

낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석

Analysis of the Effect of Water Budget Elements on Flow Duration Characteristics using SWAT-Nak Dong

신 현 석* / 강 두 기** / 김 상 단***

Shin, Hyun Suk / Kang, Du Kee / Kim, Sang Dan

Abstract

In this paper, we constructed the integrated watershed model system, SWAT-Nak Dong that include areal mean precipitation, runoff and water balance components in the Nak Dong river basins and with this model system we are capable of estimating streamflows for ungaged river stations and analyzing the variations of the streamflows. SWAT(Soil and Water Assessment Tool) is a conceptual, continuous time model that was developed in the early 1990s to assist water resource managers in assessing the impact of management and climate on water supplies and non-point source pollution in watersheds and large river basins. Using the SWAT-Nak Dong system and various scenarios, we analyzed and evaluated the dams and water uses effects on the streamflows.

keywords : SWAT-Nak Dong, Water balance, Flow duration

요 지

본 연구에서는 미계측 유역의 유량 산정 및 평가를 위해 강우, 유출 및 댐 및 물이용 요소를 포함한 유역통합 수문모형(SWAT-Nak Dong)을 낙동강 전체 유역을 대상으로 구축하고, 유역내 댐방류 및 인위적인 물이용 요소를 고려한 물수지 시나리오에 따른 유황변동을 정량적으로 파악하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서 적용한 SWAT 모형은 대규모 복잡한 유역에서의 장기간에 걸친 토지관리, 기후 변화 등에 따른 수자원 및 비점오염 평가, 관리를 위해 1990년대초 개발된 연속형 장기유출 모형이다. 구축된 유역통합 수문모형과 다양한 물수지 시나리오를 이용하여 댐 및 유역내 물이용이 하천유량 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

핵심용어 : SWAT-Nak Dong, 물수지, 유황

1. 서 론

이수, 치수, 하천 환경관리, 토지이용 및 농업 관리

등 유역관리를 위해 가장 필수적인 자료는 장기간에 걸친 하천유량 자료이다. 치수목적의 하천 분류 중심의 수문관측으로 인해 지류 및 중소하천 등 미계측 유

* 부산대학교 공과대학 토목공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea
(e-mail: hsshin@pusan.ac.kr)

** 부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Doctorate Candidate, Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea
(e-mail: dookee1@naver.com)

*** 부경대학교 환경·해양대학 환경시스템공학부 조교수

Assistant Prof., Dept. of Environ. System Engrg., Pukyong National Univ., Pusan 608-737, Korea
(e-mail: skim@pknu.ac.kr)

역에 대한 유황 생성방법으로 강우량에 의한 경험식에 의한 방법, 비유량법, 수문모형에 의한 모의발생 방법 등이 있다. 그러나, 경험식에 의한 방법 및 비유량법을 이용한 방식은 유역내 강우의 시공간분포, 물수지 요소의 변동 등을 고려하지 못한다는 평가를 받아왔다(김상단 등, 2005). 또한, 상류 댐방류로 인한 하류 하천에서의 유황 개선효과, 하도 및 유역에서의 물이용으로 인한 하천 유황 변동을 정량적으로 파악하는 연구는 수자원 및 하천환경관리를 위해 필수적인 요구였다. 이에 본 연구에서는 기존의 연구들에서 통합적으로 고려되지 못하였던 유역내 강우의 시공간 분포 및 댐방류, 하도에서의 물이용, 처리장 방류수, 유역간 물이동 등의 물수지 요소 변동에 따른 영향을 통합적으로 평가할 수 있는 유역통합 수문모형을 대유역인 낙동강 전체유역을 대상으로 구축하여 장기간의 하천 유황자료를 생성하는데 일차적인 목적을 두었으며, 구축된 유역통합 수문모형을 이용하여 유역내 댐 및 물이용 요소가 하천유황에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이러한 유역단위의 모의를 위해서는 우선 유역평균강우량 산정이 필수적인데, 산술평균법, 티센법, 등우선법 등이 유역 평균강우량 산정을 위해 사용되어 왔으나 이들 방법은 점강우를 면적 강우로 환산하기 위한 방법들로 강우특성의 공간적 불균일성을 반영하기엔 부족함이 많다(김홍태 등, 2003; 윤강훈 등, 2004). 따라서, 본 연구에서는 유역내 시공간적 강우의 변동 특성을 보다 잘 반영하는 것으로 알려진 크리깅기법을 이용하여 대상유역에 대한 유역평균강우량을 산정하여 적용하였다. 또한, 물수지 시나리오에 따른 하천 유황변동의 영향을 평가하고자 물수지 시나리오를 개발, 적용하였는데, 여기에는 안동댐, 임하댐, 남강댐, 합천댐 방류량 조건을 고려한 댐시나리오와 하도에서의 물이용과 처리장 방류량, 유역간 물이동 등을 고려한 물이용 시나리오로 설정하고, 인위적 요소가 배제된 자연유량을 산정하여 변동분석의 기준으로 삼았다.

대유역에서의 수자원, 토지이용, 환경관리 등 유역관리를 위해서는 기초적인 수문 순환과정에 대한 이해와 하천-유역 규모에서의 모의 능력이 요구된다. 최근의 주된 관심은 기후변화, 건조지역의 물공급, 대규모 홍수와 토지이용 변동에 따른 영향, 하천수질 및 비점오염원 등을 고려할 수 있는 수문학적 모델 개발에 있다. 저장기능 및 연산속도의 향상 등 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 발달, GIS/지형 분석 도구의 발달은 대규모 유역의 모의를 가능하게 하였으며, 이러한 배경으로 개발된 모형 중 본 연구에서 적용한 SWAT 모형(Arnold et al., 1993)은 토지이용 변화의 영향, 농업지역 관리에 따른 하

천 유량과 유사 발생량 산정, 물공급 및 비점오염 평가등이 가능하며, 추적성분(routing components)과의 연계가 실제와 유사하게 고려되고 있는 GIS와 연계된 연속형 장기유출 모형으로 외국에서의 적용 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. Krysanova et al.(1998)은 SWAT 모형의 수문성분과 MATSALU 모델(Krysanova et al., 1989)의 영양물질 모듈을 기초로 SWIM 모델을 개발한 바 있으며, Sophocleus et al.(1999)은 SWAT 모형과 MODFLOW 모형을 연동시켜 지하수 성분 모의 기능을 개선하였다. Eckhardt et al.(2002)은 중간유출이 지배적인 중규모 유역에의 적용을 위해 SWAT-G 모형을 개발하였으며, 모형의 자동보정(Van Griensven and Bauwens, 2003), 토지이용 변동에 따른 영향 연구(Weber et al., 2001; Forer et al., 2001) 등 특정 목적 또는 지역적 문제 해결을 위한 모형의 개선 등과 관련된 연구가 수행되어 오고 있으며, 현재 미국의 환경보호국(EPA), 국립해양대기청(NOAA) 및 유럽, 아시아, 아프리카 등 다양한 지역에서 연구 및 정책적 목적으로 적용되고 있다(Arnold and Fohrer, 2005).

또한, 최근 SWAT 모형과 관련된 국내에서의 활발한 연구가 진행되고 있는데, 강문성과 박승우(2003)는 경기도 발안저수지 유역을 대상으로 SWAT 모형을 구축하여 유출량, 유사량 및 영양물질 발생량을 추정하여 오염총량관리 모듈로써의 적용성을 제시한 바 있다. 김남원 등(2004)과 김남원과 원유승(2004)은 SWAT 모형내 지하수 성분 모의기능을 개선하기 위해 완전연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형과 도시유출 해석의 단점을 개선할 수 있는 SWAT-SWMM 결합모형을 개발하는 등 다양한 분야에의 적용 및 모형의 개선 등과 관련된 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 김철결과 김남원(2004)은 국내 침엽수림의 생장 특성을 반영할 수 있도록 SWAT 모형내 식생 생상 알고리즘을 수정하여 보청천 유역을 대상으로 적용한 바 있으며, 신현석과 강두기(2006)는 SWAT 모형내 댐, 저류지, 하도저류 등 저류시설물 요소에 대한 메커니즘 및 요소 분석을 통해 모형을 개선하고 이들 저류시설물 요소에 의한 하류 장기유출 변동 영향 분석을 용담댐, 태화강, 수영강 유역 등 다양한 유역에 적용한 바 있다.

