1(32-bit)과 v.8.2(64-bit)이 사용되고 있는데 v.8.2는 계산속도와 소수점 자릿수 지정이 가능하고 결과파일을 손쉽게 다룰 수 있도록 개선되었으며, 프로그램을 웹사이트(<http://modsim.engr.colostate.edu/>)에서 무료로 제공하고 있다.

3. 재료 및 방법

3.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 금강유역으로 유역면적은 9645.5km²이며 유로연장은 384.8km이다. 우리나라 5대 하천의 세 번째로 큰 강으로 다른 하천에 비해 고도가 높지 않으나 유로가 길어

Fig. 2. Map of the Geum River basin and the list of hydrological observation.

우리나라 하천 중 경사가 가장 완만하며 하류지역에는 넓은 평야가 발달되어 있다. 금강유역 내에는 2개의 다목적댐(용담, 대청)과 약 1,310개의 농업용 저수지가 있다. 본 유역은 전체면적의 62%가 산림으로 이루어져 있으며 논이 15%, 밭이 11%를 차지하고 나머지 도시와 초지, 나지 등은 3% ~ 5% 정도를 차지한다. 토양특성은 양토(24%)와 사양토(58%)가 주를 이룬다. 과거 30년 평균 강수량은 1305.4mm이고 연평균 기온은 11.9℃, 연평균 상대습도는 71%로 우리나라의 평균적인 기후 특성을 나타내고 있다. 평균고도와 경사는 각각 224.3m, 27.6°이다. Fig. 2는 SWAT과 MODSIM 모형에 적용하기 위해 분할된 소유역이다.

3.2 SWAT 모형을 이용한 유출량 모의

3.2.1 GIS/RS 자료 및 수문기상자료

본 연구에서는 1:5,000 NGIS(National Geographic Informa-

tion System) 수치지도를 사용하여 해상도 100m×100m의 DEM (Digital Elevation Model)을 구축하였다(Fig. 3(a)). 토지이용도는 환경부의 2008년 토지이용도를 사용하였으며 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 주거지, 논, 밭, 초지, 나지, 수역의 9개 항목으로 분류되어 있다(Fig. 3(b)). 토양특성 입력을 위해 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하였고 유역 내에는 총 10가지 토양종류로 이루어져 있다(Fig. 3(c)).

SWAT 모형의 적용을 위해 사용되는 기상자료는 강수량(mm), 최저, 최고온도(℃), 풍속(m/sec), 상대습도(%), 일사량(MJ/m²)이다. 강수량 자료를 위해 사용된 관측소는 국토부 관할 AWS 관측소 17개, 수자원공사 관할 AWS 관측소 15개, 기상청 기상관측소 9개로 총 41개 관측소를 사용하였고, 그 외 기상자료는 9개 기상관측소 자료를 이용하였다. 모형의 구동을 위해 기상자료는 과거 11년(2001-2011) 자료를 이용하였으며, 모형의 보정(2005-2007)

Fig. 3. GIS data of the Geum River basin; (a) DEM, (b) landuse, and (c) soil properties.

Fig. 4. Release and storage of 2 multipurpose dams; (a) Yongdam dam and (b) Daechong dam.

과 검증(2008-2010)을 위해 한강홍수통제소에서 제공하는 진두 수위관측소의 6개년(2005-2010) 동안의 유출량 자료와 한국수자원공사에서 제공하는 용담, 대청 수위관측소의 6개년(2005-2010) 동안의 댐유입량 자료를 이용하였다.

금강유역은 한 수계 내 용담, 대청 다목적댐이 위치하고 있으며, 신뢰성 있는 유출량의 보정 및 검증을 위해서는 댐 운영모의를 수행하여야 한다. SWAT 모형에서 댐 운영 모의는 실측 일방류량, 실측 월방류량, 연 평균 방류율, 목표 저류량의 4가지 방법 중 하나를 이용하여 계산된다. 본 연구에서는 실측 일 방류량을 이용하여 금강유역의 용담, 대청 다목적댐 운영을 고려하였다. 이를 위해 한국수자원공사에서 제공하는 용담, 대청 다목적댐의 6개년(2005-2010) 동안의 수문방류와 발전방류를 모두 포함하는 일별 실측 총 방류량 및 저수량 자료(Fig. 4)와 댐 내용적 곡선(Fig. 5)을 수집하였다.

