Journal of Environmental Science International
23(4); 723~735; April 2014

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2014.4.723

ORIGINAL ARTICLE

SWAT 모형을 이용한 낙동강 유역의 장기 유출에 따른 유사량 분석

지 운 · 김태근[1] · 이은정[2] · 류경식[2] · 황만하[2] · 장은경*

한국건설기술연구원, [1]청주대학교 환경공학과, [2]K-water 연구원

Analysis of Sediment Discharge by Long-term Runoff in Nakdong River Watershed using SWAT Model

Un Ji, Tae-Geun Kim[1], Eun-Jeong Lee[2], Kyong-Sik Ryoo[2], Man-Ha Hwang[2], Eun-Kyung Jang*

River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea
[1]Department of Environmental Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea
[2]Department of Water Management Research Team, K-Water, Daejeon 305-730, Korea

Abstract

Sediment discharge by long-term runoff in the Nakdong River watershed should be predicted for the maintenance and management of the Nakdong River newly changed by the four major river restoration project. The data establishment by the analysis of runoff and sediment discharge using the long-term watershed model is necessary to predict possible problems by incoming sediments and to prepare countermeasures for the maintenance and management. Therefore, sediment discharges by long-term runoff in the main points of the Nakdong River were calculated using SWAT(soil and water assessment tool) model and the relations and features between rainfall, runoff, and sediment discharge were analyzed in this study. As a result of sediment discharge calculation in the main points of the Nakdong River and tributaries, the sediment discharge at the outlet of the Naesung Stream was greater than the Jindong Station in the Lower Nakdong River from 1999 to 2008 except the years with low precipitation. The sediment discharge at the Nakdong River Estuary Barrage (NREB) was corresponding to 20% of the Jindong Station which is located about 80 km upstream from NREB.

Key words : Long-term runoff, Nakdong river watershed, Sediment discharge, SWAT model, Watershed runoff modeling

1. 서 론

낙동강 유역에는 4대강 사업으로 8개의 보가 낙동강 본류에 새롭게 설치되었으며, 이로 인해 상류로부터 유입되는 유사가 보 상류에 퇴적되어 하천제방이나 하천구조물의 안전을 위협하는 문제가 발생 할 수 있다. 유사는 하천에서 유수에 의해 이송되는 사립자를 의미하며 유량에 따른 이러한 사립자들의 양을 유사량으로 정의한다. 유역 내 지속적인 강도 높은 강우발생으로 인해 농경지의 매몰과 저수지 퇴적 등 유역 유사에 의한 다양한 문제가 발생할 수 있다. 강우로부터 유출되는 유사는 강우사상에 따라 빠르게 변할 수

Received 24 June, 2013; **Revised** 3 April, 2014;
Accepted 4 April, 2014
***Corresponding author**: Eun Kyung Jang, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea
Phone: +82-31-910-0118
E-mail: jang@kict.re.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있으나 수체에 즉각적인 영향을 유발하지 않을 경우 만성적인 특성으로 인해 침전물을 계속 이동시키며 축적되는 문제가 발생한다. 따라서 이러한 문제를 사전에 예측하고 낙동강 유역에 대한 유역유사 관리대책을 마련하기 위해서는 장단기 유역모형을 활용하여 유역 유출과 유사의 이송 및 퇴적양상을 분석하여 유역관리를 위한 자료를 구축할 필요가 있다(Ministry of land infrastructure and transport, 2013).

기존에 개발된 다양한 장기유출모형 중 대표적으로 SWAT(soil and water assessment tool) 모형을 이용한 유역유출 연구들이 많이 수행되고 있다. 이러한 SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리상태에 따른 물과 유사, 비료, 농약 등의 오염물질 거동에 대한 시공간적 변화를 모의 및 예측하는 유역 유출모형이다(Gassman 등, 2007). Chaplot(2005)은 DEM (digital elevation model) 격자 크기와 토양도 스케일 변화에 따른 SWAT 모형의 유출 및 유사 그리고 질산성질소의 예측에 관한 연구를 수행하였으며, Yang 등(2009)은 SWAT 모형을 이용하여 토사유출 감소를 위한 BMP(best management practice) 방안의 효과 분석을 수행한 바 있다. Schilling 등(2008)은 SWAT 모형을 이용하여 미국의 Iowa주 4개의 유역에 대하여 소유역 분할 개수가 유출량, 유사량 및 농업비점오염물질 산정에 미치는 영향을 평가하였고, Johnson 등(2003)은 지표면 유출에 대하여 서로 다른 메커니즘을 갖는 HSPF(hydrologic simulation program-fortran) 모형과 SMR(soil moisture routing) 모형을 비교 분석하였다. 국내의 경우, Lee 등(2004)이 SWMM(storm water management model)모형을 활용하여 도시유역에서의 강우-유출을 해석하기 위한 설계조건으로서의 강우공간분포와 소유역 분할이 결과에 미치는 영향을 9개 도시유역에 대해 평가하였으며, Hong (2009)은 WEPP(water erosion prediction project) 모형을 활용하여 소유역 분할 효과에 따른 산지유역에서의 토사유출량을 예측하였다. 또한 Han과 Yang(2009)은 제주도 유역에 대해 토지이용변화에 따른 유출량을 산정하여 재해에 큰 영향을 미치는 직접 유출률을 분석하였으며, Kim 등(2001)은 한국형 유역수문 모형인 SWAT-K를 활용하여 장기유출 정보를 모의하고 유황 분석을 통해 수문학적 적절성을 평가하였다. 이러한 유역유출 및 토사유출 모의 연구는 유역내의 구조물 설치 및 하도 준설로 인한 영향을 검토하고 사후 유사관리 및 대책수립을 위한 유역관리 지침을 제시하는데 활용될 수 있다.