SWAT 모형 등 유역관리를 위한 모형은 대유역에서의 장기 수문순환 과정을 모의하여, 토양, 토지, 농업관리 등 유역관리를 위한 의사결정 방향을 제시하는데 있다. 이에 본 연구에서는 우선, 대유역인 낙동강 전체유역을 대상으로 가장 선차적이고, 기초적인 수문요소인 장기간의 하천 유황자료를 생성하고, 유황변동에 직접적인 영향을 미치는 댐방류, 물이용 등 물이용 시나리

오에 따른 하천유량 변동을 정량적으로 산정하는데 연구의 주안점을 두었다.

2. 연구방법

2.1 연구절차

Fig. 1은 본 연구의 절차로 우선, 기초 자료인 GIS, 강우, 관측 유량, 기상자료 및 하도구간별, 유역별 물수지 요소 등 방대한 관련 자료를 수집하고, 적용대상 강우관측소 선정 및 적용을 위한 최적강우관측망의 설계, 일강우량 수집 및 결측 보완을 통한 범용크리깅기법을 이용한 유역평균강우량을 산정하였다. 구축된 모형을 통해 산정된 모의결과를 실측 자료를 이용한 보정 및 검증 과정을 거쳐 낙동강 전체 유역내 34개 단위유역별 일유량 자료를 생성하고 각 물수지 시나리오에 따른 유량변동을 분석하였다. Table 1은 댐방류 및 물이용에 따른 하천유량 변동을 평가하기 위해 본 연구에서 개발, 적용한 모의 시나리오를 나타낸 것으로 주요댐을 고려한 댐 시나리오 및 하도에서의 취수, 처리장 방류량 등을 고려한 물이용 시나리오로 구분할 수 있다. 댐 시나리오는 안동댐(A), 임하댐(I), 합천댐(H), 남강댐(N) 각각의 방류로 인한 영향을 고려하기 위한 시나리오와 상류부의 안동댐과 임하댐(AI), 하류부의 합천댐과 남강댐(HN) 등 두개의 댐으로 인한 낙동강 본류 주요지점에서의 유량변동을 파악하기 위한 시나리오 및 4개 댐 모두를 고려한 시나리오(ALL)로 구성되며, 물이용 시나리오는 하도에서의 생활용수, 농업용수, 공업용수 취수량과 처리장 방류량 등 유역내 하도에서의 물이용을 고려한 시나리오(WB)를 물이용 및 댐방류가 없는 자연유량 상태인 BASE 시나리오와 비교하여 그 영향을 파악하기 위한 물수지 시나리오를 구성하였다.

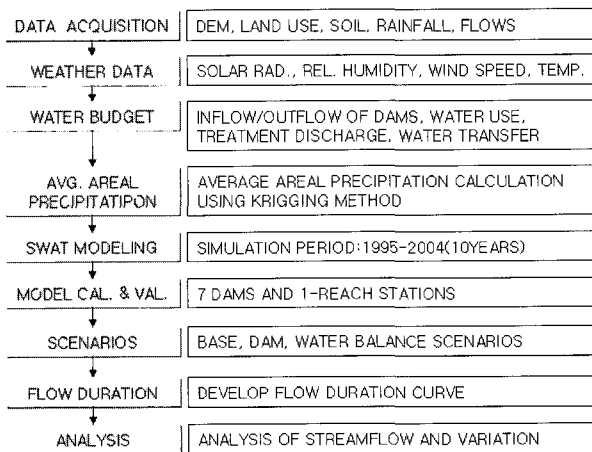


Fig. 1 Flow chart of procedures and methods used in this study

Table 1. Modeling Scenarios

SCENARIO		Considered Water Balance Elements
BASE		No Dams & No Water-uses
DAM	A	Andong Dam
	I	Imha Dam
	AI	Andong & Imha Dams
	H	Hapchun Dam
	N	Namkang Dam
	HN	Hapchun & Namkang Dams
	ALL	4 Dams all considered
WB		Water uses & Treatment discharges

2.2 SWAT 모형의 개요

본 연구에서 적용한 SWAT 모형은 미국 농무성 산하 농업연구소(ARS, Agricultural Research Service)에서 개발한 준분포형 장기유출 모형으로, 기존 CREAMS, GLEAMS, EPIC, SWRRB 모형을 개선하여 개발한 모형이다. SWAT 모형내 모의 및 수문 요소는 수문, 기상, 유사, 토양, 식생, 영양물질과 화학물질, 토지관리 등이다. 수문순환 과정은 SCS 곡선법 또는 Green-Ampt 침투방정식을 이용한 지표수유출, 토양층에서의 침투 및 침투, 지표하유출, 지하수 순환, 증발산, 하도에서의 이송손실, 저류시설물 요소 등이다(Arnold and Fohrer, 2005; Neitsch et al., 2002a, b).

3. 낙동강 SWAT 모형 구축(SWAT-Nak Dong)

3.1 개요

본 연구의 적용 대상유역은 유역면적 23,790km²인 낙동강 유역으로써 남한면적의 25.9%를 차지하고 있으며, 유로연장은 510.36km이다. SWAT 모형 구축을 위해 본 연구에서는 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 운문댐, 밀양댐, 영천댐 등 7개 댐 및 낙동강 본류 주요지점 및 제1지류를 고려하여 낙동강 전체유역을 Fig 2와 같이 34개의 단위유역으로 분할하여 토지이용도 10%, 토양도 10%를 기준으로 총 176개의 수문학적 반응단위인 HRU(Hydrologic Response Unit)를 생성하여 모의하였다. 모의 기간은 1994년~2004년의 11년을 대상으로 하였으며, 장기유출 수문모형의 안정화기를 고려하여 초기 1년은 모의 결과에서 제외하고 그 결과를 평가하였다. 또한, 하도지점은 관측자료의 신뢰도가 높은 진동지점의 일유량 자료를 이용하여 보정 후 매개변수를 유역 특성이 유사한 단위유역에 확대, 적용하였다. 본 연구에서는 댐방류 및 물이용에 따른 낙동강 주요지점에서의 유량변동 분석을 수행하였다.

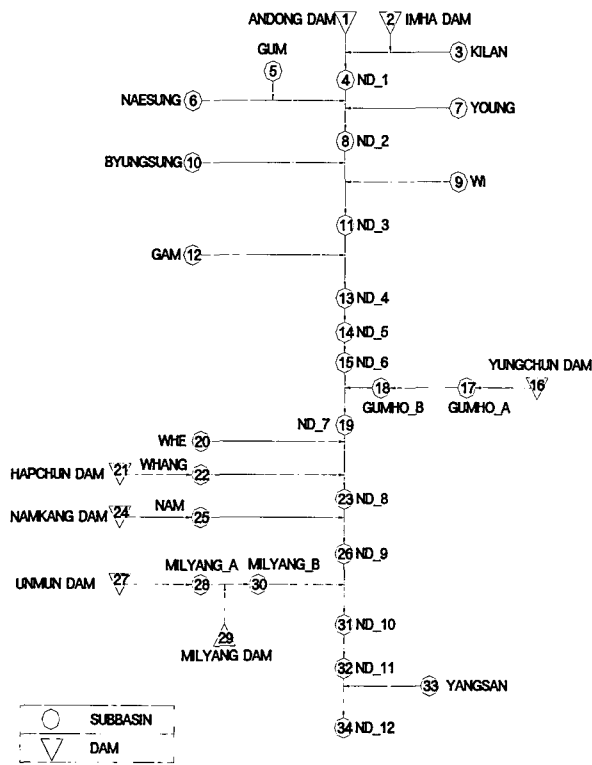


Fig. 2. Division map for subbasins of the Nak Dong river watershed

3.2 모형의 입력자료

GIS 기반의 SWAT 모형 구축을 위한 좌표계는 측량법에 명시되어 있는 TM(Traverse Mercator)으로 선정하고 좌표원점은 중부원점으로 사용하였다. DEM 생성을 위한 등고선은 국립지리원의 1:50,000 지형도를 이용하여 스캐닝 후 등고선 벡터화(Vectorizing), 표고별 등고선 고도값 부여, TIN 모형 제작, GRID 모형 제작 과정을 통해 DEM을 생성하였으며(Fig. 3(a)), 토양도는 농촌 진흥청의 1:50,000 개략 토양도를 DEM과 동일한