3.2.2 유출량 모의 결과

본 연구에서는 모형의 보정 및 검증을 위해 6개년(2005-2010) 동안의 유출량 자료를 이용하였으며, SWAT 모형의 신뢰성 있는 유출량의 검보정을 위해 용담, 대청 다목적댐에 대하여 댐운영

모의를 수행하였다. SWAT에서의 댐운영 모의를 위한 입력매개 변수는 저수지 운영 시작년도, 비상여수로와 주여수로의 수표면적과 저류량, 초기저수위, 저수지 바닥에서의 수리전도도 등이며 Fig. 5의 댐 내용적 곡선과 댐 운영 실무편람(한국수자원공사, 2010)을 참고하여 Table 1과 같이 매개변수를 입력하였다. 용담댐은 2001년, 대청댐은 1980년 완공되었지만 SWAT 모형에서 한 수계 내에 있는 2개의 댐 운영을 동시에 고려하려면 저수지 운영 시작년도를 동일하게 설정하여야 한다. 따라서 운영 시작년도를 모형의 검보정 년도와 동일하게 2005년으로 설정하였다.

Fig. 2와 같이 SWAT 모형의 소유역 분할을 MODSIM-DSS 모형 적용을 위한 소유역과 동일하게 14개(중권역 단위)로 분할할 시 댐으로 유입되는 유입량이 과대평가되는 문제가 발생하여 댐 운영 모의 시 저수량이 첫 시작 년도부터 오차가 누적되어 저수량이 과대 모의되는 현상이 발생되었다. 이러한 현상이 발생된 이유는 유역을 14개(중권역 단위)로 분할할 시 하천지류들이 생략되고 실제 하천밀도보다 훨씬 개략적으로 하천형상이 생성되어 물이 하천에 흐르지 못하고 유출되어 유입량이 과대평가되는 것으로 판단되었다. 따라서 하천밀도를 조절하여 실제 하천 수준으로 상세화하고 물이 하천에 흐르도록 한 뒤 40개의 소유역으로 분할하였다.

Fig. 5. Area-level and storage-level relationship curve; (a) Yongdam dam and (b) Daecheong dam.

Table 1. Dam operation parameters

Parameters	Definition	Multipurpose Dams	
		YD	DC
IYRES	Year the reservoir became operational	2005	2005
RES_ESA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to the emergency spillway (km ²)	37.0	74.2
RES_EVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the emergency spillway (10 ⁶ m ³)	815.0	1490.0
RES_PSA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to the principal spillway (km ²)	33.9	67.5
RES_PVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the principal spillway (10 ⁶ m ³)	742.5	1241.6
RES_VOL	Initial reservoir volume (10 ⁶ m ³)	479.5	722.8
RES_K	Hydraulic conductivity of the reservoir bottom (mm/hr)	0.5	0.1

Fig. 6. The calibration results for dam storage (2005 ~ 2010); (a) Yongdam dam and (b) Daecheong dam.

Fig. 7. The calibration and verification results for streamflow (2005 ~ 2010); (a) Yongdam, (b) Daecheong and (c) Jindu.

HRU 생성을 위한 토지이용과 토양의 면적비율을 8% : 8%로 설정하여 총 196개의 HRU로 구분하였다. 이를 통해 담별 실측 저수량과 실측 총 방류량 자료를 이용하여 모의된 저수량의 결과는 Fig. 6과 같으며, 모의된 저수량은 carry over 현상에 의해 매년 오차가 조금씩 누적되는 한계점을 보였다.