본 연구에서는 낙동강 유역의 유출량 자료와 유량-유사량 관측자료 등을 이용하여 본류 및 지류 유출구 주요지점에 대해 SWAT 모형 검보정을 수행하고, 검보정된 모형을 활용하여 낙동강 유역의 여러 주요 지점에 대한 유사유출량을 산정하고자 한다. 또한 낙동강 유역의 장기 유역유출로 인해 유역에서 하천으로 유입되는 유사량에 대한 주요 지점별 분석을 통해 강우발생과 유출량 그리고 유사량과의 관계 및 특성을 분석하여 낙동강 유역유사 관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 적용대상 유역 및 SWAT 모형의 개요

2.1. 낙동강 유역 특성

본 연구의 대상유역은 상류로부터 유입되는 유사 퇴적으로 인해 보 상류 유지관리에 다양한 문제가 발생할 것으로 예상되는 낙동강 유역이다. 낙동강 유역에서 발생하는 장기적인 유사유출을 예측하는 것은 4대강 사업으로 인해 새롭게 변화한 낙동강 하천의 유지 관리를 위해 반드시 선행되어야 할 과제이다. 낙동강은 유로길이 510.36 km, 유역면적 23,817.21 km^2로 강원 태백 함백산(1,573 m)에서 발원하여 동쪽으로 태백산맥과 서북쪽 속리산, 덕유산, 지리산으로 이어지는 소백산맥을 유역경계로 하여 낙동강 유역의 중심부를 통과하며, 산악으로 인하여 최단거리로 유하하지 못하고 유향을 4차례나 급변시키면서 우회하여 남해안에 유입한다. 낙동강의 경사는 매우 완만하여 400 km 상류의 안동에서도 해발고도 100 m에 달하지 못한다. 완만한 경사로 인해 발생하는 유사의 퇴적은 홍수위 상승, 수리구조물 붕괴 등 다양한 문제를 야기할 수 있다. 또한 낙동강 유역은 4대강 살리기 사업의 일환으로 가장 많은 보(8개)와 신규댐(3개)이 건설되고 이로 인해 유역과 하도의 환경변화가 많이 나타날 것으로 예상되는 유역이다(Ministry of land infrastructure and transport, 2013).

Fig. 1. Nakdong River watershed(Map source : Google.com).

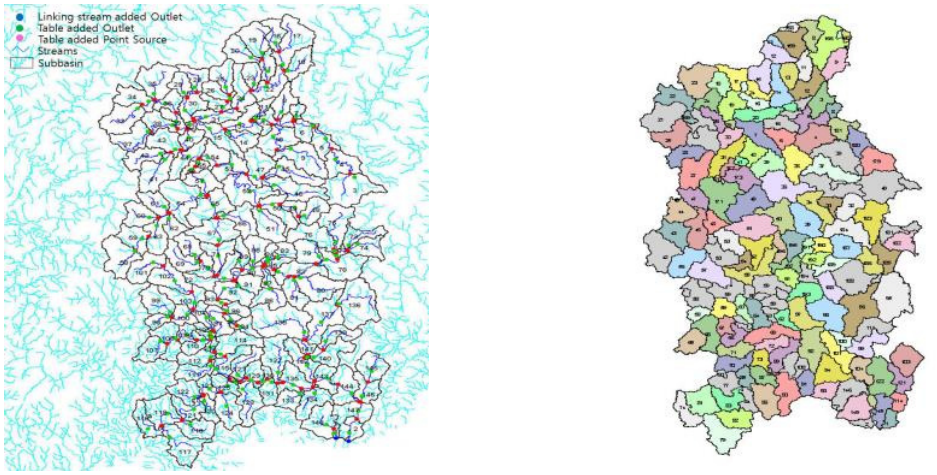
2.2. 장기 유역 유출 및 유사 모의를 위한 SWAT 모형

본 연구에서 활용한 SWAT 모형은 미국 농무성(United states department of agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural research service, ARS)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발된 유역모형이다. SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하기 위해 개발되었다(Netisch 등, 2011).

SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사, 비료, 농약 등 오염물질의 거동에 대한 시・공간적 변화를 모의・예측하는 모형으로 하천의 수리 및 수질모의, 유사 및 토양유실량 산정, 유역 내 점・비점오염배출량 산정, BMPs(best management practices) 이용한 오염물질 저감효과 모의 등을 포함하는 통합 유역모형이다(Ministry of land infrastructure and transport, 2013). 최근 국내에서도 그 적용이 증가하고 있는 추세로 1990년대 후반 이후, 유출량 해석을 중심으로 연구가 시작되어 최근에는 비점오염관리를 위한 수질모의와 모형내 알고리즘 개선 등에 관한 연구가 진행되고 있다. 연구 대상지역도 소하천 유역에서 다목적댐을 대상으로 하는 대규모 유역에 이르기까지 다양한 유역 규모를 대상으로 연구가 수행되고 있다. 이러한 SWAT 모형은 입력자료로 장기간 일기상자료를 이용하기 때문에 기상변화가 심한 지역의 수문 및 수질현상 평가에 매우 유용하며, 토양과 토지이용 관리 상태에 따라 토양유실의 발생 및 거동에 관한 분석이 가능하다. 이러한 SWAT 모형은 본 과업의 대상지역인 낙동강 수계에서 유역으로부터 유입되는 유사의 거동을 예측하는데 매우 유용한 모형으로 판단된다.

3. 장기 유역모형 구축

본 논문에서는 낙동강 유역의 33개 중권역 중 기타 수계 11개를 제외한 22개의 중권역을 대상으로 SWAT 모형을 구축하였으며, 낙동강 본류 및 지류의 상류에 위치한 댐 유역은 본류와 구분하여 모형을 구축하였다. 따라서 본 논문에서는 낙동강 전체 유역을 본류의 안동댐 유역, 반변천의 임하댐 유역, 금호강의 영천댐 유역, 황강의 합천댐 유역, 남강의 남강댐 유역, 밀양강의 운문댐 유역 및 낙동강 본류 등 7개의 유역으로 구분하였다. 댐 유역을 중심으로 유역을 7개로 나누어 모형을 구축한 이유는 강우시 댐 상류 유역에서 발생한 유사량은 댐으로 유입된 후 침전 등에 의해 제거되기 때문에 댐 방류구에서는 유입유사량보다 매우 낮은 농도로 방류된다. 또한 강우 종료 후에는 댐 유입수의 유사농도는 매우 낮지만 이전 강우시 유입된 유사가 밀도류에 의해 댐에서 탁수로 방류될 경우 하류 하천에서 유사모의는 매우 큰 편차를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 댐 방류지점을 본류와 연계된 지류의 최상류점으로 지정하여 댐에서의 실제 방류량과 실측한 부유물질 농도를 입력함으로서 본류에서의 유사모의 정확도를 최대로 향상시키기 위해 낙동강 유역을 7개로 구분하였다. 실측 부유물질 농도는 K-water에서 보유하고 있는 각 댐방류지점 별 월평균 농도를 입력하였다. 이러한 이유 외에도 SWAT 모형은 HRU 및 소유역 수에 따른 경사길이와 경사도가 유사량 모의값에 민감하게 영향을 미치므로 적정한 수준으로 HRU와 소유역을 분할하고, 또한 모형의 구동시간을 단축하여 과업 수행효율을 향상시키며, 유사량 모의에 영향을 미치는 매개변수를 각 유역의 특성에 적합