좌표계로 설정하고, 토양도 스캐닝 및 벡터화, 토양형에 속성부여 및 격자(Grid) 모형을 제작하여 Fig. 3(b)와 같이 적용하였으며, 환경부에서 제공하고 있는 토지피복 분류도를 이용하여 토지이용도를 구축하여 적용하였다(Fig. 3(c)). 또한, 수문 모형의 구축을 위해서는 우선 적용 강우관측망의 선정 및 유역평균 강우량의 산정 등을 포함한 강우분석 시스템의 개발이 요구된다. 본 연구에서 개발, 적용한 낙동강 유역 강우분석 시스템은 적용 강우관측망의 선정, 강우관측소 지점의 일강우량 자료 수집, 지점 범용크리깅기법을 이용한 지점별 일강우량 자료의 검·보정 및 유역평균강우량의 산정으로 구성되는데, 공간강우분석의 정밀한 수행을 위하여 낙동강 유역 전체에 대하여 격자범용크리깅(block universal krigging) 기법을 적용하여 유역평균강우량을 산정하였다. 선정된 강우관측망 지점은 상북 등 총 56개 지점이며, 모형 구축시는 일유량 모의를 위해 유역평균 일강우량을 적용하였으며, Table 2는 34개 단위유역별 10년간의 유역평균강우량을 나타내고 있다. SWAT 모형내 증발산 계산을 위한 기상자료에는 태양복사, 기온, 풍속, 상대습도 자료 등이 요구된다. Table 3은 본 연구에서 적용한 합천 등 총 21개 지점의 기상자료 입력 지점이다. 물수지 요소는 단위유역별 하천에서의 생활용수 취수량, 하수처리장 및 폐수처리장 방류량, 회귀율을 고려한 농업용수 및 공업용수 취수량 및 방류량, 영천도수로 등 유역간 물이동 등을 고려하였다. 또한, 댐상류 유역별 모의를 위해 실측 일유입량 자료 및 일방류량 자료를 수집하고 결측 자료를 보완하여 모의에 적용하였으며, 댐별 제원은 한국수자원 공사에서 제공하고 있는 실제 댐 제원을 저수지 추적 모의에 필요한 비상여수로 수표면적 및 저수지 용적, 주여수로의 수표면적 및 저수지 용량을 입력하였으며, 초기 저수량은 주여수로 용량으로 적용하였다(Table 4 참조).

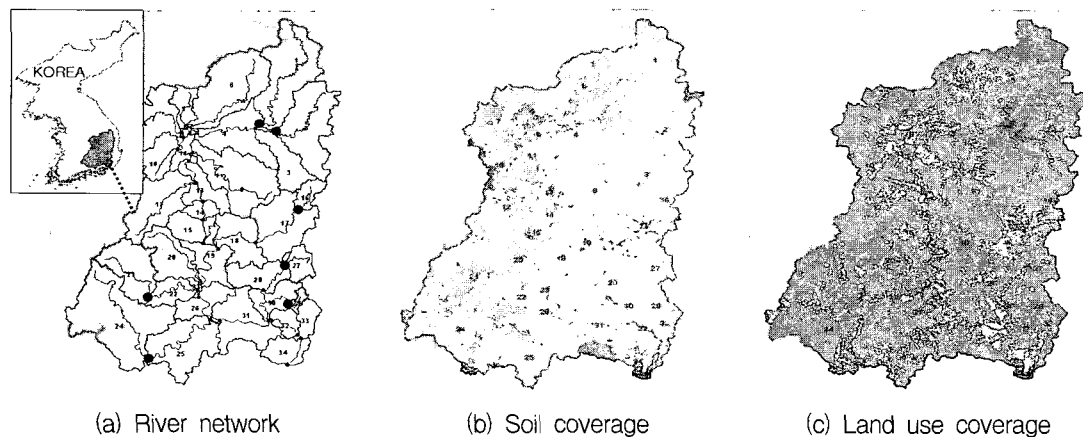


Fig. 3. Topography, river network, soil and land use coverages

Table 2. Average areal precipitations(1995-2004)

NO.	prec.(mm)	NO.	prec.(mm)	NO.	prec.(mm)	NO.	prec.(mm)
1	1208.44	10	1236.32	19	1118.07	28	1165.40
2	1070.29	11	1154.72	20	1163.69	29	1320.10
3	1039.26	12	1159.72	21	1373.46	30	1261.25
4	1105.67	13	1121.32	22	1284.79	31	1305.60
5	1199.16	14	1112.49	23	1145.38	32	1337.76
6	1262.11	15	1112.89	24	1531.55	33	1422.62
7	1282.58	16	1090.99	25	1487.59	34	1528.65
8	1149.36	17	1118.00	26	1223.37		
9	1069.65	18	1151.65	27	1120.17		

Table 3. Weather stations

NO.	Name	NO.	Name	NO.	Name
1	Hapchun	8	Pusan	15	Weosung
2	Gumi	9	Sanchung	16	Jinju
3	Namhae	10	Andong	17	Chupung
4	Daegu	11	Youngduk	18	Tongyoung
5	Masan	12	Youngju	19	Pohang
6	Mungyung	13	Youngchun	20	Geochang
7	Milyang	14	Ulsan	21	Chunyang

Table 4. Physical characteristics of reservoirs

DAM	Surface area for emergency spillway (ha)	Volume for emergency spillway (10 ⁴ m ³)	Surface area for principle spillway (ha)	Volume for principle spillway (10 ⁴ m ³)	Intial reservoir volume (10 ⁴ m ³)
ANDONG	5,800	135,800	5,150	124,800	124,800
IMHA	3,200	64,200	2,640	59,500	59,500
HAPCHUN	3,000	87,000	2,500	79,000	79,000
NAMKANG	4,200	40,000	2,820	30,920	30,920
MILYANG	220	7,360	208	6,980	6,980
YOUNGCHUN	690	9,640	582	8,140	8,140
UNMUN	783	13,534	730	12,617	12,617

3.3 모형 검증

SWAT 모형의 보정은 유출 및 유량에 대한 보정, 침투유량 및 감쇄곡선의 형태에 대한 보정, 관측자료를 이용한 상류에서 하류방향으로의 보정 과정을 통해 수행하였으며, 수문성분별 매개변수의 민감도를 분석하여 주요한 매개변수를 선정하였다. 지표면 유출과 관련된 매개변수로는 OV_N, CH_N(1), SURLAG, CH_K(1)이며, 그 적용 범위는 각각 0.01-0.1, 0.01-0.03, 1-4, 0.0-0.5이다. 증발산과 관련된 주요한 매개변수는 GIS, FRGMAX, VPDFR, ESCO이며, 그 적용 범위는 각각 0.05-1.0, 0.5-0.8, 3-6, 0.2-0.6이다. 지하수 관련 주요한 매개변수는 GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF,

REVAPMN, GW_REVAP, RCHARG_DP이며, 그 적용 범위는 각각 10-50, 10-50, 0.4-0.7, 1-10, 0.1-0.2, 0.0-0.2이다. 보정시 최근 10년간의 자료 중 갈수년인 1995년 및 1996년은 저갈수기 유량자료의 신뢰도가 낮아 제외하고 1997년~2004년의 댐별 실측 일유입량 자료를 이용하여 모의를 수행하였으며, 댐별 유입량 자료를 이용한 모형 보정을 통해 산정된 수문 성분별 요소인 총강우량, 증발량, 지표유출, 기저유출, 지하수 유출로 구분하여 Table 6과 같이 산정하였다. 또한, 하도 지점 모형 보정 기준지점은 진동지점으로 관측 수위자료를 수위-유량관계 곡선을 이용하여 유량으로 환산하여 모형의 보정을 수행하였다. SWAT 모형을 이용한 유출 모의 결과를 실측자료와의 검증 오차분석을 수행