6개년(2005-2010) 동안의 일 유출량의 보정(2005-2007) 및 검증(2008-2010) 결과는 Fig. 7에 나타내었고, 그 결과 관측치와 모의치의 유출거동이 거의 유사함을 알 수 있었다. 모형의 보정에 의해 추정된 매개변수의 값은 Table 2와 같으며, 보정 및 검증의 결과는 Table 3과 같다. 이와 같이 SWAT 모형에서 모의된 소유역별 유출량은 MODSIM 모형의 입력 자료인 유역 유입량으로 사용

하게 된다. 단, MODSIM 모형에서는 다목적댐을 별도로 고려하기 때문에 소유역별 자연유입량이 입력되게 되므로 SWAT에서 모의된 유출량에서 댐 방류량을 제거한 자연유출량을 입력 자료로 변환하여 사용하였다.

안소라 등(2009)의 선행연구에서는 MODSIM 모형의 입력 자료인 유역 유입량을 수자원장기종합계획(건설교통부, 2006)에서 탱크모형을 이용하여 중권역 단위로 산정한 자연유출량자료를 이용하였다. 반면 본 연구에서 SWAT 모형을 이용하여 유역 유입량을 산정한 이유는 댐을 고려하여 모형의 보정 및 검증을 한 후, 댐 방류량을 제거하여 자연유출량을 산정한 것처럼 보다 신뢰성 있고 다른 유역에 활용 가능한 이점을 가지기 때문이다.

Table 2. The calibrated parameters for the SWAT model

Parameters	Definition	Bounds		Sensitivity Joh et al. (2003)	Adjusted Value		
		LB	UB		YD	DC	JD
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0	1	Medium	0.2	0.2	0.2
CH_N	Manning's "n" value for the main channel	0.01	0.3	High	0.016	0.010	0.014
CN2	SCS curve number for moisture condition	.35	98	High	-	+7	+10
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0	1	High	0.95	0.95	0.95
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0	500	High	150	50	40
GW_REVAP	Groundwater revap coefficient	0.02	0.2	Medium	0.02	0.2	0.05
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0	100	Medium	400	400	400
REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap (mm)	0	500	Medium	250	250	250
SOL_AWC	Available water capacity	0	1	High	0.20	0.15	0.15

Table 3. Summary of model calibration and verification^a

Gauging Station	Year	P (mm)	Q (mm)		QR (%)		R ²	RMSE (mm/hr)	NSE	ET (mm)	ETR (%)	Note
			Obs.	Sim.	Obs.	Sim.						
YD	2005	1496.8	956.5	1008.9	0.64	0.67	0.42	6.97	0.34	581.7	0.39	C
	2006	1306.3	827.5	872.6	0.63	0.67	0.74	3.52	0.73	613.7	0.47	C
	2007	1538.8	902.3	1002.5	0.59	0.65	0.59	3.85	0.59	541.5	0.35	C
	2008	844.3	365.8	505.8	0.43	0.60	0.49	1.71	0.25	404.2	0.48	V
	2009	1139.3	566.9	643.2	0.50	0.56	0.53	3.93	0.53	573.9	0.50	V
	2010	1680.2	1031.6	1087.6	0.61	0.65	0.73	4.41	0.73	557.7	0.33	V
DC	2005	1204.9	636.7	694.2	0.53	0.58	0.50	2.83	0.53	619.7	0.51	C
	2006	1323.2	689.0	618.3	0.52	0.47	0.63	3.66	0.60	564.0	0.43	C
	2007	1431.4	716.7	746.0	0.50	0.52	0.70	2.86	0.67	592.4	0.41	C
	2008	829.0	277.3	377.6	0.33	0.46	0.77	0.82	0.64	458.6	0.55	V
	2009	1032.3	352.0	426.2	0.34	0.41	0.57	2.32	0.56	584.8	0.57	V
	2010	1278.9	605.4	626.1	0.47	0.49	0.80	1.71	0.76	595.3	0.47	V
JD	2005	1402.8	725.7	692.4	0.52	0.49	0.82	1.46	0.81	575.7	0.41	C
	2006	1183.5	599.8	582.6	0.51	0.49	0.92	1.08	0.90	530.1	0.45	C
	2007	1522.1	723.8	716.0	0.48	0.47	0.91	1.09	0.91	536.1	0.35	C
	2008	855.6	355.4	360.7	0.42	0.42	0.84	0.48	0.82	427.3	0.50	V
	2009	1053.1	339.4	369.6	0.32	0.35	0.87	0.67	0.87	550.2	0.52	V
	2010	1379.4	608.3	635.8	0.44	0.46	0.92	0.61	0.93	575.9	0.42	V

^a P, Q, QR, RMSE, R², NSE, ET, ETR C, and V: precipitation, runoff, runoff ratio, root mean square error, coefficient of determination, Nash-Sutcliffe model efficiency (Nash and Sutcliffe, 1970), evapotranspiration, evapotranspiration ratio, calibration and validation respectively.

