

## SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구

### The Study of the Influence on Long Term Streamflow Caused by Artificial Storage Facilities Based on SWAT Modeling Process

신 현 석\* / 강 두 기\*\*

Shin, Hyun Suk / Kang, Du Kee

#### Abstract

In the several decades, various storage facilities have been developed and operated to supply water resource, flood control or environmental preservation etc. Then, how those man-made storage facilities affect on the downstream water and environment and how the hydrologists can evaluate those features for water resources problem-solving are high-concentrated problems in this field. Most large watersheds in Korea contain various types of artificial facilities such as dams, reservoirs, in-land ponds, wetlands etc. But the study to develop the technology for achieving the effect of the variances and properties of the long term streamflow caused by the artificial storage facilities have been on the simple watershed models and experimental modeling in the real fields. In this paper, we introduce the procedure and methods to consider the above problems based on continuous and semi-distributed featured SWAT model. At the first, we describe the elements and mechanisms of storage facilities in SWAT model to see how we can apply that in proper and appropriate manner for real field problems. Then, we applied the process to a sample watershed, Taewha River basin which covers the most of Ulsan region. Specially, we concentrate on our effort to the effect of upper reservoirs on down stream long term flows based on various scenario basis. The result was described and analysed in spacial and temporal variations on that basin using the precise manner.

**keywords** : hydrological modeling, SWAT, artificial storage facilities, long term streamflow

#### 요 지

지표수의 수문순환 및 성분의 변동 영향 요소로는 강우, 증발, 토양수분 등의 자연적인 요소와 도시화 및 유역내 저류시설물 등의 인위적인 요소가 있다. 특히, 장기 유출 변동에 영향을 끼치는 인위적인 요소중 저류시설을 대표적으로 들 수 있는데, 이들 영향은 단기적으로는 유출 감쇄특성의 변화, 장기적으로는 저류량 증가에 따른 건기 계절유량의 증가, 년 유황 또는 유출 특성의 변화 등의 영향을 예측할 수 있다.

우리나라와 같은 인공 저류시설이 산재한 지역에서는 자연유량 산정용 수문 순환모형을 고려하기가 곤란하며, 이들 저류시설물의 장기유출에의 메커니즘을 규명하고, 물리적 및 추계적 분석기술을 개발하며, 실 유역에의 적용을

\* 부산대학교 공과대학 토목공학과 부교수  
Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea  
(e-mail: hsshin@pusan.ac.kr)

\*\* 부산대학교 토목공학과 박사과정  
Doctorate Course, Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea  
(e-mail: dookeel@naver.com)

통하여 저류시설물이 장기 유출 분석의 신뢰도에 어느 정도 영향을 주고 있는 지를 분석하는데 본 연구의 목적이 있다. 본 연구에서는 다양한 장기유출 모형 중 저류시설물 요소를 다양하게 모의할 수 있는 연속형 반분포형 모형인 SWAT모형을 이용하여 대화강 유역을 대상으로 유역내 저류시설물의 하류 장기유출에의 영향 분석을 다양한 시나리오를 통해 정량적인 영향 분석을 수행하였다.

**핵심용어** : 수문모형화, SWAT, 저류시설물, 장기유출

## 1. 서 론

하천 및 유역의 장기유출(long term streamflow)은 지형특성, 식생 및 토지이용, 토양특성 그리고 강우 및 증발산 등과 같은 다양한 자연적, 물리적 요소(natural factors) 및 저류시설물, 도시화 등 인위적요소(artificial factors)에 의해 지배된다. 장기유출이란, 이수 계획을 위한 일단위 이상의 순, 월 및 년 유출량을 의미하며, 이는 물수지 분석을 통한 이수 및 수자원 계획과 운영에 가장 기본적인 분석 대상이다. 이들 자연적, 인위적인 유역내 요소들은 복잡한 비선형적이고 불확실한 특성(nonlinear and uncertain properties)을 가지고 장기 유출과 연계되어 있으며, 이들의 적정한 규명은 실제로 복잡하고 난해한 문제 중의 하나이다. 장기유출에 미치는 인위적인 요소 중 저류시설물을 대표적으로 들 수 있는데, 이 저류시설로 인하여 유출의 거동특성은 달라질 수 있다. 일반적으로 유역내 저류시설이 많은 경우에는 복잡하고 다양하게 수문 순환 요소에 영향을 끼칠 수 있다. 이들 영향은 단기적으로는 유출 감쇄특성(recession properties)의 변화, 장기적으로는 저류량 증가에 따른 건기 계절 유량의 증가, 년 유황 또는 유출 특성의 변화 등의 영향을 예측할 수 있다. 우리나라와 같은 인공 저류시설물이 산재한 지역에서는 자연유량의 산정을 위하여 일반적인 자연 유역에 적용할 수 있는 수문 순환 모형을 고려하기가 곤란하며, 이들 저류시설물의 정량적인 분석 및 모형화를 위한 연구가 필수적이다.

장기 유출 모형화 기법과 관련된 연구는 방대하게 수행되어 왔으며, 특히 물리적 모형화에 집중되어 수행되어 오다가 최근에는 장기유출의 불확실성을 고려할 수 있는 추계-물리적 모형화 분석 기법이 넓게 연구되어 왔다. 특히 물리적 장기 유출 모형과 관련된 연구는 Singh(1995)에 의하여 총괄적으로 정리되고, SWM, Tank, NWS, SSARR, TOPMODEL, SWAT 등의 개략형/분포형, 사상/장기형 등의 분류에 의하여 정리되었다. 또한, 최근 이들 모형의 요소 불확실성을 고려하기 위한 추계적 모형화 기법은 Hopel et al.(1998)에 의하

여 정리되었다. 또한, 장기유출에의 저류 특성의 분석과 관련된 대표적인 연구는 Tallaksen(1995)에 의하여 수문곡선에서의 감쇄특성분석과 관련된 연구가 정리되었다. 또한, 저류 특성 분석을 요소별로 구분하여 지표수, 중간수 및 지하수 등의 수문 요소별로 구분하여 이론적으로 Griffiths and Clausen(1997)에 의하여 정의되었다. 또한, 최근 Calder et al.(1995)에 의하여 토양이용 변화에 따른 저류 특성 변동, Dunn and Mackay(1996)에 의하여 개수로에 의한 수문곡선에의 영향 등의 연구가 수행되었다. 최근 들어서는 Sophocleous et al.(1999) 및 Ramireddygar et al.(2000)의 연구에 의하여 수공구조물과 농업용수 이용 변동에 따른 장기하천 유출 및 지하수 흐름에의 영향 분석이 SWAT 또는 POTYLLDR을 이용한 지표수 모형과 MODFLOW를 이용한 지하수 모형의 연계모형화 및 Kansas지역에의 적용을 통하여 적용 모의하여, 댐과 같은 상류 저류 구조물의 하류 하천 유출에의 영향이 약 5 - 11 % 가량, 지하수 저류량에의 영향이 약 5 % 가량임을 분석하였다. 또한, 저류지의 장기 유출에의 영향은 주로 바닥의 침투 계수에 의한 영향이 지배적임을 지적하였다. 이와 같이 세계적으로도 저류 구조물의 하류 유출에의 영향 분석은 최근 갈수 및 가문 관리, 수자원 관리, 그리고 하류 생태 및 환경에의 영향의 초기 수문 분석으로 중요성이 인식되고 활발히 연구되고 있다.

국내에서는 종합적인 저류시설물의 장기 하천 유출 변동에의 영향과 관련된 연구는 전무한 실정이다. 이와 같은 종합적인 연구보다는 주로 수자원 계획을 위한 실무적인 장기 강우-유출 모형화 연구(김현준, 정성원, 1993; 김태철 등, 1996; 이관수 등, 1995) 등이 폭넓게 수행되었으며, 이때 검토된 모형은 가지야마 공식에서부터 SSARR 모형등 다양하다. 또한, GIS 및 위성정보를 이용하여 댐건설 전후의 자연환경 변화에 관한 연구가 NWS-PC 모형을 기반으로하는 저수지의 운영 효과 및 기타 하류 하천 유출을 고려한 연구가 수행되기도 하였다(한국수자원공사, 1997).