하여 Table 7과 같이 상대첨두오차(RPE), 상대총량오차(RVE), 절대평균편차(AMB), 제곱근평균자승오차(RMSE), 상관계수(CC)로 구분하여(Tabel 5 참조) 산정하였으며, Fig. 4는 안동댐과 진동지점의 월평균 실측치와 모의결과를 비교한 결과이다. 안동댐, 임하댐, 합천댐의 경우 연유량, 월유량 자료는 상관관계가 0.84~0.97로 매우 양호한 결과를 보이고 있으나, 일유량의 경우 0.48~0.80의 상관관계를 보이고 있다. 이는 본 연구는 연 유황변동 및 수문성분 변동 분석을 위한 연구로써 평수기 이하 유량을 그 대상으로 집중적인 모형의 매개변수들을 조정한 결과로 홍수기 일유량 자료의 편차가 크게 산정된 결과로 보인다. 그리고, 실측 자료를 이용한 유황분석 결과와 SWAT 모형화를 통해 도출된 일유량 자료의 유황분석 결과를 이용한 검정오차 분석 결과 댐 지점의 경우 안동댐의 경우 상관관계가 0.59~0.91, 임하댐의 경우 0.76~0.82, 합천댐의 경우 0.68~0.91로 상당히 양호한 결과를 보이고 있음을 알 수 있

는데, 이는 수문 관측자료 중 비교적 신뢰도 및 그 정도가 높은 댐 유입량 자료를 이용한 모형의 보정이 수행되었기 때문이다. 그러나, 여기서 한가지 고려해야 할 사실은 유황자료는 일유량 자료 중 특정 1일 유량으로 그 변동 가능성이 매우 높은 특성을 가지고 있는 개념이라는 사실을 주목해야 한다. 즉, 특정 지점의 특정년의 유황자료는 연 유량 크기의 분포를 평균적으로 반영하는데 한계가 있다는 사실을 확인할 수 있다. 하도지점에 대한 검정오차 분석 결과는 진동지점은 0.65~0.76으로 비교적 양호한 결과를 보이고 있다. 본 연구에서는 낙동강 유역 전체에 대한 모형 구축시 댐유역 및 인근 유역은 댐별 모의시 도출된 매개변수를 적용하였으며, 하도지점은 진동지점의 모형 보정시 매개변수를 그리고, 각 지류의 경우는 기존의 실측 유황자료를 조사, 분석하여 적정하게 유역 특성을 반영할 수 있도록 모형의 매개변수를 적용하였다.

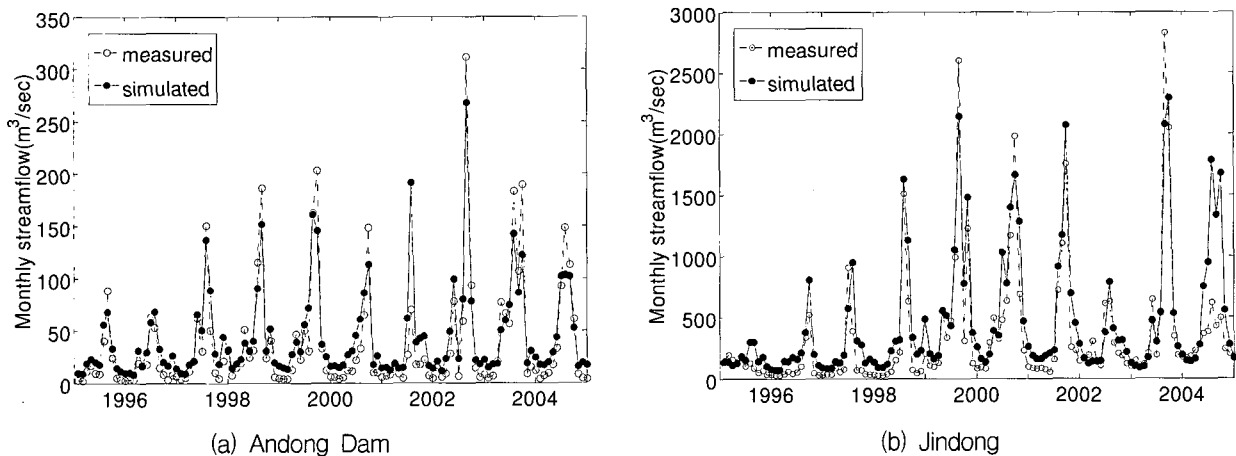


Fig. 4 Time series plot of measured and simulated monthly streamflows

Table 5. Criteria for assessment of the model performance

RPE (Relative Peak Error)	$RPE = \frac{[X_p - Y_p]}{X_p} \times 100$	X_i : observed data Y_i : estimated data $X_p = MAX(X_i)$ $Y_p = MAX(Y_i)$ $X_V = \sum_{i=1}^N X_i$ $Y_V = \sum_{i=1}^N Y_i$ N : number of data μ : mean
RVE (Relative Volume Error)	$RVE = \frac{[X_V - Y_V]}{X_V} \times 100$	
AMB (Absolute Mean Bias)	$AMB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i - Y_i \times 100$	
RMSE (Root Mean Square Error)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_i - Y_i]^2} \times 100$	
CC (Correlation Coefficient)	$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_x)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \mu_y)^2}}$	

Table 6. Hydrologic components upper dam basins

	Hyd. components	%	Yield(mm)
AN-DONG	Rainfall	100.00	1323.00
	Evaporation	39.20	521.00
	Surface flow	20.30	270.00
	Lateral flow	17.70	235.00
	Groundwater flow	22.30	297.00
	IM-HA	Rainfall	100.00
Evaporation		51.90	599.00
Surface flow		4.20	48.00
Lateral flow		11.70	135.00
Groundwater flow		30.50	352.00
HAP-CHUN	Rainfall	100.00	1492.00
	Evaporation	37.70	577.00
	Surface flow	23.40	358.00
	Lateral flow	24.40	374.00
	Groundwater flow	11.90	183.00
NAM-KANG	Rainfall	100.00	1635.50
	Evaporation	35.70	600.50
	Surface flow	34.20	576.00
	Lateral flow	14.30	240.00
	Groundwater flow	13.00	219.00
UN-MUN	Rainfall	100.00	1210.00
	Evaporation	49.80	612.00
	Surface flow	13.40	164.00
	Lateral flow	14.20	174.00
	Groundwater flow	21.20	260.00

Table 7. Statistical results for model calibration

		RPE	RVE	AMB	RMSE	CC
AN-DONG	yearly	17.38	14.63	117.13	132.01	0.97
	monthly	22.01	14.64	13.96	21.23	0.93
	daily	66.22	14.58	25.95	96.6	0.59
	Q95	41.84	40.27	11.32	13.61	0.91
	Q185	56.93	25	3.58	4.84	0.94
	Q275	2.26	10.28	1.61	1.76	0.68
	Q355	43.5	44.18	0.48	0.78	0.59
IMHA	yearly	38.39	21.67	134.32	194.25	0.96
	monthly	53.35	21.71	15.34	25.54	0.84
	daily	83.49	21.63	25.35	93.04	0.48
	Q95	31.5	107.05	14.74	17.08	0.82
	Q185	23.4	33.77	2.08	2.97	0.91
	Q275	9.15	21.65	0.69	1	0.75
	Q355	33	13.62	0.23	0.27	0.76
HAP-CHUN	yearly	19.4	4.78	110.2	141.67	0.92
	monthly	34.04	4.68	7.1	13.98	0.93
	daily	21.11	4.7	11.23	43.04	0.8
	Q95	17.21	0.49	2.82	3.52	0.91
	Q185	1.21	8.63	1.17	1.47	0.94
	Q275	0.44	13.14	1.12	1.23	0.83
	Q355	8.11	14.49	0.85	1.02	0.68
JIN-DONG	yearly	16.48	12.78	91.03	121.73	0.78
	monthly	37.31	12.78	162.2	288.51	0.84
	daily	61.31	12.83	222.66	617.44	0.7
	Q95	14.27	13.67	121.39	160.02	0.76
	Q185	16.91	15.98	53.63	63.42	0.77
	Q275	5.27	3.75	47.33	52.71	0.45
	Q355	69.79	3.56	28.97	35.03	0.65