3.3 MODSIM-DSS 모형을 이용한 물수지 분석

3.3.1 농업용 수리시설을 고려한 물수지 네트워크

MODSIM-DSS 모형은 물수지 모의에 필요한 입력자료 및 필요한 변수자료를 구성하고 시스템의 물리적인 특성을 나타내는 노드와 링크의 연속적인 연결로 네트워크를 구성한다. 자료를 입력하는 노드의 종류에는 저수지노드(Reservoir Node), 비저류노드(NonStorage Node), 수요노드(Demand Node), 통과노드(Flowthru

Node) 등이 있으며, 노드와 노드를 연결하는 링크에도 자료의 입력이 가능하고 각 링크의 방향은 흐름방향과 일치하여야 한다.

Fig. 8은 3001번을 예를 들어 농업용 수리시설을 고려하여 구성된 물수지 네트워크이다. 3001_inf 노드는 소유역 유입량을 나타내며, 생·공용수 수요량 노드(3001_mi)로 생·공용수를 공급한다. 소유역별 하나로 지정된 농업용 저수지 노드(Res_3001) 앞쪽의 비저류노드는 농업용수 공급을 위한 농업용 저수지 유입량

Fig. 8. Network structure of tributary and mainstream

Fig. 9. Inflow and demand of municipal and industrial water and agricultural water of each watershed.

노드(Res_inf_3001)이고 농업용수 수요량 노드(3001_agr)에 물을 공급한다. 농업용수 수요량 노드(3001_agr)에 농업용수를 공급하는 다른 수리시설물로 양수장 노드(3001_agr_p)와 보 노드(3001_agr_d)는 농업용 저수지 유입량이 하천수로 흘러들어가는 것을 다시 역으로 끌어들이어 공급하도록 하였고, 집수암거 노드(3001_agr_c)와 관정 노드(3001_agr_w)는 지하수의 물을 이용하는 것이기 때문에 따로 노드를 연결해주었다. 만약 해당유역에 소유역간 물이동이 있을 경우 추가노드를 통하여 유역간 물이동이 이루어지도록 하였다.

3.3.2 용수 공급 및 수요량, 댐 자료 및 농업용 수리시설 자료

월 유입량 자료는 SWAT 모형에서 모의된 유역별 유출량(2001-2011)에서 warm up기간을 제외하고 8개년(2004-2011)의 각 소유역별 유출량을 사용하였다. 소유역별로 자체 물 공급원인 저수지를 고려하기 위해 각 소유역별 모든 저수지의 유효저수량을 합산하여 이를 하나의 큰 저수지로 가정하였고, 한 개 소유역의 전체면적에 대한 농업용저수지 유역을 비율로 계산하여 소유역

유입량(80%)과 농업용저수지 유역 유입량(20%)으로 분리하여 월별 유입량을 재산정하여 모델에 입력하였다(Fig. 9). 또한 생공용수와 농업용수 수요량은 수자원장기종합계획(건설교통부, 2006)의 2006년도 기준수요량 자료를 이용하였으며 농업용수 수요량이 64%, 생공용수 수요량이 36%로 분석되었다(Fig. 9). 그 외에 하천유지유량, 광역 물 이동량, 물 공급 우선순위 등을 결정하였다. 다목적댐(용담, 대청) 운영자료는 상시만수위 저수용량, 저수위 저수용량, 저수지 운영초기수위의 저수용량, 목표저수량 등을 사용하였다. 농업용 수리시설은 저수지, 양수장, 보, 집수암거, 관정을 고려하였으며, 해당 소유역별로 속해있는 모든 수리시설물의 각각의 저수용량, 양수량, 취수량, 채수량 등을 합산하여 소유역 하나당 하나의 수리시설물로 가정하였다.