(a) inlet/outlet (b) subbasin distribution of SWAT

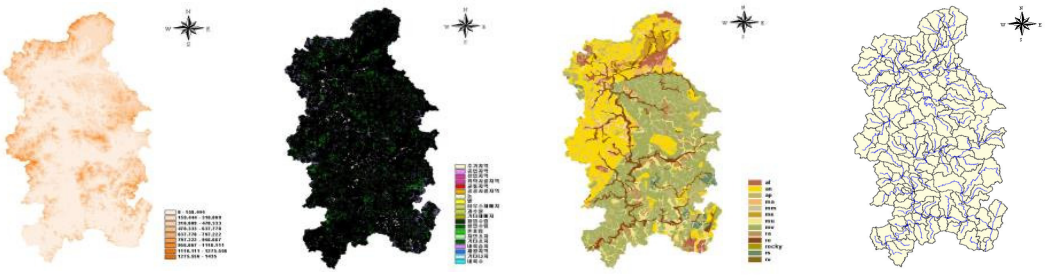
Fig. 2. Inlet/Outlet and subbasin distribution of the Nakdong River watershed.

하게 선택하기 위한 목적도 있다.

SWAT 모형에서 소유역 구분은 DEM으로부터 흐름방향과 흐름집적을 계산하여 하천망을 생성시킨 후 유역의 최종 출구지점을 지정하여 분할한 다음 분할된 소유역의 지형학적 특성인자를 계산하여 분할된 소유역 면적, 유역경사, 하천길이, 하천 평균폭, 하천 평균깊이 등의 자료를 획득한다. 본 논문에서 SWAT 모형의 소유역 구분은 4대강 사업 중 신설될 보와 저수지를 고려하여 제작한 표준유역분할도를 기준으로 각각의 표준유역 말단지점에 출구를 지정하여 표준유역분할도와 유사하게 분할하였으며 Fig. 2는 낙동강 본류 유역의 유입, 유출구 및 분할된 표준유역을 나타낸 결과이다.

3.1. 지형자료 생성

SWAT 모형을 이용한 장기유출 및 유사유출 모의를 위해 입력되는 자료로는 수치고도모형(DEM), 토지이용도, 토양도 및 하천도가 있다. 입력자료는 유역 전반에 걸쳐 적용되는 유역 매개변수와 각각의 소유역별로 입력되는 자료 및 각 소유역에 대하여 HRU별로 입력되는 자료로 구성되어 있다. 크게 GIS를 통해 자동적으로 구성되는 유역자료와 토양자료, 작물자료가 있으며, GIS와 수동입력을 병행하여 작성되는 기상자료, 소유역자료, 하천특성자료, 지하수자료 등으로 구분할 수 있다. 또한 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 HRU별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결



(a) DEM (b) land cover map (c) soil map (d) river channel map

Fig. 3. Thematic maps for SWAT modeling.

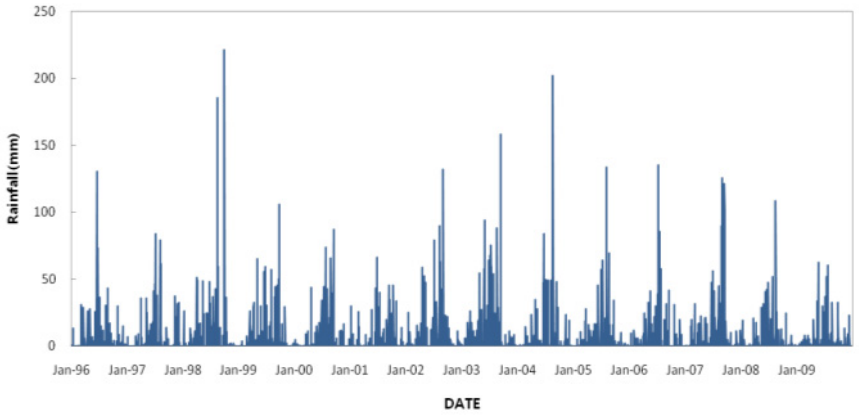
과치로 구분된다. 본 연구에서의 토양자료를 구성하기 위해 국립농업과학원에서 제작된 개략토양도를 활용하였으며 이를 이용하여 대상유역의 토양통을 파악한 후 농촌진흥청의 토양통 자료를 활용하여 속성값을 입력하였다(RDA, 2005). 입력자료 생성 결과는 Fig. 3과 같다.

3.2. 강우 및 기상자료

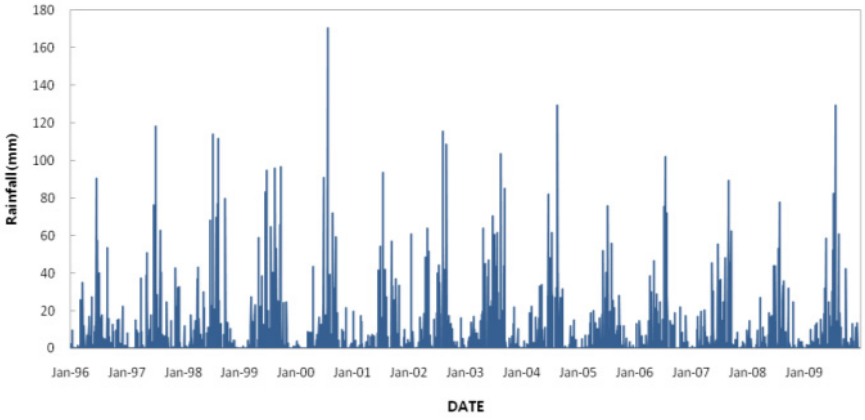
SWAT 모형에서는 강우, 풍속, 기온, 태양복사량, 상대습도 등의 기상자료를 입력하여 유출 및 증발산 등의 수문성분을 계산하게 된다. 기상자료에는 모의기간 동안의 일별 자료가 포함되어 있어야 한다. 본 연구에서는 낙동강수계의 기상관측소 및 강우관측소에서 1996년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지 관측된 일별 기상자료를 수집하여 입력하였다. Fig. 4는 낙동강 유역 내 기상관측소에서 측정한 강수량 데이터 중 일부를 그래프로 나타낸 것이다.