4. 분석 결과

4.1 물수지 시나리오에 따른 유황 변동

댐시나리오에 따른 하류 하천의 유황 변동은 안동댐(A), 임하댐(I), 합천댐(H), 남강댐(N)만을 고려한 경우와 안동댐과 임하댐(AI), 합천댐과 남강댐(HN) 및 4개 댐 모두를 고려한 경우(ALL)를 자연유황 상태인 BASE 시나리오와 비교, 분석하여 Table 8의 결과를 도출하였다. 이를 살펴보면, 유량이 갈수량, 저수량, 평수량 순으로 증가할수록 댐방류로 인한 유황 변동폭은 감소됨을 알 수 있으며, 하류로 갈수록 댐방류로 인한 영향은 감소됨을 확인할 수 있다. 또한, 댐방류에 따른 하류 진동지점(ND9)에서의 저수량은 안동댐(A), 임하댐(I), 합천댐(H), 남강댐(N) 단독 방류로 인해 각각 약 32.92%, 8.73%, 15.43%, 13.19%의 증가를 나타내고 있으며, 안동댐과 임하댐(AI), 합천댐과 남강댐(HN)의 조합방류의 경우 각각 45.66%, 26.87%의 저수량 증가 효과가 있음을 알 수 있다. 그리고, 안동댐, 임하댐, 합천

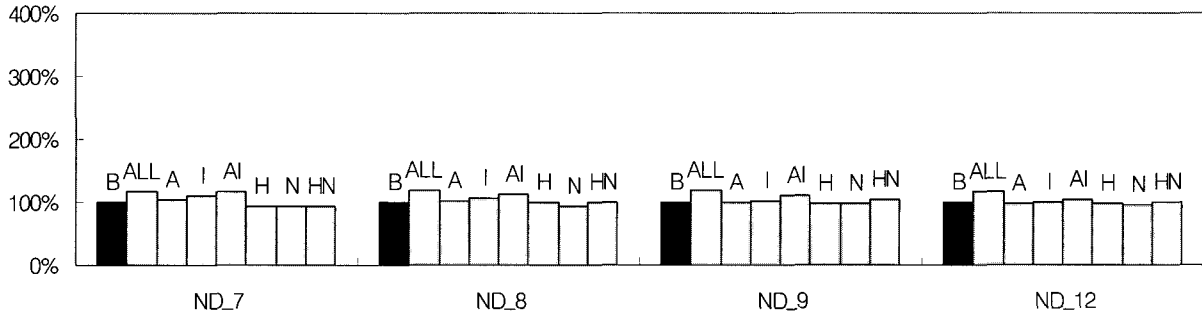
댐, 남강댐 모두 방류시는 진동지점에서의 유황은 자연 유황(BASE) 대비 평수량, 저수량, 갈수량이 각각 124.78%, 168.58%, 316.98%로 특히 저갈수기의 경우 댐 방류 효과로 인한 영향이 지배적임을 알 수 있다. Fig. 5는 ND7, ND8, ND9, ND12 지점에서의 댐시나리오별, 유황별 자연유황 대비 변동을 나타낸 것으로 유량이 적을수록 변동폭이 커짐을 알 수 있다.

그리고, 물이용에 따른 유황 변동을 정량적으로 살펴 보기 위한 물이용 시나리오 분석 결과는 Table 9와 Fig. 6과 같다. 분석 결과를 살펴보면, 물이용에 따른 유황변동은 유량이 커질수록 변동폭이 작아지고, 유량이 작을수록 그 변동폭이 커짐을 알 수 있다. 또한, 주요 하도구간별 변동을 살펴보면, ND1~ND7 구간은 물이용으로 인해 평수량, 저수량, 갈수량은 감소하고 있으며, ND7~ND10 구간은 낙동강 중류부 대구 등에서의 하천 취수 후 처리장 방류로 인해 평수량, 저수량, 갈수량 모두 증가함을 알 수 있다. 이는 처리장 방류는 연간 일정량 방류로 인해 저갈수기 유황의 증가를 유발하고

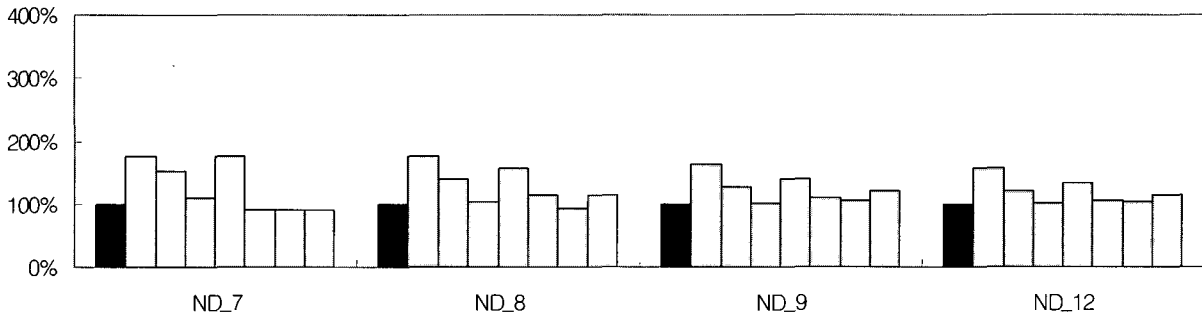
Table 8. Variations of the streamflows(Dam scenarios)(Senario/BASE, %)

	STATION	ALL	ANDONG	IMHA	ANDONG and IMHA	HAPCHUN	NAM-KANG	HAPCHUN and NAMKANG
Q185	ND_7	122.83	109.26	119.30	122.83	100.00	100.00	100.00
	ND_8	125.39	108.13	114.82	119.66	105.60	100.00	105.60
	ND_9	124.78	107.10	110.29	116.93	104.81	105.67	110.48
	ND_12	122.64	104.41	107.58	111.65	104.04	103.66	107.81
Q275	ND_7	181.86	156.59	116.59	181.86	100.00	100.00	100.00
	ND_8	181.30	143.68	111.04	162.27	118.83	100.00	118.83
	ND_9	168.58	132.92	108.73	145.66	115.43	113.19	126.87
	ND_12	162.73	126.26	109.07	138.69	111.92	111.49	121.21
Q355	ND_7	371.41	285.88	170.23	371.41	100.00	100.00	100.00
	ND_8	359.69	229.41	147.14	286.66	183.10	100.00	183.10
	ND_9	316.98	187.77	131.49	223.54	154.71	150.40	199.67
	ND_12	303.12	170.49	122.72	198.22	145.27	140.98	181.48

(a) Q185



(b) Q275



(c) Q355

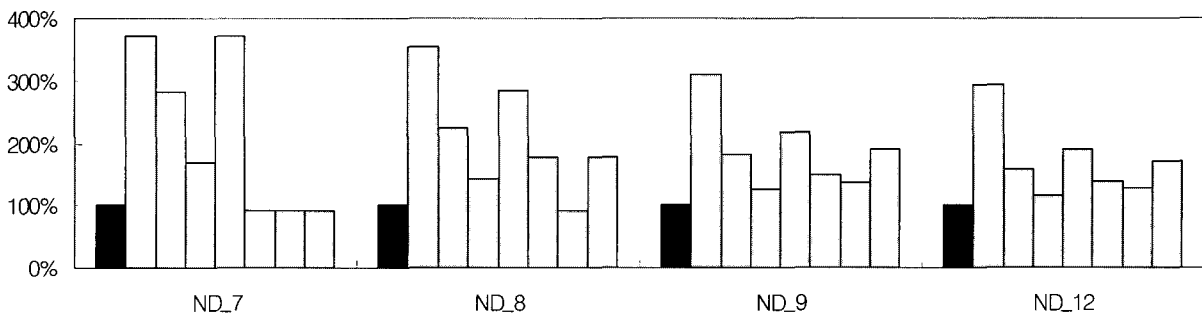


Fig. 5. Variations of the streamflows at ND7, ND8, ND9, ND12(Senario/BASE, %)

Table 9. Variations of the streamflows(Water Balance scenarios)(Senario/BASE, %)