본 연구의 목적은 이러한 복잡, 다양한 저류시설물의 장기 하천 유출에의 영향 분석을 위하여 다양한 요소

중 용수공급량 변동, 저류지 바다 수리전도도에 따른 영향 및 하천 유지용수 공급에 따른 영향 분석을 정량적으로 수행하기 위한 기법 및 방향을 제시하고 실유역에의 적용을 통하여 검증하는 데 있다. 이를 수행하기 위하여 본 연구에서는 최근 세계적으로 특히 수문 영향 분석 및 수자원 운영을 위하여 널리 사용되어지고 있으며 또한 수문 GIS 및 물수지 조절 요소 등의 요소를 포함하고 있는 반분포형 수문 모형인 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)에 대한 인공저류시설요소에 대한 분석을 수행하였으며, 적용 방향을 제시하였다. 모형에 대한 이론, 적용 등의 자세한 사항은 다양하게 참고할 수 있을 것이며(Neitsch et al., 2002a, b), 여기에서는 인공저류 요소부분에 대해서만 축약하여 정리하였다. 다음, 개발된 기법을 울산시 대부분을 차지하고 있는 태화강 유역에 적용하였다. 이 유역은 상류의 자연유역과 사연댐, 대암댐 등의 다양한 저류시설물을 포함하고 있으며, 그리고 하류는 70% 이상 유역이 극도로 도시화된 유역이며 해양과 접하고 있는 복합 중규모 유역이다. 본 적용에서는 특히 상류에 위치하고 있는 저수지들의 하류의 장기 유출변동 특성에의 영향을 모의하였으며, 적절한 비교를 위하여 저수가 없는 상태의 가상의 기본 시나리오와 저수지운영, 저류바닥 침투 효과, 그리고 하류 하천유지용수방류 등의 요소를 고려하여 구축한 다양한 시나리오에 따른 영향을 분석하였다.

## 2. SWAT 모형내 저류 메커니즘 및 요소 분석

본 연구에서 선정된 모형은 미국 농무성 농업연구소의 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)이며, 이 모형은 확정론적 반분포형 연속형 장기유출 모의 수문 모형으로, 기존에 국외에서도 다양한 수자원 및 토지이용 변동 모의를 위한 연구에 사용되어 왔다. 특히 최근에 국내에서도 김현준 등(2003)과 장철희 등(2003)에 의해 장기유출 분석 연구에 기초적으로 적용된 바 있으며, 지하수(김남원 등, 2004; 이도훈, 허준, 2003) 및 기상(이현 등, 1999) 등 다양한 분야에서의 연구가 활발하게 수행되고 있다. 본 연구에서는 모형의 기본 구조 및 저류시설물과 관련된 메커니즘 분석 결과를 축약하여 설명하고 있다.

수문 영향 분석 및 인공 저류시설 영향 분석을 위하여 SWAT 모형은 다른 모형들과 비교하여 여러 가지 장점들을 가지고 있다. 우선, 반분산형 모형으로서 토지 이용도, 토양도 및 기타 지형 자료 관련되어 GIS기법과

연계되어 있으며, 이를 적절하게 유역내의 수문반응소 구역(HRU, hydrological response unit)를 고려할 수 있도록 구성되어 있다. 더불어, SWAT 모형은 다양한 저류시설물 요소(storage facility element)들을 모의할 수 있다는 장점이 있으며, 지하수 모듈 및 수질 모듈과 연계되어 있으며, 물수지 분석을 위한 유역관리(watershed management) 기능이 다른 모형 보다 구체적으로 모형화될 수 있다. Fig. 1은 SWAT 모형에서 각 수문 요소들의 물수지 순환 개념을 보여주고 있다(Ramireddygari et al., 2000). 특이할 점은 모든 지형요소 및 조절 변수들이 수문 GIS기법에 의하여 구현되어지며, 유역내 저류지(pond)를 개괄적인 모의를 통해 고려할 수 있으며, 그림에서는 묘사가 되어 있지 않으나 저수지 운영, 유역전이, 취수, 회귀수, 농업용수, 도시 유출, 수질 및 유사 모의 등의 수자원 관리 요소가 모형을 통하여 고려할 수 있도록 약 215개의 부프로그램으로 구성되어있다.

본 연구에서는 유역내의 저류시설물의 하류유출에의 영향을 분석하기 위한 목적으로 SWAT 모형의 저류시설물 관련 메커니즘을 분석, 정리하였다. SWAT 모형내에서 고려될 수 있는 주요 저류시설물 요소들은 Fig. 2와 같이 크게 저수지(reservoir) 요소, 유역내 저류 및 습지(pond and wetland) 요소, 그리고 하도저류(bank storage) 요소, 그리고 유역 요면저류(depression storage) 요소 등의 4가지로 구분될 수 있다. 이들 요소들은 모형내에서 정량적이기 보다는 저류 및 운동방정식에 의하여 개괄적으로 고려되어 지기는 하지만 HRU 및 수문추적과 연계되어 효과적으로 상류의 저류효과를 모의할 수 있다. 특히 저수지요소는 상류의 자연 및 인공 저수지의 조절 효과 및 바닥에서의 침투효과를 통한 하류 장기유출 영향을 분석할 수 있으며, 이와 분리되어 유역내 저류지 및 습지 요소는 유역내 소규모 농업 저수지 및 자연습지 등의 요소에 의한 영향 메커니즘을 고려할 수 있다. 또한 유역 요면저류 요소는 도시 및 농경지에서 강우시 단기간에 발생하거나 인위적인 물사용의 효과를 수문학적 손실효과로 고려된다. 마지막으로 하도 저류요소는 하상으로부터 하천수의 손실을 의미하며, 이는 최근 우리나라에서도 낙동강 등의 여러 유역에서 적용되고 있는 강변저류 및 여과수의 물수지 요소로의 고려를 가능하게 하는 부분이다. 물론, 상기의 요소들이 서로 물리적으로 완벽한 메커니즘을 가지고 구동되어지기는 상당히 난해한 수문학적인 문제이며, 아직도 연구가 활발히 진행되고 있는 분야이다. 그러나 비록 독립적이거나 연계되어 있기는 하나, 이와 같은 요소들의 하류유출에의 영향은 물리적으로 상존하며,

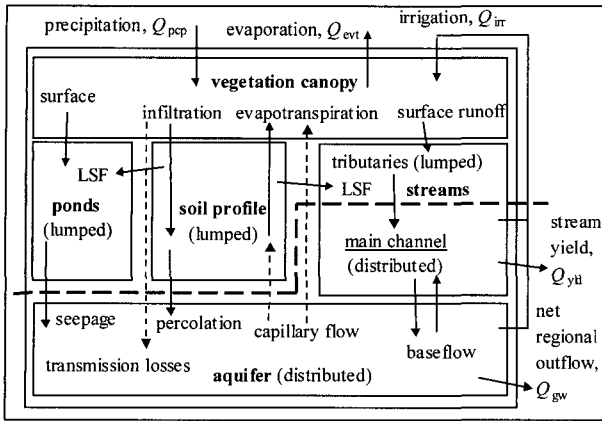


Fig. 1. Schematic block diagram of hydrological cycle in SWAT

이에 대한 영향을 분리개념으로 하나의 유역시스템 내에서 모의하는 것은 의미있는 수문학적인 시도일 것이다. 이러한 분석시도는 이전에는 수문학적 의미 (hydrological sense)보다는 계획방향성(planning direction)을 위하여 여러 개략화 모형(Tank 모형 등)에 의하여 시도되어 다소 물리적인 의미를 상실하거나 요소들의 민감도를 가미할 수 없는 목적 중심의 모의가 될 수 있었다.

앞에서 설명한 SWAT 모형 및 저류요소들의 물수지 메커니즘을 개략적으로 정리하면 다음과 같다. 우선, SWAT 모형에서의 유역내 수문학적 물수지는 Eq. (1)과 같이 표현된다. 이때 침투 요소는 GIS 분석자료와 연계되어 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 제공하고 있으며, 더불어 수정된 합리식을 이용하여 침투유출율을 산정하며, 지표 유출 지체 (surface runoff lag) 및 운송손실(transmission loss)도 고려할 수 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_t$ 는 최종 토양 수분함유량,  $SW_0$ 는 초기 토양 수분함유량,  $t$ 는 시간,  $R_{day}$ 는 강우량,  $Q_{surf}$ 는 지표면 유출량,  $E_a$ 는 증발산량,  $w_{seep}$ 는 토양층의 침투량,  $Q_{gw}$ 는 하천으로의 회귀수량이다. 하도에 내에서의 모의는 Manning식을 이용하여 유속과 유량은 산정하며, 하도유출은 Kinematic wave 모형의 변형형태인 변동저류추적법 또는 Muskingum 하도추적법을 이용한다. 임의 하도구간에서의 하도저류량 산정을 위한 물수지 산정은 Eq. (2)와 같이 표현된다.