4. 실측자료를 이용한 모형 검보정

모형의 보정은 모형으로부터 계산된 값과 실측값이 잘 일치하도록 모형의 초기조건 및 반응계수를 유역의 조건에 맞도록 조정하는 과정이다. 일반적으로 SWAT 모형과 같은 준분포형 모형은 유역의 물리적 특성으로부터 반응계수를 추정하기 때문에 모형의 보정이 필요하지 않다. 그러나 유역에서 실측되거나 관



(a) Gumi station



(b) Andong station

Fig. 4. Rainfall data at the Nakdong River watershed from 1996 to 2009.

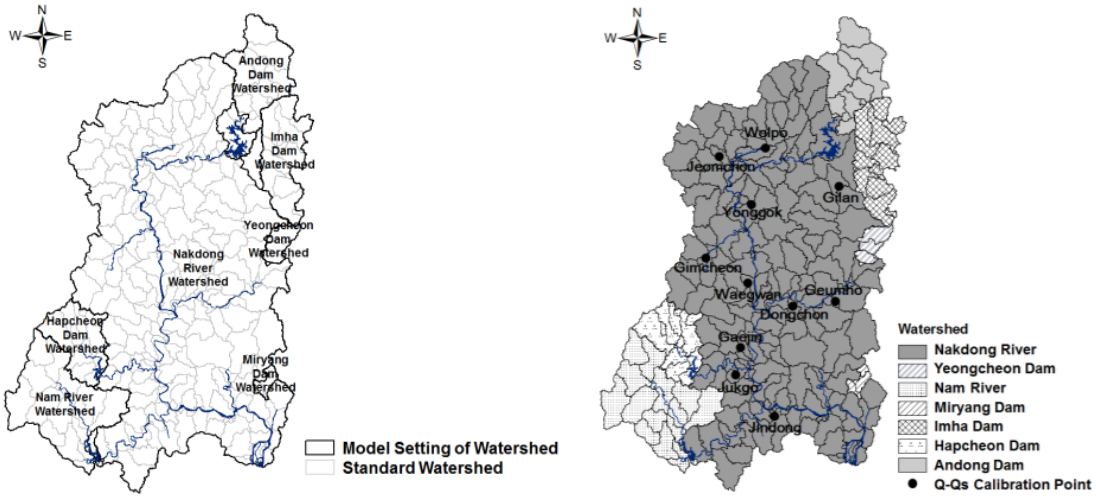
측된 자료로부터 얻을 수 있는 반응계수의 값이 제한적이거나, 얻을 수 있는 자료가 없는 경우에는 유역의 임의지점에서 조사된 자료를 이용하여 모형의 반응계수 보정을 수행한다. 특히 유사량의 경우 다소 경험적이고, 불확실도가 크기 때문에 반응계수의 보정이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 유사모의의 정확도 향상을 위하여 안동댐, 임하댐, 영천댐, 합천댐, 남강댐, 밀양댐 및 낙동강 본류 등 총 7개 유역으로 구분하여 SWAT 모형을 구축하였으며(Fig. 5(a)), 각 유역별로 유출량과 유사량에 대하여 보정 및 검증을 수행하였다. Fig. 5(b)는 11개의 보정 및 검증지점을 나타낸 것으로 지류에 9개소, 본류에 2개소가 위치하고 있다. 보정 및 검증지점의 선정은 유출량 자료와 유출량-유사량 관계곡선이 모두 있는 수위관측소를 대상으로 하였다. 13개 지류 중 미천, 병성천, 남강, 밀양강 및 양산천의 5개 지류는 이러한 자료를 갖춘 관측소가 없어 검보정에서 제외하였고, 본류에 왜관과 진동지점을 추가하여 총 11개 지점에서 모형의 검보정을 실시하였으며, 검보정을 하지 못한 4개 지류는 인근 지류의 보정계수를 사용하여 보정하였다. SWAT 모형의 모의기간은 1996년부터 2009년까지 이며, 1996년부터 1999년을 초기반응계수 안정화 기간으로 지정하였고, 보정기간은 2007년부터 2009년까지, 검증기간은 2004년부터 2006년까지로 하였다.

4.1. 수문학적 보정 및 검증

본 논문에서 유출량 보정 시 SWAT 모형에서 쓰이는 유출 관련 반응계수의 경우 대부분이 물리적 특성에 기초한 변수이기 때문에 유역의 물리적 특성이 크게 바뀌지 않는 한 반응계수 보정에 의한 유출 변화는 비교적 크지 않다. 또한 댐방류량, 대형 하수종말처리장 방류량 등의 기초자료가 정확하다면 복잡한 보정을 수행하지 않아도 양호한 유출 모의치를 얻을 수 있다. 낙동강 본류유역 구축 시 총 7개의 댐 방류량자료와 20개의 대형하수종말처리장 방류량을 모의기간 중 가용한 자료를 수집하여 월평균 자료를 일별로 입력하였다. 보정시 사용한 반응계수(RDA, 2005)는 총유출량 보정계수(ESCO), 지표면 유출보정계수(SOL_AWC), 지표하 유출보정계수(GW-REVAP, GWQMN), 갈수량 및 감쇄부 보정계수(GW-DELAY, SLSOIL) 등이다. 본 연구에서 유출량 보정시 사용된 주요 반응계수는 Table 1과 같다.

유출량 보정 및 검증 지점 중 진동수위관측소는 남



(a) divided subbasin for SWAT modeling

(b) stations for calibration and verification of flow and sediment discharge

Fig. 5. Divided subbasins and calibration and verification points in the Nakdong River watershed.