STATION	Q185	Q275	Q355
ND_1	92.53	77.83	39.26
ND_2	96.98	89.63	46.16
ND_3	95.37	89.07	19.18
ND_4	91.27	74.68	37.96
ND_5	95.42	85.79	42.18
ND_6	86.26	57.97	23.52
ND_7	107.79	128.04	230.53
ND_8	110.63	131.70	223.50
ND_9	107.92	121.78	164.42
ND_10	107.40	118.46	156.23
ND_11	98.84	94.26	88.79
ND_12	96.40	87.06	67.07

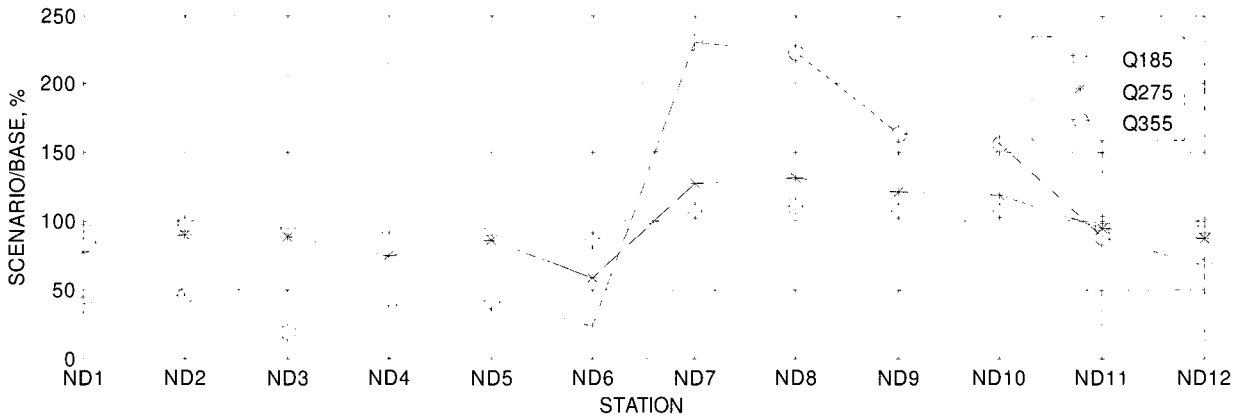


Fig. 6. Comparisons of the flow durations(1995-2004) at each stations(Water Balance scenarios) (Senario/BASE, %)

있기 때문이다. ND11~ND12 구간은 부산시에서의 생활용수 등 취수로 인해 평수량, 저수량, 갈수량이 감소함을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 자연유량(BASE), 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 등 4개댐을 동시에 방류한 경우의 유량(ALL), 물이용을 고려한 유량(WB)을 진동지점의 연도별 평균 유량을 나타낸 것이며, Fig. 8은 세가지 시나리오별 일 유량을 나타낸 것이다. Fig. 9는 물이용의 영향이 큰 대구시 상하류 지점인 중류부의 ND6, ND7과 하류부 부산, 울산 등에서의 취수 지점인 ND10, ND11 지점을 대상으로 댐 및 물이용 영향을 자연유량과 비교하기 위해 작성된 유행곡선이다. 모든 지점에서 유량이 작을수록 댐방류 및 물이용으로 인한 유행의 변동이 커짐을 확인할 수 있으며, ND6 지점의 경우 대구시의 하천수 취수로 인해 저갈수기 유량은 자연유량과 비교하여 큰폭으로 감소하고 있으나 그 외 지점에서는 일정량을 방류하는 처리장 방류 등의 영향으로 저갈수기 물이용에 따른

유량이 자연유량보다 증가하고 있다. 그러나, ND11 지점은 부산, 울산 등 하류에서의 취수 후 유역에로의 방류 등으로 자연유량과 거의 비슷해지고 있음을 알 수 있다. 또한 모든 지점에서 댐방류로 인한 저갈수기 유행 개선효과가 뚜렷하게 보이고 있다. Fig. 10은 ND6, ND7, ND11 지점에서의 댐방류 영향과 물이용으로 인한 연도별 월평균 하천유량 변동을 자연유량과 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 11은 비유량법(Specific Discharge Method)과 SWAT 모형을 이용하여 산정한 지점별 저수량(Q275)을 비교한 결과이다. 비유량법은 진동지점(ND_9)을 기준으로 강우비, 면적비를 고려하여 각 지점별 유량을 산정하였다. 안동댐과 임하댐 직하류 지점인 ND_1은 비유량법과 SWAT 모형을 이용하여 산정한 저수량이 각각 26.43m³/sec, 34.23m³/sec로 산정되었으나 안동댐, 임하댐의 실제 방류량 자료를 이용한 유행분석 결과 저수량은 각각 21.8m³/sec, 13.4m³/sec로 총 35.2m³/sec로