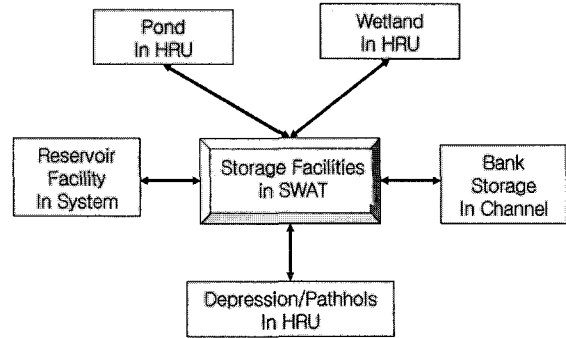


Fig. 2. Storage facilities analysis in SWAT

$$V_{stored,2} = V_{stored,1} + V_{in} - V_{out} - loss - E_{ch} + div + V_{bnk} \quad (2)$$

여기서,  $V_{stored,2}$ 는 종점에서의 하도저류량,  $V_{stored,1}$ 는 시점에서의 하도 저류량,  $V_{in}$ 은 유입량,  $V_{out}$ 는 유출량,  $loss$ 는 운송손실량,  $E_{ch}$  하도에서의 증발량,  $div$ 는 하도의 분기수량,  $V_{bnk}$ 는 하도제방저류(bank storage) 요소를 의미한다. 이중  $V_{bnk}$ 가 인위적인 제방 및 하천내 저류요소의 하나로 고려될 수 있다.

실제로 SWAT에서 고려하고 있는 저류시설물 요소로서는 동시에 저수지, 소유역내 저류/습지, 그리고 유역내 요면, 지호 등이 있을 수 있으며, 각 저류 요소들은 다음 Eq. (3)과 같이 일반적인 물수지 방정식으로 표현된다.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (3)$$

여기서,  $V$ 는 저류량,  $V_{stored}$ 는 초기 저류량,  $V_{flowin}$ 는 유입량,  $V_{flowout}$ 는 유출량,  $V_{pcp}$ 는 강수량,  $V_{evap}$ 는 증발량,  $V_{seep}$ 는 저류지 바닥에서 침투로 인한 손실량이다. 여기서 특히, 본 연구에서 적용되는 저수지 바닥을 통해 침투로 손실된 물의 양은 다음과 같이 계산된다.

$$V_{seep} = 240 \cdot K_{sat} \cdot SA \quad (4)$$

여기서,  $K_{sat}$ 는 저수지 바닥의 유효 포화수리전도도 (mm/hr) 그리고  $SA$ 는 저수지의 수표면적(ha)이다.

이와 같은 저류요소들의 차이는 저수지 방류 방식에 있으며, 저수지인 경우의 유출량 또는 방류량은 관측

일유량법, 관측 월유량법, 비조절 저수지에 대한 평균 연방류율 법, 조절 저수지에 대한 목표 방류량법 등의 4 가지 방식에 의하여 조절된다. 본 연구에서는 저수지의 단순 하류영향 효과를 보기 위하여 저수지가 저수용량을 초과한 경우의 월류를 허용하는 비조절저수지법과 하류의 하천 유지용수 공급을 모의하기 위한 조절 목표 방류법을 사용하였다. 또한, 유역내 저류지 및 습지, 그리고 요면 및 지호에서의 유역내에서의 유출 메커니즘 등의 각 기법에 대한 상세한 설명은 문헌(Neitsch et al., 2002a, b)을 참고할 수 있다.

더불어 본 연구에서는 SWAT모형에서 제공되는 원시 프로그램에 대한 약 65개의 부프로그램으로 구성되는 인공 저류시설물요소 부분을 분석하였으며, Fig. 3은 저류시설물 관련 프로그램 계통도를 보여주고 있다. 저류 시설물과 관련된 각 요소들의 이론적인 부분, 입력 매개변수, 출력 매개변수들의 분석이 수행되었으며, 각각의 매개변수의 적정한 한계치 및 국내여건과 적합한

값들을 다양한 참고 문헌들을 통하여 조사 정리하여 수문모형화 과정에서 고려하였다. 특히, 저류시설물 중 가장 큰 비중을 차지하는 인공저수지(reservoir) 요소는 기존의 SWAT 내의 운영 및 적용 방식이 국내 저수지 여건과는 어느 정도 상이함을 발견하였으며, 실유역의 장기유출 수문모의 모형화를 통한 저류시설물의 영향을 연구하기 위하여 프로그램을 수정하였으며, 특히 저수지의 SOAD(Storage-Outflow-Area-Depth) 제원 사양의 입력을 사수위, 저수위, 만수위, 제한수위, 홍수위, 이상홍수위로 구분하여 적용할 수 있게 하였으며, 하류의 유지용수 방류 및 발전 방류 요소를 고려할 수 있도록 수정하였다. Fig. 4는 이러한 프로그램 개선을 위한 저수지 관련 부분을 일반연관부분, 직접연관부분, 그리고 신설삽입부분으로 나누어 보여주고 있다. 이러한 도표는 차후 연구자들의 SWAT 모형의 저류시설물 관련 연구시 각각의 목적에 부합하는 프로그램 개선 및 변경을 위하여 유익한 자료가 될 수 있을 것이다.

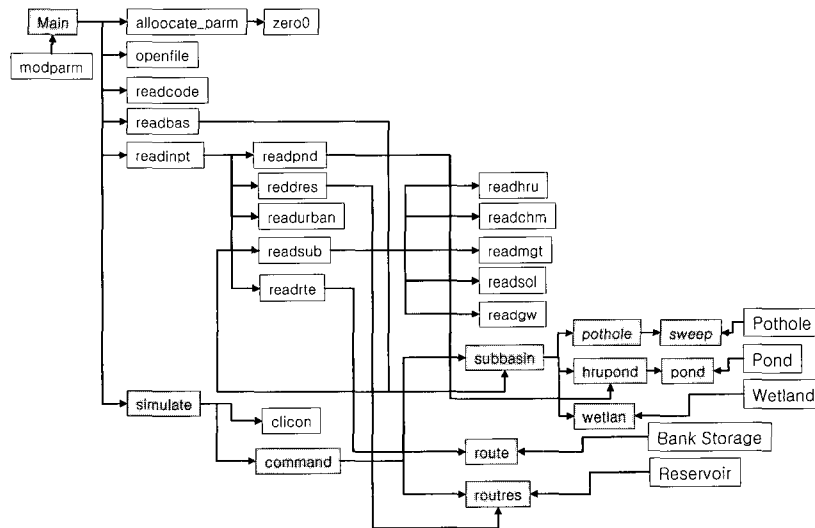


Fig. 3. Code analysis for storage facilities in SWAT

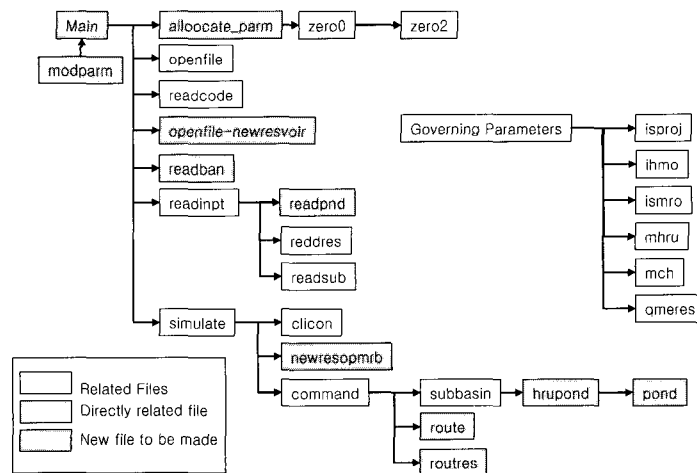


Fig. 4. Code analysis for user-defined reservoir type

### 3. 울산 태화강 유역에의 적용 및 결과

#### 3.1 대상유역의 개황

본 연구에서 선정된 대상유역은 경상남도 울산시에 위치하는 태화강 유역으로 유역내 고밀도 시가지지역, 농업지역, 산림지역 등이 복합된 유역으로서, 대암댐, 사연댐 및 현재 입지에정인 대곡댐, 그리고 농업용 저수지, 습지 등 저류시설물이 다양하게 존재하고 있는 복합된 중규모 유역이다. 태화강 유역은 유역면적 458.8 km<sup>2</sup>, 유역 평균경사 0.168m/m이며, 태화강 수계의 하천 현황은 지방2급 하천 57개, 지방1급 하천 1개, 국가하천 1개 등 총 59개의 하천으로 구성되어 있으며, 총 하천 연장은 309.12km이다. 이 유역의 토지이용 현황은 Fig. 5의 GIS 토지이용 분석도에서 볼 수 있듯이 약 도시지역 7%, 산림지역 67% 및 농업지역이 26%를 차지하고 있는 지역이다. 또한, 이 지역은 겨울철 대륙성 특성을 가지면서도, 하절기에는 잦은 태풍의 내습 및 해수에 영향을 받는 해양성 기후 특성의 양면을 가지고 있다.