농업용 저수지 저수량 자료는 한국농촌공사의 농업기반시설관리시스템(RIMS)의 자료를 이용하였고, 양수장, 보, 집수암거, 관정 등의 자료는 금강유역조사 보고서(건설교통부, 2006)의 자료를 이용하였다. 금강유역조사 보고서에는 양수장, 보의 경우 m^3/s , 집수암거, 관정은 m^3/day 로 공급량을 제시하고 있는데 이들 년

Fig. 10. Storage of agricultural irrigation facilities (agricultural reservoirs, pumping stations, weirs, culverts, wells) of each watershed.

Table 4. Annual demand, supply and shortage of Geum river basin

Year	Municipal and industrial water					Agricultural water				
	Demand (10 ⁶ m ³)	Supply (10 ⁶ m ³)	Potential water supply rate (%)	Shortage (10 ⁶ m ³)	Shortage rate (%)	Demand (10 ⁶ m ³)	Supply (10 ⁶ m ³)	Potential water supply rate (%)	Shortage (10 ⁶ m ³)	Shortage rate (%)
2004	872.0	870.4	99.8	1.6	0.2	1530.8	1470.7	96.1	60.1	3.9
2005	872.0	865.7	99.3	6.3	0.7	1530.8	1357.5	88.7	173.3	11.3
2006	872.0	865.7	99.3	6.3	0.7	1530.8	1248.8	<u>81.6</u>	<u>282.0</u>	18.4
2007	872.0	870.7	99.8	1.3	0.2	1530.8	1308.6	85.5	222.2	14.5
2008	872.0	863.9	99.1	8.1	0.9	1530.8	1247.8	<u>81.5</u>	<u>283.0</u>	18.5
2009	872.0	856.2	98.2	15.8	1.8	1530.8	1201.7	<u>78.5</u>	<u>329.1</u>	21.5
2010	872.0	871.8	100.0	0.2	0.0	1530.8	1279.1	83.6	251.7	16.4
2011	872.0	871.3	99.9	0.8	0.1	1530.8	1460.7	95.4	70.1	4.6
Avg.	872.0	867.0	99.4	5.1	0.6	1530.8	1321.9	86.4	208.9	13.6

* Underlined part : Shortage over 280million m³

자료를 월 자료로 변환하여 백만톤 단위로 모형에 입력하였다. 양수장, 보의 경우 하루 10시간, 1년에 120일(5월~8월) 동안 가동하고, 집수암거, 관정은 1년에 270일(2월~10월) 동안 가동하는 것으로 가정하였다(Fig. 10). 농업용 저수지, 양수장, 보는 주로 수리답에 용수를 공급하며, 양수장, 집수암거, 관정은 관개전에 용수를 공급한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 물수지 분석 결과

물수지 분석은 8년(2004 ~ 2011)간의 시계열 자연유출량과 기준년도(2006)의 용수수요량을 기준으로 월별모의를 수행하였으며, 앞에서 구성된 금강유역 네트워크에 필요한 자료를 입력하고 MODSIM을 구동하여 2004년부터 2011년까지의 생공용수 및 농업용수 부족량을 산정하였다. 물수지 분석결과는 용수공급 안전도를 평가하기 위해 연도별, 소유역별로 수요량, 공급량, 공급가

능율, 부족량, 부족비율에 대하여 정리하였고, 이 중 용수공급가능율은 수요량에 대한 부족량의 비율에 대하여 나타낸 것으로 이를 용수공급 가능율이라 정의하고 용수공급능력을 평가하였다(Table 4 and 5).