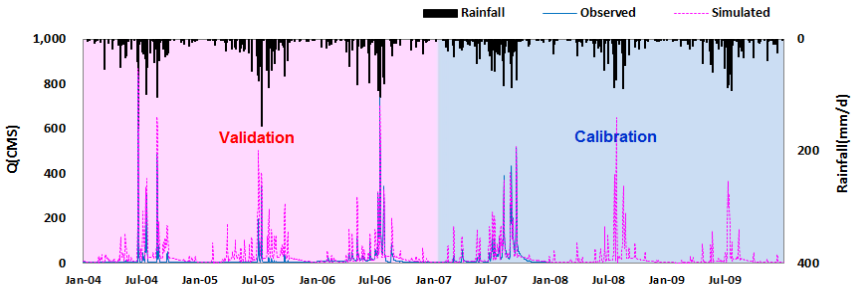
Table 1. Variable for calibration and verification of flow discharge(source : RDA, 2005)

Variable Name	Definition	Manual Range	Input File
GW_DELAY	Groundwater Delay Time	0～500	*.gw
ALPAHA_BF	Baseflow Alpha Factor	0～1	*.gw
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02～0.2	*.gw
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0～5000	*.gw
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for 'revap' to occur	0～500	*.gw
ESCO	Soil evaporation compendation factor	0.01～1.0	*.hru
CH_K(2)	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01～150	*.rte
CH_N(2)	Mannig's "n" value for the main channel	0～0.3	*.rte
CN2	SCS Curve Number	30～98	*.mgt
SOL_AWC	Available water capacity do	0～1	*.sol
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	0～2000	*.sol
MSK_CO2	Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant for low flow	0～10	*.bsn
SURLAG	Surface runoff lag time	1～24	*.bsn
SFTMP	Snowfall temperature	-5～5	*.bsn
SMTMP	Snow melt base temperature	-5～5	*.bsn
SMFMX	Melt factor for snow on June 21	1.7～6.5	*.bsn
SMFMN	Melt factor for snow on December 21	1.7～6.5	*.bsn

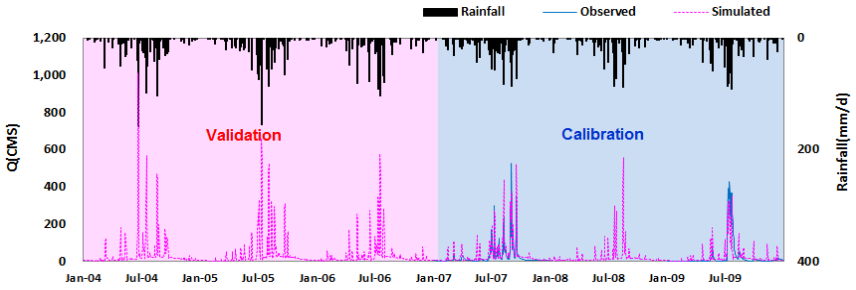
강이 합류된 직후의 낙동강 본류지점으로 수문조사연보에 2004년부터 2009년까지의 관측치가 모두 수록되어 있어 보정은 2007년부터 2009년, 검증은 2004년부터 2006년으로 수행하였다. 월포수위관측소의 경우 검증년도 중 2004년과 2005년 강우시 관측치가 다른 해에 비해 큰 차이가 있었으나 강수량과 비교했을 때 이를 더 잘 반영한 것으로 나타났으며(Fig. 6(a)), 점촌수위관측소에서는 Fig. 6(b)와 같이 자연현상을 잘 반영하고 있는 것을 알 수 있다. 왜관수위관측소는 비강우시에도 관측값과 모형의 모의값이 잘 반영되는 것으로 나타났으며(Fig. 6(c)), 진동수위관측소의 유출량은 연도별로 조금씩 차이를 보이지만 평균적으로 각각 비강우시에도 약 200 m^3/sec의 관측값을 기록하였는데 모형의 모의값에서도 이를 잘 반영하고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 6(d)).

4.2. 유사량 보정 및 검증결과

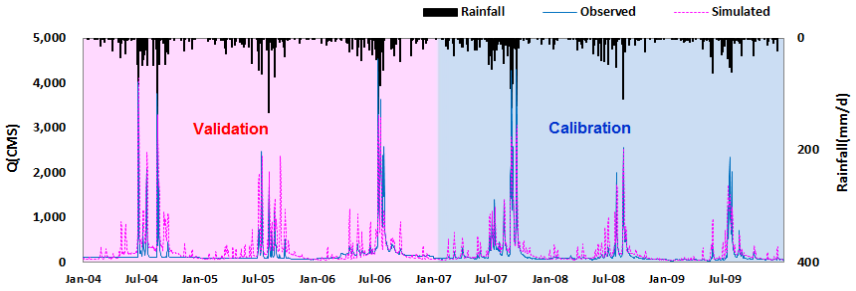
하천의 흐름에 기여하는 지표유출과 기저유출이 유출모형에 적절하게 반영되었다면, 유사량 모의 결과는 실제 측정값에 근접하게 나타난다. 유사량은 지표유출량에 크게 좌우되므로 유출량을 먼저 보정한 후 토양유실과 관련된 반응계수(ADJ_PKR, PRF, USLE_K, USLE_P)를 주로 조정하여 보정하였다. 유사량 모의를 위하여 논은 계단식, 밭은 등고선재배가 적용되는 것으로 가정하였으며, 이때의 보전관리인자 USLE_P 값은 농업과학기술원의 연구결과를 인용하여 각각 0.08과 0.54를 적용하였다. 유사량의 보정 및 검증지점은 유출량 보정 및 검증지점과 동일하며, 보정 및 검증기간은 유출량과 동일하게 수행하였다. 유사량의 보정 및 검증지점은 유출량 보정 및 검증지점과 동일하며 총 11개 지점의 수위관측소에 대해 유량