#### 3.2 SWAT 모형의 구축 및 보정

SWAT 모형의 구축을 위하여 수문 GIS자료 수집 및

분석이 수행되었으며, 일반적으로 유역 기반 자료인 DEM(Digital Elevation Model) 구축, 하천망도의 구축, 토지이용 및 토양도의 구축 과정과 유출 모의를 위한 수문자료의 입력, 저류시설 요소의 입력 과정으로 수행되었다. 우선적으로 대상지역의 좌표계는 측량법에 명시되어 있는 TM(Transverse Mercator)으로 선정하고 좌표원점은 중부원점을 이용하였다. DEM 생성을 위한 등고선은 국립지리원의 1:50,000 지형도를 스캐닝 후 2차원 CAD상에서 작성된 등고선 레이어를 3차원 CAD 파일로 전환하고, GIS TOOL의 지형분석 도구를 이용하여 델타니 삼각망을 이용하여 불규칙 삼각망을 형성한 후 DEM으로 변환하였다. 유역의 하천망도 구축은 유역구분, 유역면적, 유로연장, 유역경사등의 지형특성 자료의 산정을 위해 필수적인 절차로 구축은 30m 간격의 DEM을 이용하여 흐름방향격자(flow direction grid)와 흐름누가격자(flow accumulation grid) 산출, 한계값 지정을 통한 기초하천망 구축을 수행한 후 하천요소를 링크별로 구분하고 출구점을 지정하여 유역의 분할 및 각 유역에서의 유역 및 하천 특성 분석을 수행하였다. 이때 태화강 유역을 수문학적인 특성과 지역적인 특성을 감안하여 16개의 소유역으로 분할하였다. 또한, 대상

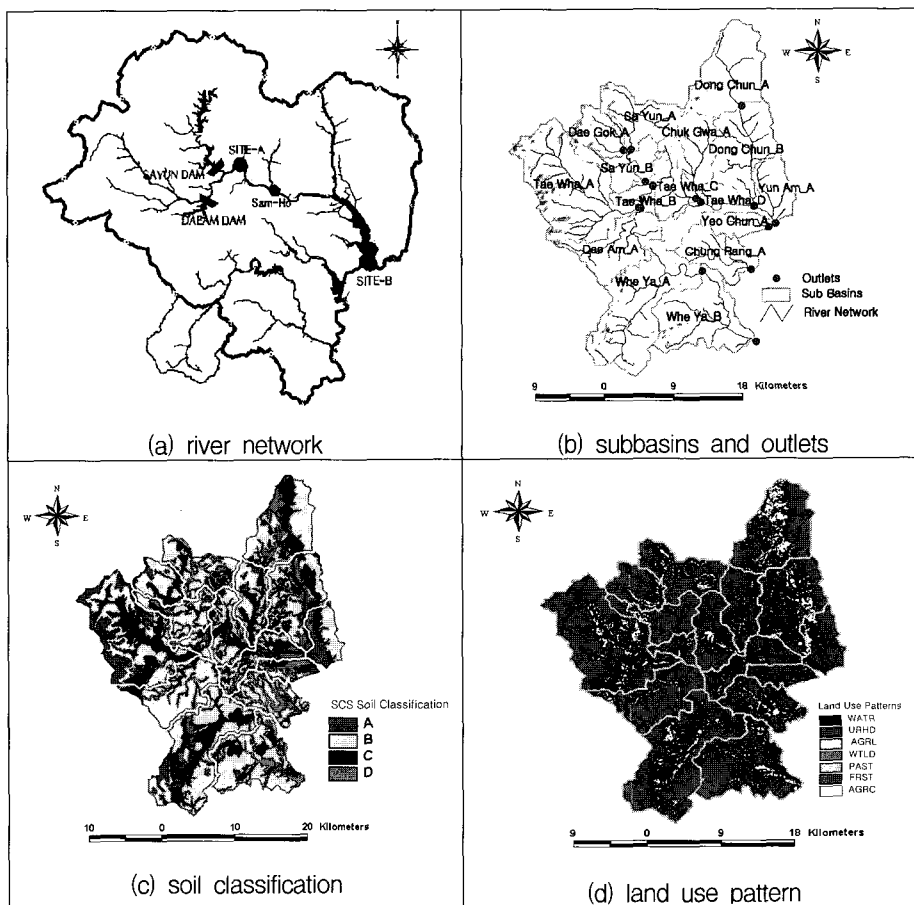


Fig. 5. Taehwa River watershed

유역의 토양도의 구축은 농촌 진흥청 식물환경 연구소의 1:50,000 개략 토양도를 이용하여 구축하였으며, 토지이용도는 환경부에서 제공한 자료를 이용하여 좌표변환 후 대상 유역에 적용하였다. 이상과 같은 수문 GIS 분석 결과는 Fig. 5와 같으며, (a) 태화강 하천망도 및 주요지점, (b) DEM 및 유역분할도, (c) 토양도, 그리고 (d) 토지이용도의 분석 결과를 보여주고 있으며, 또한 Table 1은 태화강 및 각소유역에 대한 수문 GIS 분석 결과를 보여주고 있으며, 유역면적, 하도길이와 더불어 각 소유역에 대한 CN값 산정 결과를 표시하고 있다.

모형에 필요한 기상 자료는 1931년부터 관측을 시작한 울산관측소의 기온, 풍속 및 일조시간 등의 자료를 사용하였다. 태화강 수계 내에는 건교부 관할 7개소, 기상청 관할 1개소, 수자원공사 관할 2개소 등의 강우관측소가 운영되고 있다. 본 연구에서는 자료의 일관성을 위하여 건교부 홍수통제소에서 관할하는 유역내의 척과, 호계, 금곡, 궁근정, 순금, 울산 등 6개소의 시간 및 일강우 자료를 사용하였다. 또한, 각 강우 자료는 범용 Kriging 기법에 의하여 격자 강우 분석이 수행되었으

며, 또한 유역평균강우량 자료를 생성하여 기초자료 분석의 정확성을 기하였다. 태화강 유역내에는 울산, 병영, 조동, 삼호 등의 4개의 수위관측소가 운영되고 있으며, 이들 중에서 모형의 보정 및 적용에 비교적 유리하며, 자료의 신뢰성을 확보할 수 있고, 하류의 조수의 영향을 받지 않는 삼호교 지점의 2000년3월~2003년7월까지의 일유량 자료를 이용하여 수행하였다. 마지막으로, 구축된 태화강 SWAT 모형에는 태화강 상류역의 사연댐 및 대암댐의 저수지 요소를 고려하였으며, 이들 저수지는 실제운영이 아닌 결정된 시나리오별 운영이 가능할 수 있도록 프로그램이 개선되었으며, 또한 입력변수들이 지정되었다. 다음 Table 2는 저수지 모의에 필요한 사연댐 및 대암댐의 제원을 나타내고 있다.