8개년 간 용수공급능력은 생공용수는 98.2 ~ 100%의 범위를 보였고, 농업용수는 78.5 ~ 96.1%의 범위로 분석되었다. 실제 가뭄으로 인해 체감하는 물 부족은 제한급수나 단수로 인한 생공용수의 부족 보다는 농업용수의 부족이 훨씬 심각함을 알 수 있다. 농업용수 부족량이 280 10⁶m³ 이상 발생한 년도는 실제로 가뭄이 발생했던 2006, 2008, 2009년으로 부족량은 각각 282.0 10⁶m³ 283.0 10⁶m³ 329.1 10⁶m³으로 분석되었다. 이 기간의 농업용수 공급가능율은 8개년 평균 86.4%보다 낮은 81.6, 81.5, 78.5% 수준인 것으로 나타났다. 소유역별 평균 용수공급능력은 생공용수가 98.5%, 농업용수가 88.8%로 분석되었고, 최대 농업용수 부족량이 발생한 지역은 3012(금강공주), 3011(미호천), 3013(논산천) 지역으로 분석되었다.

Table 5. Summary of demand, supply and shortage of each watershed

Watershed	Municipal and industrial water					Agricultural water				
	Demand (10 ⁶ m ³)	Supply (10 ⁶ m ³)	Potential water supply rate (%)	Shortage (10 ⁶ m ³)	Shortage rate (%)	Demand (10 ⁶ m ³)	Supply (10 ⁶ m ³)	Potential water supply rate (%)	Shortage (10 ⁶ m ³)	Shortage rate (%)
3001	15.0	15.0	100.0	0.0	0.0	65.2	60.6	92.9	4.6	7.1
3002	0.7	0.7	100.0	0.0	0.0	4.5	4.3	95.7	0.2	4.3
3003	4.1	3.6	88.4	0.5	11.6	17.0	15.1	89.3	1.8	10.7
3004	25.2	25.2	100.0	0.0	0.0	78.2	63.8	81.6	14.3	18.4
3005	7.0	6.4	92.5	0.5	7.5	69.8	57.3	82.2	12.5	17.8
3006	5.0	5.0	100.0	0.0	0.0	13.1	12.9	98.6	0.2	1.4
3007	10.3	10.2	99.3	0.1	0.7	76.5	73.2	95.6	3.3	4.4
3008	40.3	40.3	100.0	0.0	0.0	47.7	44.2	92.7	3.5	7.3
3009	262.6	262.6	100.0	0.0	0.0	45.8	35.9	78.3	10.0	21.7
3010	11.2	11.2	100.0	0.0	0.0	19.2	16.8	87.6	2.4	12.4
3011	293.3	289.8	98.8	3.5	1.2	294.8	254.7	<u>86.4</u>	<u>40.1</u>	13.6
3012	79.8	79.8	100.0	0.0	0.0	323.2	249.9	<u>77.3</u>	<u>73.3</u>	22.7
3013	39.1	39.0	99.7	0.1	0.3	186.6	166.2	<u>89.1</u>	<u>20.4</u>	10.9
3014	20.4	20.4	100.0	0.0	0.0	187.2	178.8	95.5	8.4	4.5
Total	813.9	809.2	98.5	4.7	1.5	1428.8	1233.7	88.8	195.0	11.2

* Underlined part : Shortage over 20million m³

* Potntial water supply rate (%), shortage rate (%) : average

Fig. 11. Monthly demand, supply, shortage and potential agricultural water supply rate on drought period (2006, 2008 and 2009).

4.2 농업용수 공급능력 평가

농업용수 공급능력을 평가하기 위해 실제 가뭄년도인 2006, 2008, 2009년을 선정하여 분석하였다. 부족량을 월별로 도시해보면 농업용수 부족량은 관계기인 6월~9월에 주로 발생하는데, 특히 6월에 최대로 부족량이 발생하다가 장마철인 7월에 급격히 감소하며 다소 강수량이 적은 8~9월에 다시 부족량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 농업용수 공급능력을 월별로 도시해 보면 부족량이 많이 발생했던 6월과 9월에 대하여 용수공급능력이 현저

히 떨어지는 것을 알 수 있었다(Fig. 11).