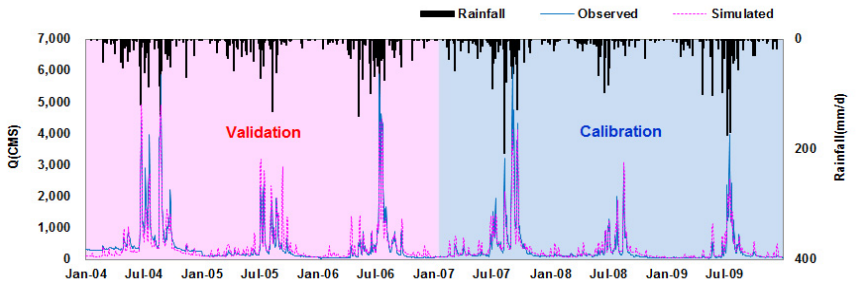
(a) Wolpo station



(b) Jeomchon station

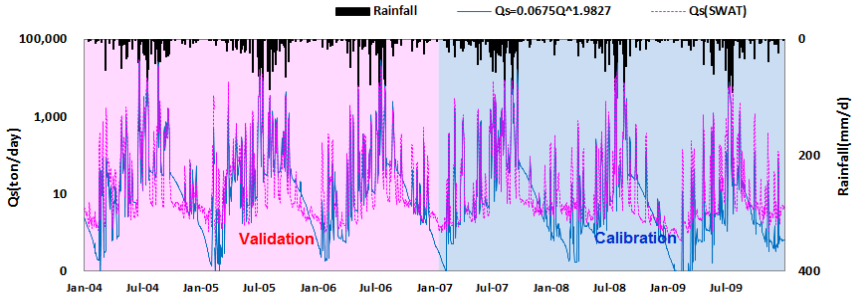


(c) Waegwan station

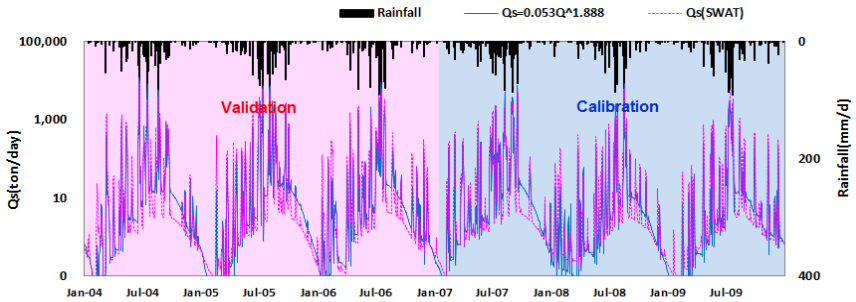


(d) Jindong station

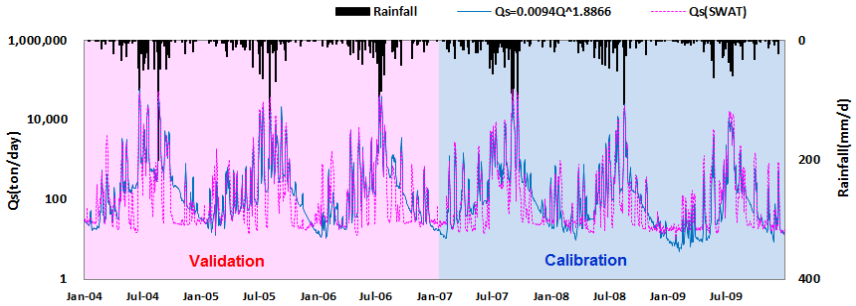
Fig. 6. Calibration and verification results of flow discharge.



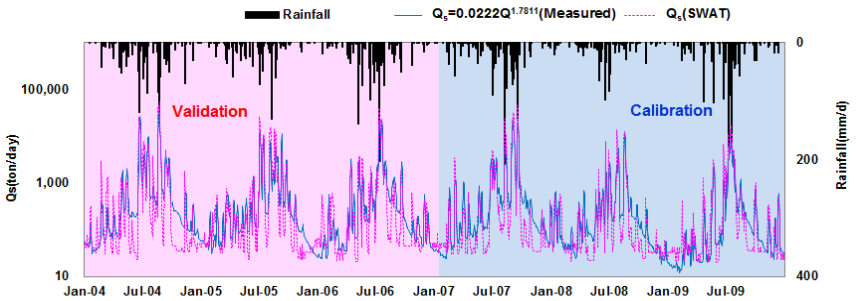
(a) Wolpo station



(b) Jeomchon station



(c) Waegwan station



(d) Jindong station

Fig. 7. Calibration and verification results of sediment discharge.

조사사업단의 유사량 측정 성과를 이용하여 유도한 유출량-유사량관계곡선식(Ministry of land infrastructure and transport, 2013)을 적용하였다.

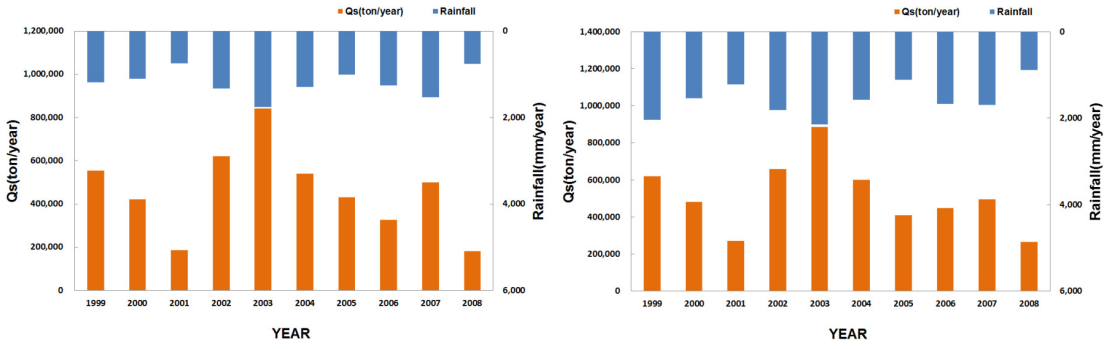
월포수위관측소의 보정 및 검증결과, R^2는 각각 0.73, 0.86(Fig. 7(a)), 점촌수위관측소는 0.78, 0.82로(Fig. 7(b)) 모의치가 해당 지점의 유출량-유사량관계곡선식을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한 낙동강 본류인 왜관수위관측소에서의 R^2는 각각 0.82, 0.8(Fig. 7(c)), 낙동강 하류에 위치한 진동수위관측소에서의 유사량 보정 및 검증 결과 R^2는 각각 0.76, 0.74로(Fig. 7(d)) 모의치가 해당 지점의 유출량-유사량관계곡선식을 잘 반영하는 것으로 나타났으며, 왜관과 진동지점의 결과값에서 지류지점에 비해 강우시 피크값에서의 모의값과 유출량-유사량관계곡선식 결과값이 가장 유사하게 나타났다(Fig. 7).