구축된 모형의 보정을 위하여 기준에 설치, 운영되고 있는 관측소 중 비교적 양호한 관측 자료를 보유하고 있으며, 저류시설물의 영향을 반영할 수 있고, 하류의 배수영향 및 조수의 영향이 없는 지점을 검토한 결과, 태화강 삼호교 지점이 타당한 것으로 검토되었다. 보정을 위한 자료의 기간은 2000년 3월~2003년 7월 까지였

Table 1. Analysis of Taehwa watershed and river configurations

Subbasin Name	Area (km <sup>2</sup> )	Reach Length (km)	A/L(km)	A/L <sup>2</sup>	CN	
					AMC-II	AMC-III
Yeon Am_A	33.8	13.66	2.47	0.181	74	87
Chung Ryang_A	45.7	14.26	3.20	0.225	72	86
Whe Ya_B	88.8	19.63	4.52	0.231	67	82
Dong Chun_A	82.9	18.24	4.54	0.249	69	84
Dae Gok_A	32.1	9.62	3.33	0.347	67	82
Sa Yeon_A	50.5	16.37	3.08	0.189	67	82
Sa Yeon_B	36.5	15.50	2.35	0.152	66	82
Tae Wha_B	14.7	8.27	1.78	0.216	67	82
Dae Am_A	62.0	18.43	3.36	0.182	63	80
Tae Wha_A	135.9	23.20	5.86	0.253	74	87
Whe Ya_A	124.5	29.67	4.19	0.141	69	84
Dong Chun_B	75.5	18.32	4.12	0.225	72	86
Tae Wha_D	39.0	17.52	2.22	0.127	76	88
Chuk Gua_A	42.0	15.96	2.63	0.165	66	82
Tae Wha_C	41.1	14.30	2.87	0.201	68	83
Yeo Chun_A	20.8	10.55	1.97	0.187	82	91
Total	458.8	45.188	10.154	0.225	69	84

Table 2. Physical characteristics of reservoirs in Taehwa watershed

	Drainage Area (km <sup>2</sup> )	Flood Water Level (EL(+),m)	Normal Water Level (EL(+),m)	Low Water Level (EL(+),m)	Total Storage Capacity (m <sup>3</sup> )	Effective Storage Capacity (m <sup>3</sup> )	Surface Area (km <sup>2</sup> )	Yearly Water Supply (m <sup>3</sup> )
Sa Yeon	124.5	63.2	60.2	45.0	25,000,000	20,000,000	1.72	36,500,000
Dae Am	77.0	51.9	48.5	44.5	9,500,000	5,000,000	1.50	18,250,000

으며, 이 기간 동안의 일단위의 강우 및 수위, 유출 자료가 사용되었다. 이때, 모형의 검증은 실제 삼호교 지점의 관측유량이 자연유량이 아닌 상류댐 또는 구조물에 의한 조절유량이라는 점을 감안하여, 사연댐 및 대암댐의 일방류량 자료를 직접 보정에 사용하였다. 구축된 SWAT 모형의 보정 절차는 우선, 크게 세단계 즉, 유출 및 유량에 대한 보정, 침투유량 및 감쇄곡선의 형태에 대한 보정, 관측자료를 이용한 상류에서 하류방향으로의 보정 절차를 통해 수행하였다. 우선, 지표면 유출에 대한 보정을 토양 수분함유량(SOL\_AWC) 및 토양에서의 증발량 관련 입력변수(ESCO)를 조정하여 수행하였다. 다음 단계로 지표면 유출에 대한 보정을 수행한 후 기저유출에 대한 보정을 위하여 지하수 유출과 관련된 입력변수(GW\_REVAP, REVAPMN, GWQMN 등)의 조정 과정을 수행하였다. 침투유량과 감쇄곡선의 형태에 대한 보정에서는 하도 수리전도도(CH\_K) 및 운송손실(TLOSS)을 고려하였으며, 마지막으로 관측자료를 이용하여 상류지점에서 하류지점의 방향으로 보정을 수행하였다. 이때, 상류에서 이미 보정된 변수들은 하류의 보정시 변경하지 않고 수행하였다. 모형의 보정결과는 Fig. 6 (a)와 (b)는 실측값과 모의값의 각각 일유량 수문곡선 및 월유량 수문곡선을 보여 주고 있으며, Table 3에서는 실측값과 모의값을 이용하여 RPE(relative peak error), RVE(relative volume error), RMSE(root mean

square error), AMB (absolute mean bias) 그리고 CC(correlation coefficient) 등의 분석값들의 산정결과를 일자료와 월자료를 각각 풍수기(6월-9월) 그리고 갈수기(10월-5월)로 분리하여 제시하였다. 계절별로는 대체로 갈수기의 오차값이 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 저갈수기 관측자료의 문제점 및 모의과정에서 지표유출(surface flow)과 기저유출(base-flow) 분리 과정에서 오는 불확실성의 영향으로 판단된다. 그러나, 일유량 및 월유량 전체적인 상관계수는 0.90 이상으로 비교적 양호한 결과를 보이고 있다.

### 3.3 저류시설물 영향 분석 시나리오

본 연구에서는 유역내 저류시설물의 하천 장기유출 변동에 대한 영향을 무차원화하기 위하여 우선 BASE 시나리오를 선정하고 다양한 모의 시나리오를 비교하여 상류 저류요소에 따른 하류의 유출 증감을 상대 비교 후 무차원양으로 산정, 제시하였다. 이때 상기에서는 SWAT모형 내의 다양한 인공 저류시설 요소, 즉 저수지, 유역내 저류지, 그리고 하도저류 등의 다양한 요소들의 메커니즘을 제시하였으나, 본 연구에서는 이중 제시된 SWAT 모형내 다양한 인공 저류시설 요소 중에서 (1) 저수지로부터의 용수공급량의 변동에 따른 영향(저수지 운영 영향), (2) 저수지 바닥으로부터의 저수량의 변동 및 하류 유량변동에의 영향을 보기 위한 저수

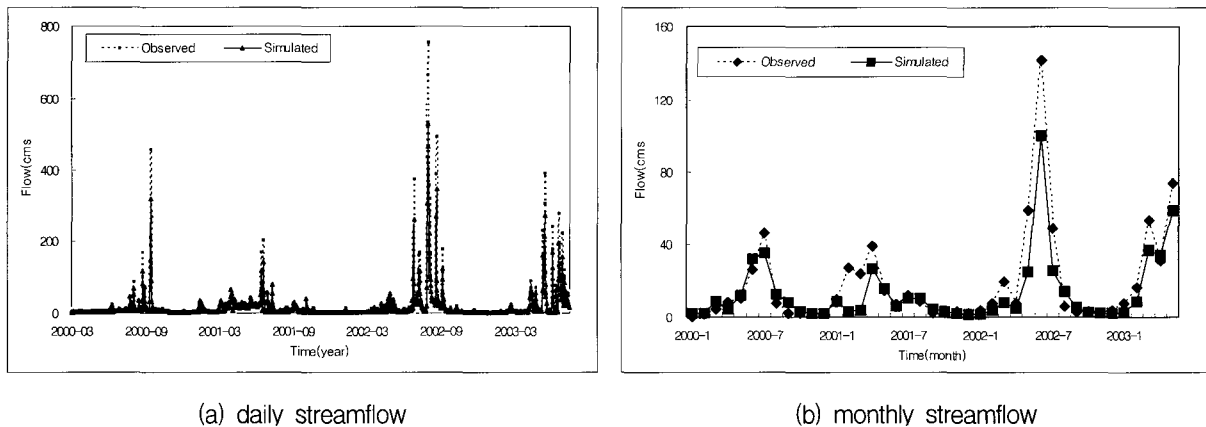


Fig. 6. Comparisons of daily and monthly observed and simulated average daily discharge at Sam-Ho(2000.3-2003.7)

Table 3. Statistical results for model calibration

	Daily Streamflow			Monthly Streamflow		
	Rainy Season (June-Sep)	Dry Season (Oct.-May)	Mean	Rainy Season (June-Sep)	Dry Season (Oct.-May)	Mean
Absolute Mean Bias	14.46	8.00	6.92	11.31	4.78	7.01
Root Mean Square Error	40.21	10.16	24.92	16.93	7.75	11.72
Corrrelation Coefficient	0.93	0.88	0.90	0.96	0.76	0.95



지 수리전도도가 미치는 영향, 그리고 (3) 저수지로부터 하류로의 하천유지용수 방류량의 영향 등의 문제를 중점적으로 반영하여 검토하였다.

본 연구의 대상유역인 태화강 유역에서의 저류시설 물에 의한 장기유출 영향 검토를 위한 BASE 시나리오는 유역 내에 저수지 또는 저류지가 존재하지 않는 가상의 상태로 가정하였으며, 하도저류에 영향을 미치는 하도에서의 침투계수도 고려하지 않았다. 이는 물리적으로 유역의 인위적인 저류시설물에 의한 영향을 배제한 상황으로, 수자원 운영시 물수지 분석시 자연유량의 개념과 동일하다고 볼 수 있으며, 과거의 자료 중심 또는 Tank 모형과 같은 매개변수 모형을 통하여 모의하는 것보다 유역의 지형, 기상 및 수문 순환을 합리적으로 고려할 수 있는 시도라고 볼 수 있다. 이때 구축된 SWAT모형의 기상, 유역 및 하도 관련 매개변수들은 검정을 통하여 구축된 자료를 사용하였다. 이는 비록 개발 이전의 자연 상태와는 상이할 수 있으나 토지 이용을 제외하면 유역의 대부분이 산악유역이며 또한, 자연 수문상황을 오차 범위 이내에서 반영할 수 있을 것이라는 가정하에서 유의하다고 판단되었다. 또한, 저류시설물의 요소를 통한 하류 유출의 변동에 대한 민감도를 검토하는 것이 본 연구의 취지인 바, 동일 매개변수를 사용하여야 한다고 판단하였다.