Fig. 12는 2006, 2008, 2009년에 대하여 부족량이 가장 많이 발생하는 6월~9월의 농업용수 부족량을 권역별로 비교한 그림이다. 농업용수 부족이 가장 많이 발생한 지역은 3012(금강공주)와 3011(미호천) 유역으로 분석되었고 이처럼 권역별로 농업용수 부족량을 분석한 결과 농업용수가 다른 지역에 비해 상대적으로 부족하여 농업기계에 취약한 지역을 파악할 수 있었으며, 용수 공급 및 배분계획 수립 시 활용 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 12. Agricultural water shortage in drought period (2006, 2008, and 2009).

5. 결론

본 연구에서는 금강유역(9865 km^2)을 대상으로 SWAT 모형과 MODSIM-DSS 모형을 연계하여 농업용수 공급능력을 평가하였다. SWAT 모형을 이용하여 소유역별 일 유출량을 산정하고 이를 MODSIM-DSS의 입력 자료로 활용하였으며, MODSIM-DSS 모형을 이용하여 농업용 수리시설을 고려한 물수지 네트워크를 구성하고 물수지 분석을 수행하여 농업용수 부족을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일 유출량 산정을 위해 SWAT 모형을 이용하여 금강유역을 40개의 소유역으로 분할하고 보정(2005-2007)과 검증(2008-2010)은 6개년에 걸쳐서 실시하였다. 진두 수위관측소 지점에서의 Nash-Sutcliffe 모형효율계수는 0.82-0.93, RMSE는 0.48-1.46의 범위로 실측유량을 잘 재현하고 있음을 알 수 있었다. 신뢰성 있는 보정 및 검증을 위해 금강유역 내 2개의 다목적댐(용담, 대청)의 6개년(2005-2010) 동안의 댐 운영 모의를 수행하였고 실측 방류량을 이용하여 모의된 저수량은 실측 저수량을 잘 모의하는 것으로 나타났다.
- (2) MODSIM-DSS 네트워크 모델링을 위해 금강유역을 14개의 소유역으로 분할하고, 입력 자료로 SWAT에서 모의된 유역 유입량, 용수수요량, 농업용 수리시설(농업용 저수지, 양수장, 보, 집수암거, 관정)의 공급량을 소유역별로 준비하였다. 소유역별 유입량의 경우 3010(대청댐하류), 3011(미호천), 3012(금강공주)순으로 유입량이 가장 많았고 수요량의 경우에도 3011(미호천), 3012(금강공주) 유역이 가장 많았으며 특히 농

업용수 수요량이 큰 것으로 분석되었다. 농업용 수리시설의 공급량도 대체적으로 3011(미호천), 3012(금강공주) 유역이 가장 많은 것으로 분석되었다.

- (3) 농업용 수리시설을 고려한 물수지 네트워크를 구성한 뒤 물수지 분석을 수행한 결과 8년(2004~2011)간의 농업용수 부족은 실제 가뭄이 발생된 해인 2006년, 2008년, 2009년에 가장 많이 발생하였으며, 부족량은 각각 $282.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, $283.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, $329.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 농업용수 공급능력이 8개년 평균 86.4%보다 낮은 81.6, 81.5, 78.5% 수준인 것으로 분석되었다. 월별로 분석해 보면 농업용수 부족량은 관개기인 6월~9월에 주로 발생하였으며, 농업용수 부족이 가장 많이 발생한 지역은 3011(미호천)과 3012(금강공주) 유역으로 분석되었다.
- (4) 본 연구를 통해 유역의 유입량과 수요량, 농업용 수리시설의 공급량 모두 3011(미호천), 3012(금강공주) 유역이 많은 것으로 나타났고 부족량 또한 같은 유역에서 가장 많이 발생한 것을 알 수 있었다. 용수 수요량이 가장 많이 요구되는 지역에 비교적 많은 농업용 수리시설을 배치하여 운영하고 있는 것으로 파악되었지만 현재 운영되는 수리시설의 공급량으로 3011(미호천), 3012(금강공주) 유역의 농업용수 부족을 해결하기에는 부족한 것으로 나타났다.