5. 장기 유역유출 유사량 분석

5.1. 유사수지 현황 분석

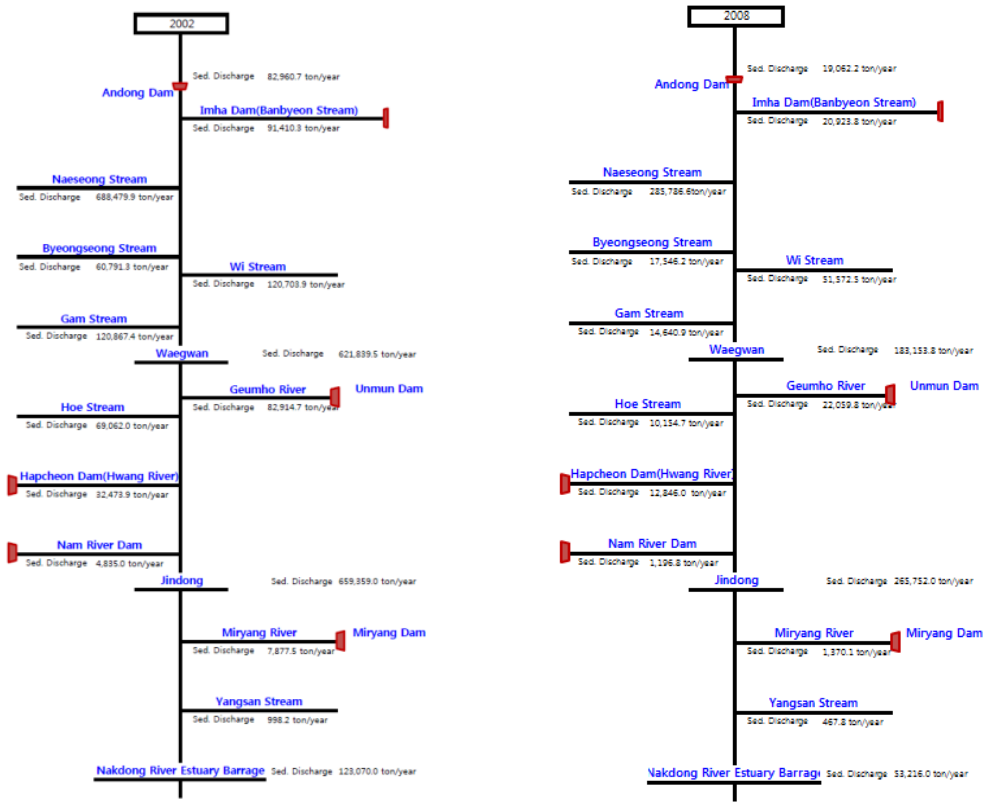
1999년부터 2008년까지 SWAT 모형의 모의 결과를 이용하여 낙동강 본류의 왜관(Fig. 8(a))과 진동지점(Fig. 8(b))에 대해 연도별 유사량과 강수량을 분석하였다. 10개년 평균 유사량을 산정한 결과 왜관지점에서 460,833 ton/year, 진동지점에서 513,600 ton/year로 나타났으며, 특히 2003년에 각각 842,272 ton/year과 884,526 ton/year으로 모의되어 가장 큰 유사량을 나타냈다. 이는 2003년 9월 12일에 우리나라를 통과한 태풍 매미의 영향으로 하루동안 321 mm의 집중호우가 내렸고, 4월에서 8월까지 월평균 340 mm 정도의 지속적인 강우로 인하여 모의기간 중 가장 많은 강수량을 보였기 때문으로 판단된다. 또한 2002년에는 8월 31일부터 9월 1일 사이에 우리나라를 관통한 태풍 루사의 영향으로 낙동강 유역에는 200 mm/day의 국지성 호우가 내렸고 연간 많은 강수량으로 인하여 왜관지점의 경우 621,839 ton/year 그리고 진동지점은 659,359 ton/year의 유사량을 보여 2003년 다음으로 크게 산정되었다.

또한 낙동강 본류(안동댐~하구언)와 11개의 주요 지류를 대상으로 Fig 9와 같은 연도별 유사수지 현황을 분석하였다. 특정년도에 따라 유사량의 규모가 다르게 나타나는 지점도 있었으나, 1999에서 2008년까지의 연평균 값을 이용하여 낙동강의 주요 지류별 유사량 규모를 산정한 결과 내성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 병성천, 황강, 밀양강, 반변천, 남강, 양산천 순으로 나타났다. 10개년 평균 유사량은 내성천 유역이 본류 중하류지점인 왜관, 진동지점보다 크게 산정되었다. 1999년에서 2008년 중 강수량이 적었던 2001년, 2006년, 2007년을 제외하고는 내성천 유역의 유사량이 본류의 진동지점 유사량보다 더 크게 산정되어 강우시 내성천 유역에서의 유사량 및 토양유실량에 대한 집중적인 관리가 필요함을 보여주었다. 낙동강하구언에서의 유사량은 진동지점의 약 20% 정도로



(a) Waegwan station (b) Jindong station

Fig. 8. Annual sediment discharge from 1999 to 2008.



(a) 2002 (b) 2008

Fig. 9. Annual sediment discharge from the tributaries at the Nakdong River watershed.

나타났는데, 이는 하구언에 의한 정체수역의 형성과 1/1,000～1/10,000 정도의 완만한 하상경사로 인하여 토사입자가 하구둑 상류에 퇴적되는 것으로 판단된다.

5.2. 유출량 및 유사량 산정 결과

본 논문에서 하도모형 구축시 입력한 총 12개 주요 지류(미천, 내성천, 영강, 병성천, 위천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 남강, 밀양강, 양산천)와 왜관, 진동 및 낙동강하구언 등 본류 3개 지점에 대하여 1999년부터 2008년까지의 분기별 유출량, 유사량 및 강수량을 분석하였다. 강우관측소별로 차이가 있으나 대체적으로 1999년부터 2008년 중 가장 많은 강수량을 기록한 2002년과 2003년에 유출량과 유사량이 가장 크게 나타났다. 이들 두 해의 유사량을 비교해 보면 전반적으로 2002년의 유사량이 크게 모의되었지만 위천, 황강 및 진동지점(Fig. 10)의 경우 지역적인 강수량 편중으로 2003년의 유사량이 더 크게 나타났다. 남강과 밀양강은 분기별 유출량과 유사량 결과값이 강수량을 잘 반영하고는 있으나, 유출량-유사량관계곡선식이 없어 검보정을 수행하지 못했기 때문에 비교적 신뢰도가 낮은 것으로 평가되었다. 또한 낙동강하구언지점은 유출량-유사량관계곡선식이 없어 본류 중 가까운 상류에 위치한 진동지점의 보정계수를 적용하여 유출량과 유사량을 산정한 결과 다른 지점들과는 다르게 1999년에 유출량과 유사량이 가장 크게 계산되었다. 이러한 이유는 이 유역의 경우 1999년의 3분기 강수량이 2002년과 2003년의 3분기 강수량보다 약 400 mm/day 더 많이 내린 영향인 것으로 판단된다.