모의 기간은 1991년 1월부터 1999년 12월까지의 9년간을 모의기간으로 선정하였으며, 앞에서 언급하였듯이 기상 자료는 울산관측소 자료를 강우 자료는 6개의 유역내 강우관측소별 일강우량 자료를 범용 Kriging에 의한 공간 및 시간 강우분석 결과를 적용하여 입력하였다. 참고적으로 연도별 강우자료는 Fig. 7과 같으며, 그림에서 볼 수 있듯이 1994년부터 1996년 간의 갈수년을 포함하고 있으며 또한 기타 년도는 비교적 풍수년 기간으로서 모의결과가 이들 두 기간의 저류시설물의 영향을 공히 고려할 수 있도록 하였다. 또한, 모의에서 고려된 태화강 상류의 사연댐 및 대암댐의 저류 특성 관련 제원은 한국수자원공사의 자료를 이용하였으며 Table 4와 같다.

위에서 언급한 저수지의 저류요소의 하류 유량변동에의 영향을 고려하기 위한 시나리오를 Table 5와 같이 정의하였다. 사연댐 및 대암댐은 울산시의 생공용수 공급을 위한 댐으로서 저수지로부터의 용수공급량의 변동은 하류의 유출에 직접적인 영향을 끼칠 수 있으며, 또한 기존의 연구에서는 고려한 경우가 없으나 실제로 증발과 같은 기상적인 요인에 의한 저수량의 변동 뿐만 아니라 저수지 바닥으로부터의 저수량의 변동에 따른 하류 유량에의 변동을 고려하고자 하였다. 또한, 최근

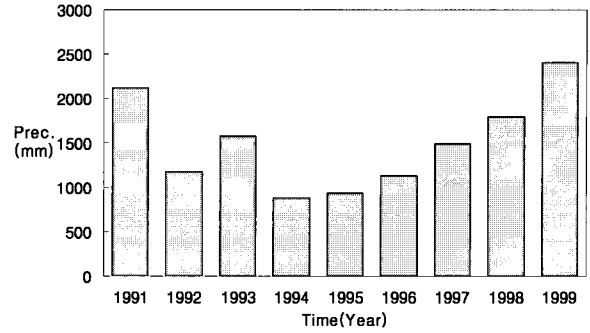


Fig. 7. Mean areal rainfall

Table 4. Physical characteristics of reservoirs for modelling

	Sa Yeon	Dae Am
Reservoir surface area at emergency spillway(ha)	2,400	2,000
Volume of water at emergency spillway( $10^4 m^3$ )	3,500	1,200
Reservoir surface area at principal spillway(ha)	1,720	1,500
Volume of water at principal spillway( $10^4 m^3$ )	2,500	950
Initial reservoir volume ( $10^4 m^3$ )	2,500	950

Table 5. Reservoir scenarios

	Descriptions	
BASE	No artificial storage facilities	
R11	Water use(cms)	Sa Yeon=0.0, Dae Am=0.0
R12		Sa Yeon=5.0, Dae Am=2.5
R13		Sa Yeon=7.0, Dae Am=3.0
R14		Sa Yeon=10.0, Dae Am=5.0
R15		Sa Yeon=20.0, Dae Am=10.0
R16		Sa Yeon=30.0, Dae Am=15.0
R21	Hydraulic conductivity of the reservoir bottom(mm/hr)	K=0.10
R22		K=0.50
R33		K=1.00
R31	River maintenance flow(cms)	Sa Yeon=0.5, Dae Am=0.5
R32		Sa Yeon=1.0, Dae Am=1.0
R33		Sa Yeon=2.0, Dae Am=2.0

태화강 하류의 친자연적 하천 조성 및 유지용수의 필요성이 중요시 되는 바, 실제로 두 댐으로부터의 절대 하천유지용수 공급량의 변동에 따른 영향을 고려하였다. 또한, 하류 장기간(월 또는 년) 유량의 하천 구간에 따른 영향을 검토하기 위하여 두 댐이 합류하는 직하류 지점(SITE-A, 척과천 상류)과 유역 하단 (SITE-B, 태화교 지점)에서의 유량 변동을 동시에 분석하여 공간적인 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 더불어 시간적인

민감도를 분석하기 위하여 연변동, 월변동 및 계절 변동의 요소를 모두 고려하고자 하였으며, 이는 장래 수자원 계획에서 수문모형에 의한 불확실성 및 오차에 따른 대응 방안을 마련을 위한 기초적인 연구가 될 수 있도록 하였다.

### 3.4 모의 분석 결과

본 연구에서는 앞 절에서 제시한 시나리오별 댐직하류 지점(SITE-A)과 유역의 최하류 지점(SITE-B)에서의 연도별 평균유출량, 월별 평균유출량 산정 결과를 BASE 시나리오와의 상대적인 증감 비율로 비교하였다. 용수공급량 변동에 따른 영향분석, 저수지바닥 침투계수에 따른 영향분석 및 하천유지용수공급에 따른 영향분석 결과는 다음과 같다.

용수공급량 변동에 따른 댐 직하류 지점과 유역의 하구 지점에서의 유출 변동 특성을 산정한 결과는 Fig. 8과 같으며, 각각 연유출 변동 및 월유출 변동을 보여주고 있고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이때 시나리오 R11은 두 댐으로부터의 용수공급량이 없는 경우를, R14는 실제 계획 용수공급량 (사연댐 10m<sup>3</sup>/sec, 대암댐 5m<sup>3</sup>/sec) 시나리오를 의미하고 R11에서 R16로 가면서 용수공급량이 증가되는 상황을 모의하고 있다. 우선, Fig. 8의 (a)와 (b)에서는 댐 직하류부 및 유역하구부에서의 연평균 하천유출 변동을 보여주고 있다. 두 지점에서 모두 일반적으로 저수지 용수공급량이 증가함에 따라 연평균 유출량이 감소하는 것을 볼 수 있으며,

감소의 정도가 R14까지는 크지 않으나, 그 이상의 용수공급량을 취수하는 경우에는 년도별로 차이는 있으나 약 60 - 80% 까지도 하류유출량이 감소하는 것을 알 수 있었다. 연도별로 (1991년부터 1999년) 영향을 분석하여 보면, 풍수년인 경우에는 하천유량이 풍수기에 지배적이므로 용수공급량 증가에 따른 하류유출 감소 변동이 크지 않았으나 갈수년 (1994, 1995, 1996년)인 경우에는 R14시나리오인 경우에도 약 5-10% 정도의 하류 유출 감소가 있음을, 그리고 R16시나리오인 경우에는 94년 상황에서는 댐 직하류에서는 약 50%까지의 유량감소가 예측될 수 있었다. 또한, 댐 직하류 및 하구지점의 연평균유량변동을 살펴보면, 예상할 수 있듯이 댐 직하류에서 하류에 위치한 하구부에서의 유량변동보다 큼을 알 수 있었으며, R16시나리오의 경우에는 1995년인 경우 댐 직하류 지점에서는 약 45%의 유량 감소가, 그리고 하구부에서는 약 30% 정도의 유량 감소를 보여 하류로 갈수록 유량감소 영향이 감쇄함을 알 수 있었다. 다음으로 Fig. 8의 (c)와 (d)에서는 시나리오에 따른 지점별 월평균유출 변동 모의 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 일반적으로 풍수기에는 갈수기 보다는 하류유출감소변동이 크지 않음을 알 수 있었으며, 마찬가지로 댐 직하류부의 유량감소가 하구에서보다 10-20% 가량 더 심각함을 알 수 있었다. 이러한 월별 유출 감소 특성은 10월부터 급격하게 감소하여 2월 - 4월에 가장 심한 경향을 주고 있음을 알 수 있었다. 특히, 댐 직하류부에서 기존의 용수공급 시나리오 R14의 결과에