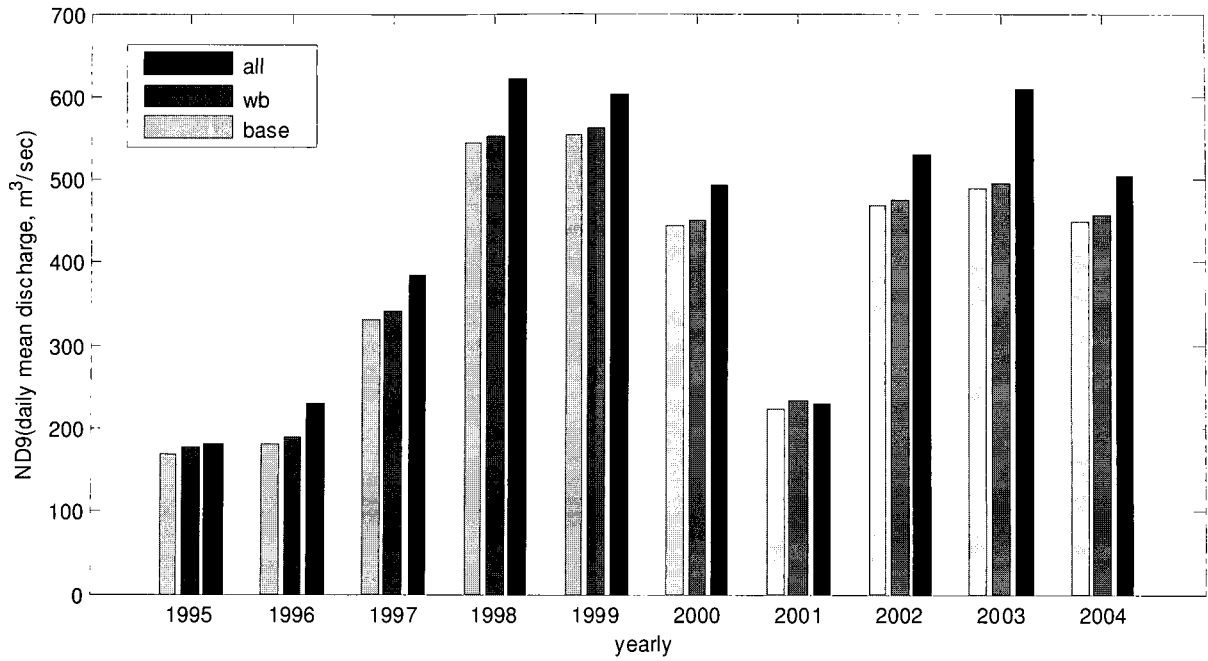


Fig. 7. Daily mean streamflows(1995-2004) at ND9 station

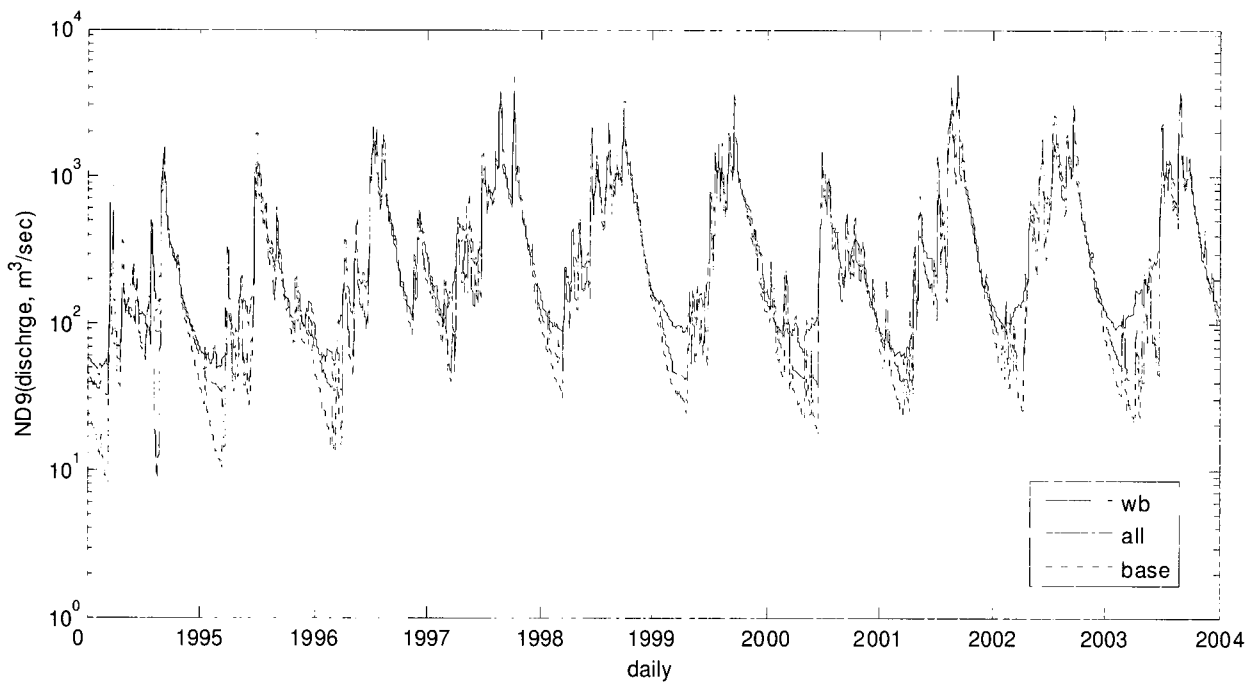


Fig. 8. Comparisons of the daily streamflows(1995-2004) at ND9 station

비유량법은 댐방류량을 반영하고 있지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, ND_6 지점 및 ND_11 지점의 경우, 각각 대구시 및 부산, 울산 지역의 생활용수, 공업용수 취수로 인한 하천 유량의 감소가 발생하고 있으나, 비유량법은 이러한 현상이 고려되지 못하고 있음을 알 수 있다. 즉, 자연하천 유역이 아닌 인위적

인 조절요소의 영향이 큰 저갈수기 하천유량 산정을 위해서는 기존의 비유량법을 이용한 미계측 유역의 유량을 산정하는데 많은 한계가 있으며, 이를 개선할 수 있는 방안으로 강우, 댐요소, 물이용 요소 및 지형 인자를 고려할 수 있는 유역모형의 적용이 요구됨을 알 수 있다.