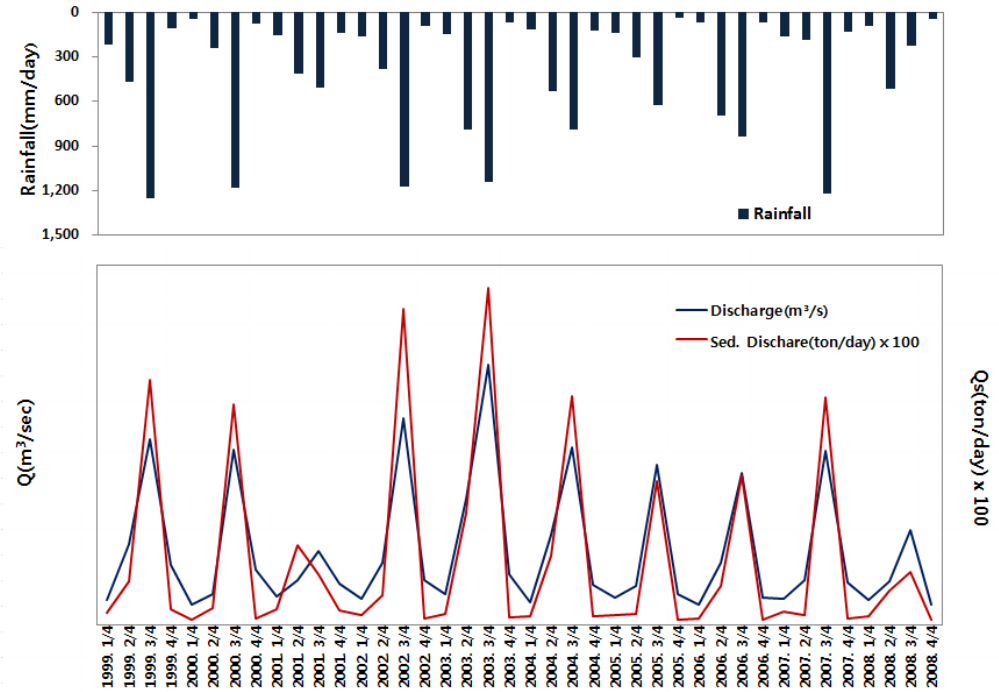


Fig. 10. Flow and sediment discharges at the Jindong station from 1999 to 2008.

6. 결 론

본 논문에서는 SWAT 모형을 이용하여 낙동강 유역의 장기간 유역유출로 인한 상류로부터 유입되는 유사량에 대한 특성을 분석하였다.

낙동강 유역의 유출량 자료와 유량-유사량 관계곡선 등을 이용하여 본류 및 지류 유출구 주요지점에 대해 검보정을 수행하였으며 수문학적 검보정 수행 결과, 진동수위관측소의 유출량은 연도별로 차이를 보이지만 평균적으로 모형의 모의값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한 유사량 검보정 수행 결과, 전체 대상 지점에 대해 측정치와 모의치의 상관계수 R^2 값이 0.73에서 0.86 범위내에 있는 것으로 나타났으며 특히 관측소 중 가장 하류에 위치한 진동수위관측소에서의 R^2 값이 각각 0.76, 0.74로 나타나 지점의 측정치를 잘 반영하였다. 왜관과 진동지점의 측정치와 모의치 상관계수 결과값이 강우시 가장 유사하게 나타났다.

검보정된 모형을 활용하여 1999년부터 2008년까지 낙동강 본류의 왜관지점과 진동지점에 대한 토양유실 및 유사량을 산정한 결과, 왜관지점에서 460,833 ton/year, 진동지점에서 513,600 ton/year로 나타났으며, 특히 2003년에 각각 842,272 ton/year과 884,526 ton/year으로 모의되어 가장 큰 유사량을 나타냈다. 또한 연도별 유사수지 현황을 분석한 결과, 1999년에서 2008년 중 강수량이 적었던 2001년, 2006년, 2007년을 제외하고는 내성천유역의 유사량이 본류의 진동지점 유사량보다 더 크게 산정되는 것으로 나타났다.

산정된 결과를 이용하여 지점별 유출량과 유사량과의 관계를 분석하였으며, 강우관측소별 혹은 지점별로 차이가 있으나 대체적으로 1999년부터 2008년 중 가장 많은 강수량을 기록한 2002년과 2003년에 유출량과 유사량이 가장 크게 나타났다. 또한 전반적으로 2002년의 유사량이 크게 모의되었지만 일부 지점에서는 지역적인 강수량 편중으로 인해 2003년의 유사량이 더 크게 산정되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Chaplot, V., 2005, Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO_3-N loads predictions, Journal of Hydrology, 312, 207-222.

Gassman, P. W., Green, C. H., Arnold, J. G., 2007, The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions, Transactions of the ASABE, 50(4), 1211-1250.

Google, 2013, http://www.maps.google.com.

Han, W. K., Yang, K. S., 2009, A runoff simulation using SWAT model depending on changes to land use in Jeju Island, Journal of the Environmental Sciences, 18(9), 1057-1063.

Hong, J. S., 2009, Effects of small watershed division on sediment runoff prediction in mountainous watershed using WEPP and SEMMA, Master Thesis, Kangnung National University, Gangwon.

Johnson, M. S., Coon, W. F., Mehta, V. K., Steenhuis, T. S., Brooks, E. S., Boll, J., 2003, Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: A comparison of HSPF and SMR, Journal of Hydrology, 284, 57-76.

Kim, N. W., Lee, J. W., Chung, I. M., Kim, J. T., 2011, Analysis of flow duration based on SWAT-K simulation for construction of natural riparian, Journal of the Environmental Sciences, 20(11), 1457-1464.

Lee, J. T., Hur, S. C., Kim, T. H., 2004, Global optimization of urban runoff model(SWMM) parameters, KSCE 2004 Convention, 737-742.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013, A study of sediment management plan for channel stable, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., 2011, Soil and water assessmet tool theoretical documentation version 2009, TR-406 2011, Texas water resources institute technical report No. 406, Texas A&M university system college station, Texas, USA.

Rural Development Administration(RDA), 2005, Assessment of soil erosion potential in Korea, Rural Development Administration.

Schilling, K. E., Jha, M. K., Zhang, Y. K., Gassman, P.W., Wolter, C.F., 2008, Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions, Water Resources Research, 44(7), 1-12.

Yang, Q., Meng, F. R., Zhao, Z., 2009, Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model, Agriculture, Ecosystems & Environment, 132(1-2), 23-31.