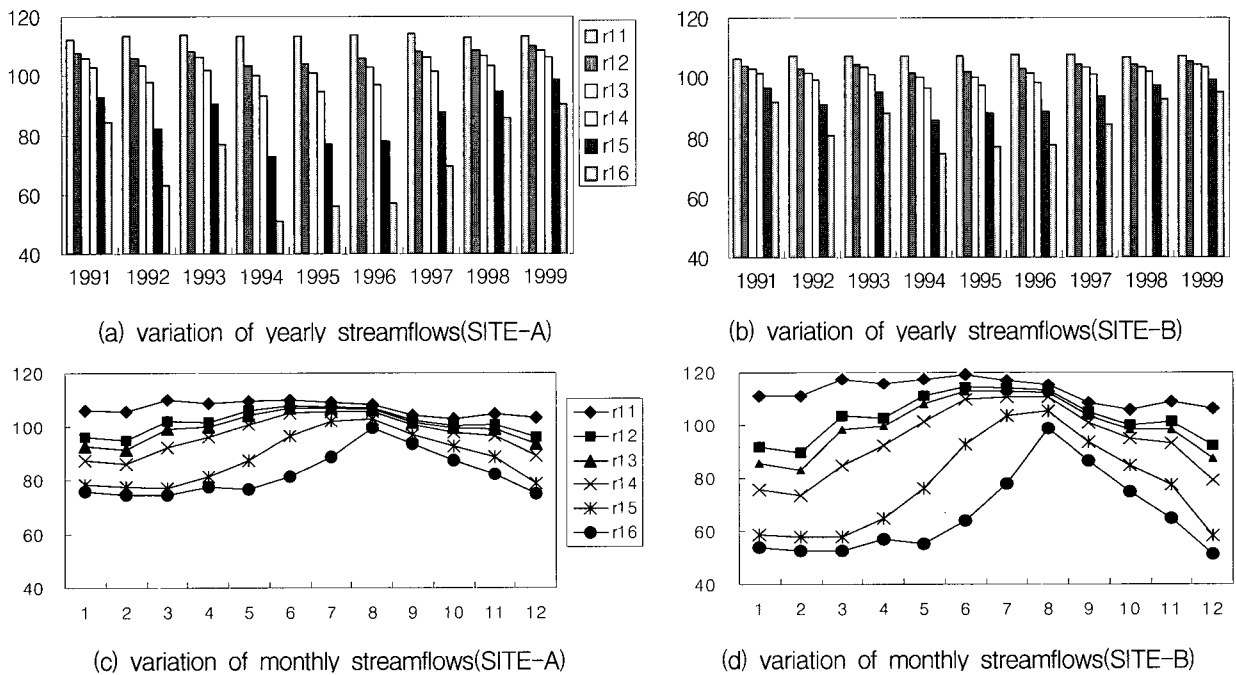


Fig. 8. Results of the water use scenario(R1\*) analyses(scenario/BASE, %)

서도 2월의 경우는 자연유량상태 보다도 약 25% 이상의 유량이 감소할 수 있음을 볼 수 있었으며 R16 시나리오의 경우에는 3월에 약 50%정도의 유량이 감소할 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 저수지 용수공급량 변동에 따른 하류유출영향 변동 모의는 실제로 수자원 계획시 하류 유량변동을 고려하면서 상류 댐에서의 합리적인 용수공급량의 결정을 모의할 수 있는 실험적인 경우가 될 수 있을 것이다.

저수지 바닥 침투계수에 따른 댐 직하류 지점과 유역의 하구 지점에서의 유출 변동 특성을 산정한 결과는 Fig. 9와 같으며, 각각 연유출 변동 및 월유출 변동을 보여주고 있고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 실제로 저수지 바닥의 토질 및 퇴적 상태 및 변동 특성, 그리고 침투특성과 관련된 정밀한 관측자료를 획득하기는 곤란하였다. 따라서, 제시된 모의는 외국의 자료를 참조하여 일반적으로 가정할 수 있는 저수 바닥의 상태와 침투를 모의할 수 밖에 없었으나, 저수지 침투에 의한 저수지 저수량 및 하류 유출량의 변동을 가상적으로 모의하였다는 데 의의가 있을 수 있다. 또한 장래 정밀 조사를 통한 저수지 침투의 영향을 정밀하게 고려될 수 있는 기법적인 시도였다. Fig. 9의 (a)와 (b)에서 보여주듯이 저수지 수리전도도의 증가에 따라 하류의 유출량의 감소가 크게 나타나고 있으며, 일반적으로, 저수지 바닥 수리전도도의 증가는 하류의 연유출량의 감소를 가져옴을 알 수 있었다. 또한, 결과에서 알 수 있듯이 공간적으로 이러한 영향은 댐 하류로 갈수록 적어짐을 보여주고 있으며, 시간적으로는 갈수년(1994, 1995,

1996)에 풍수년보다 유출 감소 효과가 크게 나타남을 알 수 있어, 특히 갈수기의 저수지 바닥 침투의 분석의 중요성을 보여주고 있다. Fig. 9의 (c)와 (d)에서는 하류의 월유출의 변동 특성을 보여주고 있으며, 일반적으로 홍수가 끝나는 10월 이후 하류 유출량 감소 효과가 증가하여 1월부터 2월까지가 가장 극심하였으며, 강우가 시작되는 4월 이후부터 유출감소 영향은 소멸되는 양상을 볼 수 있으며, 홍수기에는 영향이 거의 없었다. 월변동 결과에서도 저수지 수리전도도의 증가에 따른 영향이 댐직하류에서 더 큼을 보여주고 있다. 이러한 결과들은 장래 갈수기 수자원 관리 및 물수지 분석등에서 적절히 고려되어야 하는 요소로서, 과거에는 물리적으로 고려되기 곤란한 부분이었다.

마지막으로 사연댐과 대암댐에서 방류하는 하천유지용수량을 변동시켜가며 모의를 수행하였으며, Fig. 10에 연변동 및 월변동 유출 변동 결과를 상대적으로 보여주고 있다. 이때, 하천유지용수량은 홍수기를 제외하고는 연중 일정하게 의무적으로 하류의 용수공급 및 생태 보전을 위하여 공급되는 것으로 가정하였으며, 이러한 모의 및 기법 제안의 목적은 수자원 계획시 하류의 적절한 하천유지용수량을 산정하고, 또한 상류 저수지로부터의 가능 하천유지용수공급량을 시공간적으로 조절할 수 있는 기초적인 연구가 될 수 있을 것이다. Fig. 10의 (a)와 (b)에서는 댐직하류 및 하구에서의 연유출량 변동을 보여주고 있으며, 하류로의 하천유지용수 공급이 증가할수록 유출량이 약 5%에서 10% 가량이 증가함을 알 수 있었으며, 댐직하류에서 유량 증가 효과가 하구

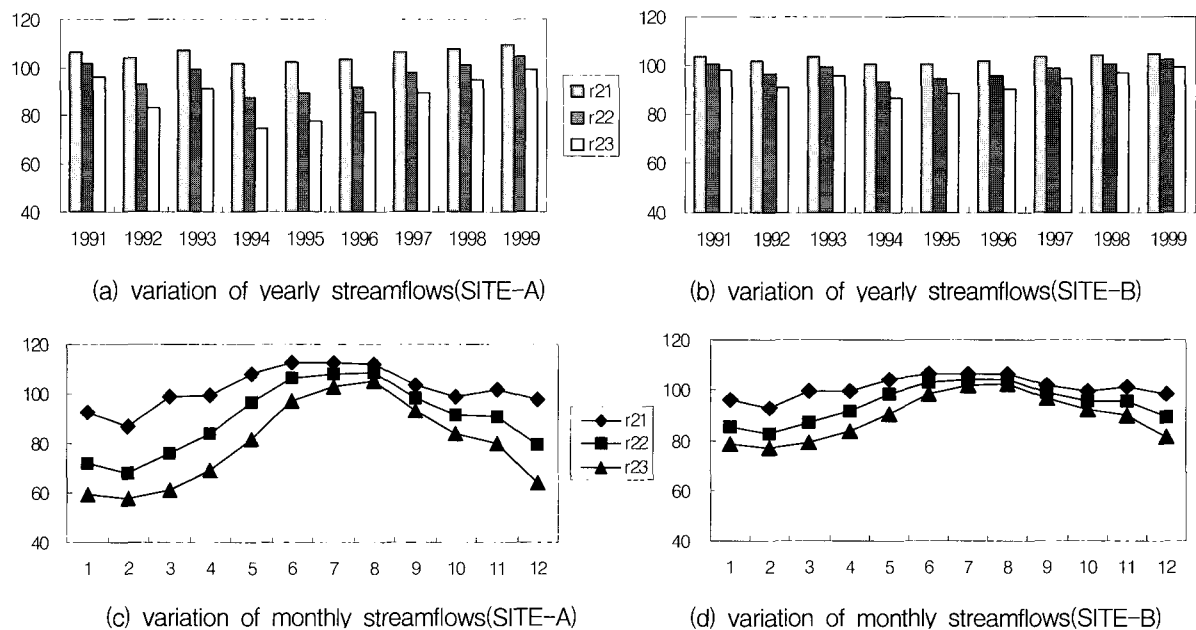
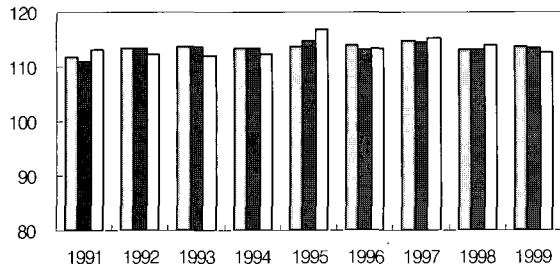
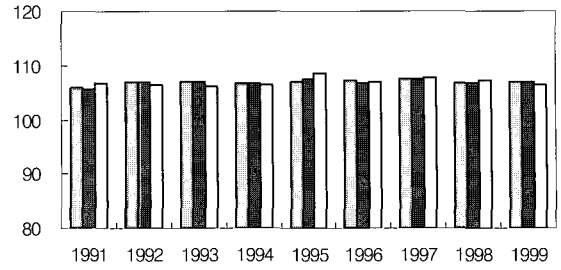