본 연구의 결과에 의해 금강유역의 농업가뭄에 취약한 지역을 파악할 수 있었다. 현재에도 극심한 가뭄을 겪고 있고, 앞으로 기후변화에 의해 더욱 가중될 농업가뭄에 대응할 수 있는 구조적 또는 비구조적 대책을 수립하기 위해서는 이러한 농업용수 부족을 정량적으로 검토하는 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0008716)

References

- Ministry of Construction & Transportation (2006). Water Vision 2020 (in Korean).
- Ministry of Construction & Transportation (2006). Geum River Basin Survey Report (in Korean).
- Kim, S. J., Kim, B. S., Jun, H. D., Kim, H. S. (2010). "The Evaluation of Climate Change Impacts on the Water Scarcity of the Han River Basin in South Korea Using High Resolution RCM Data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 3, pp. 295-308 (in Korean).
- Nam, W. H., Kim, T. G., Choi, J. Y., Lee, J. J. (2012). "Vulnerability Assessment of Water Supply in Agricultural Reservoir Utilizing Probability Distribution and Reliability Analysis Methods." *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 2, pp. 37-46 (in Korean).
- Ahn, S. J., Choi, B. M., Kwark, H. G., Kim, H. H. (2006). "An Application of River Basin Network Flow Model for Optimum Water Allocation Planning." *Conference on Korea Water Resources Association*, pp. 365~369 (in Korean).
- Ahn, S. R., Park, G. A., Shin, Y. H., Kim, S. J. (2009). "Assessment of the Potential Water Supply Rate of Agricultural Irrigation Facilities Using MODSIM - For Geum River Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 825-843 (in Korean).
- Yoo, J. H. (2005). "Suggestion of the Water Budget Analysis Method by MODSIM for the Assessment of the Water Supply Reliability." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 1B, pp. 9-17 (in Korean).
- Lee, G. M., Yoon, S. Y., Kim, H. J. (1998). "Water Balance Analysis of Watershed Using Network Flow Model." *Conference on Korea Water Resources Association*, pp. 97-102 (in Korean).
- Lee, G. M., Yi, J. E., Shim, S. J., Ko, S. K. (1999). "Water Resources Evaluation using Network Optimization Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 32, No. 2, pp. 143-152 (in Korean).
- Cheong, T. S., Kang, S. U., Ko, I. H., Hwang, M. H. (2007). "Development and Validation of KModSim for the Decision Support System in Geum River Basin." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3B, pp. 319~329 (in Korean).
- Cha, K. U., Cheong, T. S., Ko, I. H. (2007). "Validation of the Surface-Ground Waters Interaction and Water Supplying to Upper Region of Geum River Basin by Optimal Method for Drought Season." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 5B, pp. 507~513 (in Korean).
- Choi, S. J., Lee, D. R., Moon, J. W., Kang, S. K. (2010). "Application of K-WEAP (Korea-Integrated Water Resources Evaluation and Planning Model)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 7, pp. 265-633 (in Korean).
- K-water (2010). Dam Operation Manual (in Korean).
- K-water (2009). Assessment of Climate Change Impact on Agricultural Water (in Korean).
- Arnold, J. G., and Allen, P. M. (1996). "Estimating Hydrologic Budgets for Three Illinois Watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 176, No. 1, pp. 57-77.
- Faux, J. C., Labadie, J. W., and Lazaro, R. C. (1986). "Improving Performance of Irrigation/Hydro Projects." *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 112, No. 2, pp. 205-224.
- Fredericks, J. W., Labadie, J. W., and Altenhofen, J. M. (1998). "Decision Support System for Conjunctive Stream-aquifer Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 124, No. 2, pp. 69-78.
- Joh. H. K., Lee, J. W., Park, M. J., Shin, H. J., Yi, J. E., Kim, G. S., Srinivasan, R., and Kim, S. J. (2011). "Assessing climate change impact on hydrological components of a small forest watershed through SWAT calibration of evapotranspiration and soil moisture." *ASABE*. Vol. 54, No. 5, pp. 1773-1782.
- Miller, S. A., Johnson, G. S., Cosgrove, D. M., and Larson, R. (2003). "Regional scale modeling of surface and groundwater interaction in the Snake River Basin." *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 39, No. 3, pp. 517-528.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2001). "Soil and Water Assessment Tool; the theoretical documentation." *U.S Agricultural Research Service*, pp. 340-367.