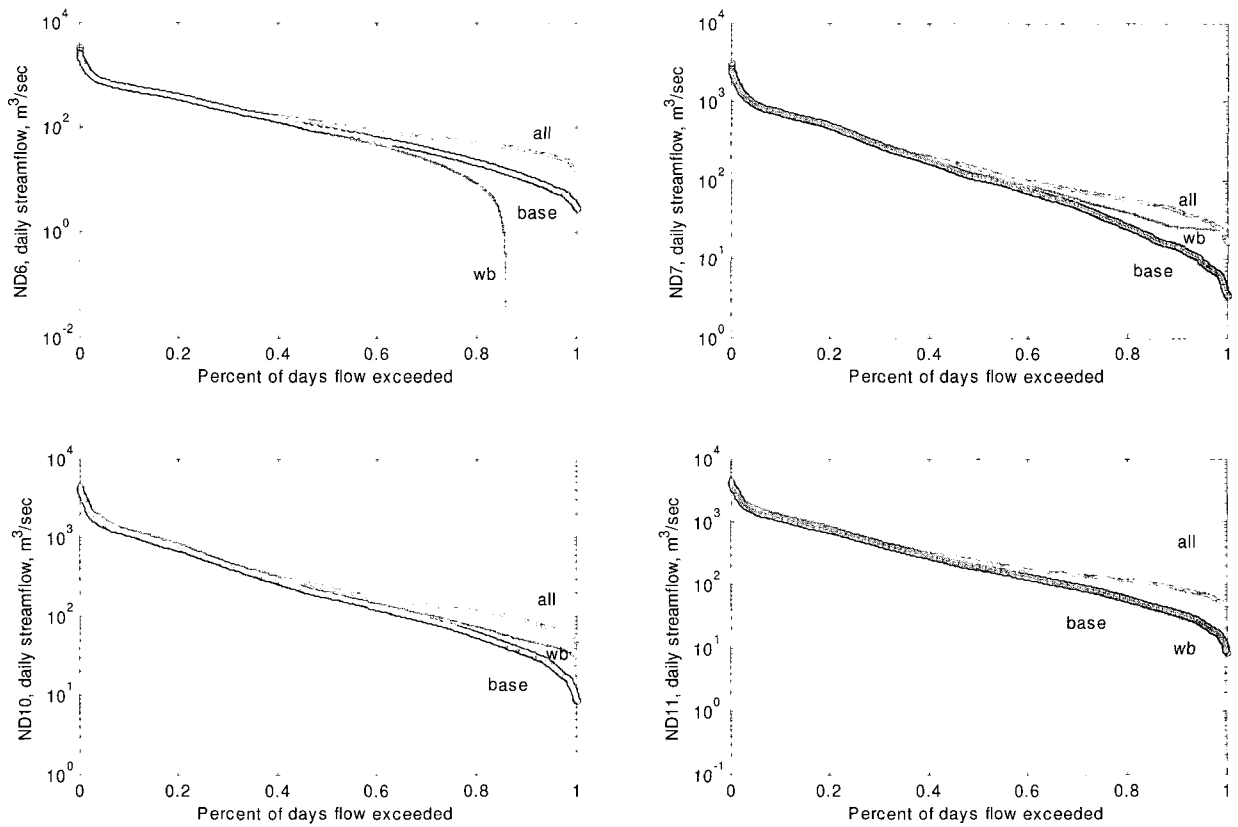


Fig. 9. Comparisons of the flow duration curve at ND6, ND7, ND10, ND11 stations

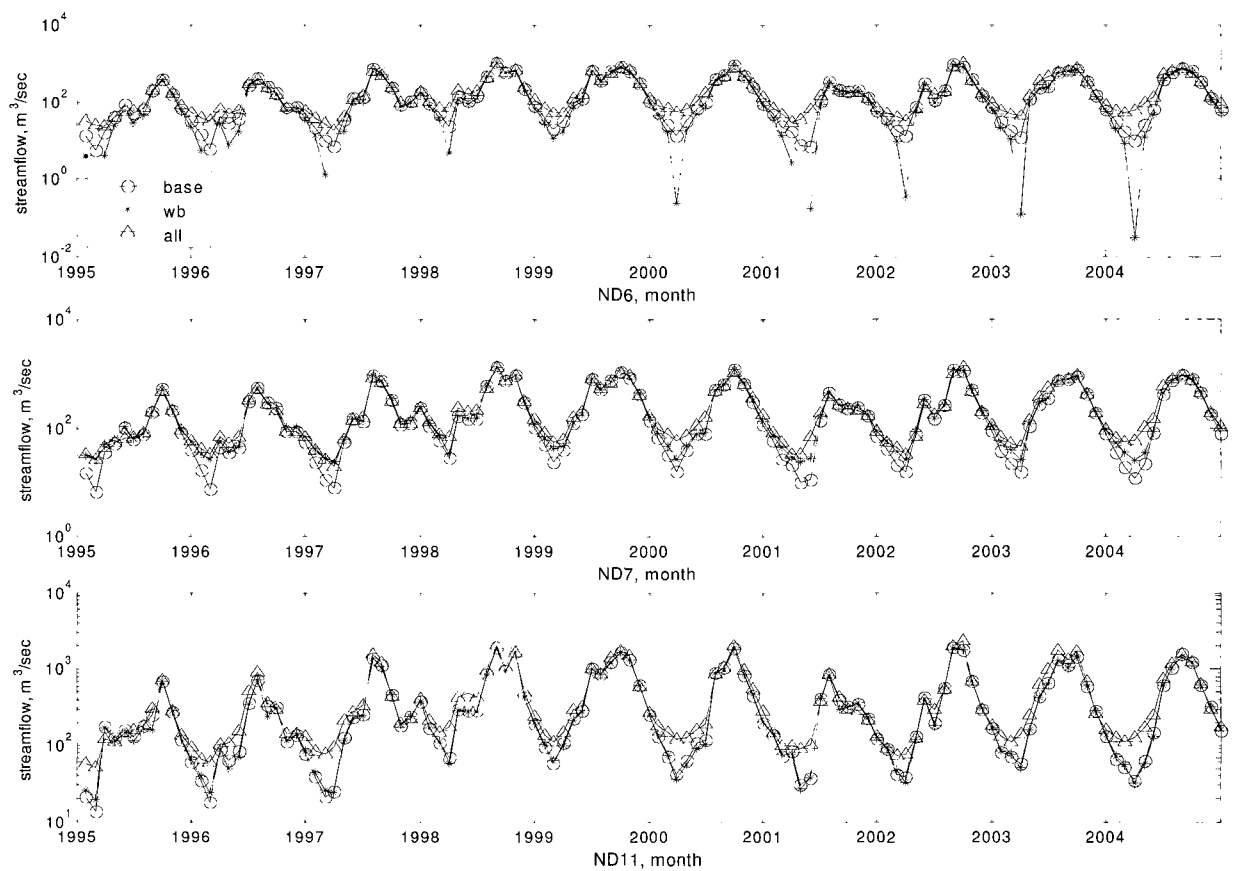


Fig. 10. Comparisons of the monthly streamflows at ND6, ND7, ND11 stations

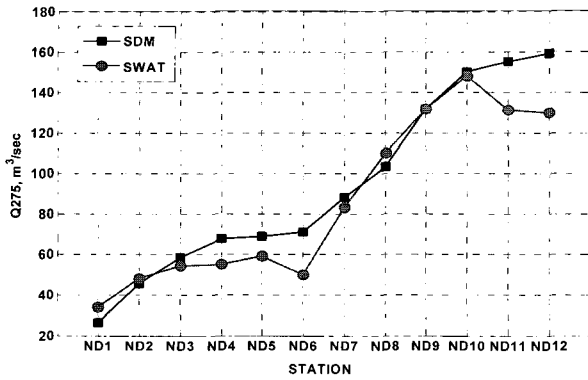


Fig. 11. Comparisons of SWAT and Specific Discharge Method(SDM) at each stations (Q275)

5. 결 론

대유역에서의 장기 수문순환 과정을 모의하여 수자원, 하천환경, 토양, 토지, 농업관리 등 유역관리를 위한 의사결정 방향을 제시하고자 본 연구에서는 강우, 유출, 물수지 요소를 고려하여 낙동강 전체유역을 대상으로 유역통합 수문모형(SWAT-Nak Dong)을 구축하고 가장 필수적인 수문요소인 장기간의 하천 유황자료를 생성하고, 유황변동에 직접적인 영향을 미치는 댐방류, 물이용 등 물이용 시나리오에 따른 하천유황변동을 정량적으로 산정하였다. 그러나, 향후 지속적인 연구를 통해 수문순환 요소별 변동, 매개변수의 최적화, 유사 및 수질 모의에의 적용 등의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 대유역인 낙동강 전체 유역을 대상으로 강우, 유출, 물수지 요소를 고려한 유역통합 수문모형(SWAT-Nak Dong)을 구축하고 실측자료를 이용한 보정과 검정을 수행하였다.
2. 상류 댐방류 효과 및 물이용으로 인한 낙동강 주요 지점에서의 유황변동을 다양한 시나리오별 모의를 통해 정량적으로 산정, 제시 하였다.
3. 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐 단독 방류로 인해 진동지점에서 자연유량 보다 32.92%, 8.73%, 15.43%, 13.19%의 저수량 증가 효과가 있으며, 상류의 안동댐과 임하댐, 하류의 합천댐과 남강댐의 조합방류로 인해서는 각각 45.66%, 26.87%의 저수량 증가 효과가 있음을 알 수 있었다. 안동댐,

임하댐, 합천댐, 남강댐의 4개 댐방류로 인한 평수량, 저수량, 갈수량은 각각 자연유량 대비 124.78%, 168.58%, 316.98%로 특히 저갈수기의 경우 댐방류의 영향 즉, 유황개선 효과는 매우 큼을 알 수 있었다.

4. 유역 및 하도에서의 물이용에 따른 유황변동은 유량이 커질수록 변동폭이 작아지고, 유량이 작을수록 변동폭이 커짐을 확인할 수 있었으며 또한, 강우비, 면적비만을 고려한 비유량법은 하천 유황변동을 적절히 고려하기에는 많은 한계점이 있음을 확인하였으며, 그 개선방안으로 강우, 물이용, 댐요소, 지형인자 등을 통합적으로 고려할 수 있는 유역기반 수문모형화 기법을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었음. 본 연구를 가능케 한 부산대학교에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강문성, 박승우 (2003). "비점원오염모형을 이용한 오염총량모의시스템의 개발 및 적용." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권 제1호. pp. 117-128.
- 김상단, 이진행, 김형수 (2005). "장기유출 수문모형을 이용한 하천수질모형의 기준유량 산정." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제21권, 제6호, pp. 575-583.
- 김홍태, 신현석, 박용운 (2003). "크리깅기법을 이용한 유역평균강수량 산정 방법에 관한 연구." **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2148-2152.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004). "완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (I) 모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제6호. pp. 499-507.
- 김남원, 원유승 (2004). "SWAT-SWMM 결합모형의 개발 (1) 모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제7호. pp. 589-598.
- 김철검, 김남원 (2004). "산림식생에 따른 유역 물수지 영향 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제9호. pp. 737-744.
- 신현석, 강두기 (2006). "SWAT모형을 이용한 인공저류 시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회지, 제39권

- 제3호. pp. 227-240.
- 윤강훈, 서봉철, 신현석 (2004). "크리깅 기법을 이용한 낙동강 유역 홍수강우의 공간해석 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제3호. pp. 233-240.
- Arnold, J.G., and Fohrer, N. (2005). "SWAT2000 : current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling." *Hydrol. Process*, Vol. 19, pp. 563-572.
- Arnold J.G., Allen P. M., and Bernhardt G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater model." *J. of Hydrology*, Vol. 142, No. 1-4. pp 47-69.
- Eckhardt K., Haverkamp S., Fohrer N., and Frede H.G. (2002). "SWAT-G a version of SWAT99-2 modified for application to low mountain range catchments." *Physical and Chemistry of the Earth, Oceans & Atmosphere*, Vol. 27, pp. 641-644.
- Fohrer N., Hverkamp S., Eckhardt K. and Frede H.G. (2001), "Hydrologic response to land use changes on the catchment scale", *Physics and Chemistry of the Earth B: Hydrology, Oceans & Atmosphere*, Vol. 26, pp. 577-582.
- Krysanova V., Becker A., and Klöcking B. (1998). "The linkage between hydrological processes and sediment transport at the river basin scale", *IAHS*, Vol 249, pp. 13-20.
- Krysanova V., Meiner A., Roosaare J., and Vasilyev A. (1989). "Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed." *Ecological Modelling*, Vol. 49, pp. 7-29.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., and Williams, J.R. (2002a). *Soil and Water Assessment Tool: User's Manual(version 2000)*, U.S. Agricultural Research Service.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, K.W.(2002b). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation(version 2000)*, U.S. Agricultural Research Service.
- Sophocleus M.A., Koelliker J.K., Govindaraju R.S., Birdie T., Ramireddygarri S.R., and Perkins S.P. (1999). "Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas." *Journal of Hydrology*, Vol. 214, pp. 179-196.
- Van Griensven A., and Bauwens W. (2003). "Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models." *Water Resources Research*, Vol. 39, pp. 1348-1356.
- Weber A., Fohrer N., and Möller D.(2001). "Longterm changes of land use in a mesoscale watershed due to socio-economic factors-effects on landscape functions." *Ecological Modelling*, Vol. 140, pp. 125-140.

(논문번호:06-105/접수:2006.10.30/심사완료:2007.02.26)