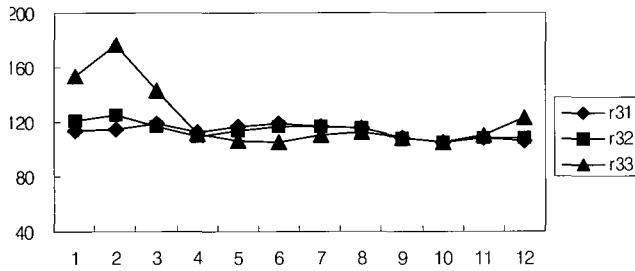
Fig. 9. Results of the hydraulic conductivity scenario(R2\*) analyses(scenario/BASE, %)



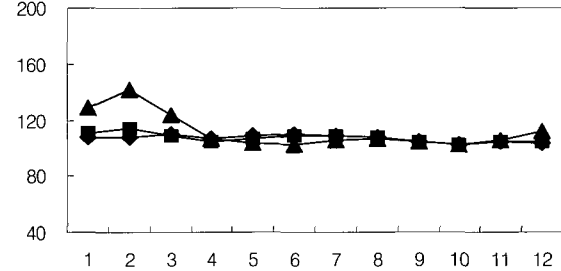
(a) variation of yearly streamflows(SITE-A)



(b) variation of yearly streamflows(SITE-B)



(c) variation of monthly streamflows(SITE-A)



(d) variation of monthly streamflows(SITE-B)

Fig. 10. Results of the river maintenance flow scenario(R3\*) analyses(scenario/BASE, %)

에서보다 2배가량 큼을 알 수 있었다. 실제로 본 모의에서 각 시나리오에 따른 하류 유출량의 증가 효과를 명확하게 보기는 곤란하였다. 그 이유는 하류에서의 필요 하천유지용수공급량을 상류댐에서 공급할 수 있으면 적합할 수 있으며, 현실적으로 주어진 시나리오 이상의 (사연댐 2.0m<sup>3</sup>/sec, 대암댐 2.0m<sup>3</sup>/sec 이상)의 공급을 수행하는 경우 사연댐은 약 4.0 m<sup>3</sup>/sec까지는 최대로 공급할 수 있었으나, 대암댐은 용량이 적어 2.0m<sup>3</sup>/sec에서도 저수량이 고갈되는 결과를 보여 주었다. 이러한 실험적 모의는 실제로 현실에서 실시간 저수지 운영 및 적정 하천유지공급량 산정을 할 수 있도록 하는 의미있는 결과를 보여준다고 판단된다. Fig. 10의 (c)와 (d)는 월변동 결과를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 모든 월에서의 하류 유출량의 증가를 볼 수 있었다. 그러나 시나리오 R31 및 R32에서는 월간의 변동특성이 크지 않은 반면에, R33에서는 11월에서 3월까지의 유출량을 크게 증가시킬 수 있음을 알 수 있었으며, 이와 같은 결과는 적정 하천유지용수공급량의 선정이 얼마나 하류 갈수기 유출에 물리적으로 영향을 줄 수 있는지를 보여주는 결과라고 할 수 있으며, 이는 현대적인 의미의 저수지의 갈수기 하류유출 및 생태에의 기여할 수 있는 정도를 볼 수 있는 사례라고 할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

물리적으로 수자원 및 환경 계획에 있어서 가장 중

요한 요소는 유역단위의 물순환 체계를 분석, 구축하고 이러한 물순환 체계에 영향을 끼치는 요소들의 영향에 대한 메커니즘을 이해하며, 영향을 수치적으로 제공하는 데 있다. 특히 유역 하천유량은 물순환 체계에서 수문학적으로 최말단에 위치하는, 즉 모든 자연적, 인위적 영향에 민감하게 반응한다. 본 연구에서는 이러한 영향 요소 중에서 자연적 요인 (기상변동, 강우, 증발, 침투 등)에 의한 요소들 보다는 상류 저수지, 하도 저류, 유역내 저류지 등과 같은 인위적인 요인에 의한 영향을 물리적인 수문모형에 어떻게 고려할 수 있으며, 실제로 어떠한 시나리오를 통하여 이러한 영향을 분석할 수 있는 기법을 제안하였다. 이때, 기존의 다양한 목적을 위하여 개발된 여러 수문모형을 비교 검토한 결과, 모형의 수문 요소 고려 기법 적용의 적절성, 인위적 개발 요소 고려의 편의성, 그리고 다양한 시나리오 분석을 위한 모형의 적용성 등의 측면에서 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 SWAT(특히 GIS 연계 모형)모형을 선정하였다. 또한, SWAT 모형의 원프로그램의 정밀 분석, 특히 저류시설물 요소 부분의 분석을 통하여 SWAT모형 안에서의 저류시설물의 유출에의 영향 요소를 규명하였으며, 적합하게 수정하였다. 이는 장래 유사 연구를 위한 기반자료로서의 의의가 있을 수 있을 것이다.

이와 같은 물리적인 메커니즘 규명을 바탕으로 하여, 실험적인 모의를 수행하였으며, 대상유역은 토지이용

측면에서 산악, 도시, 해양의 다양한 지형 특성을 가지고 있으며, 상류에 다양한 저류시설을 가지고 있고, 비교적 근래 구축된 자료가 양호한 울산시의 태화강 유역을 선정하였다. 태화강 SWAT 모형을 구축하기 위하여 기상, 수문 및 다양한 GIS 분석을 수행하였으며, 또한 비록 완벽할 수는 없으나 다양한 매개변수에 대한 모형 검정을 수행하였다. 마지막으로 구축된 모형을 이용하여 다양한 상류 저류시설물 중에서 저수지의 하류 유출에의 영향을 정량화하기 위한 시나리오들을 용수공급량 변동, 저수지바닥 침투특성 변동, 그리고 하류 하천 유지용수 공급량 변동의 세가지 요소에 대하여 개발하여 적용하였다. 물론 보다 다양한 저류시설 요소 및 수문 요소 등을 고려할 수 있는 시나리오를 적용할 수 있으나, 본 연구는 태화강의 수자원 계획을 위한 프로젝트성의 연구가 아닌 이론 개발 및 영향 검토 기법의 제안을 목적으로 하여, 다양한 고려는 향후 연구에서 수행할 수 있도록 하였다. 결과적으로 저수지의 상기의 시설에 따른 하류 유출영향이 연변동 및 월변동, 그리고 공간적으로 저수지 직하류 및 하구에서의 영향 등, 다각적으로 제시되었다. 특히 용수 공급량 증가에 따른 하류유량감소 효과와 반대로 하천유지용수공급량 증가에 따른 하류유출증가 영향의 정량적인 분석 결과는 장래 이들 상반되는 요소의 연계에 따른 적합한 저수지 및 유역 관리의 방향을 제시할 수 있는 기초 자료가 될 수 있을 것이다. 더불어 본 연구 결과는 그동안 실제 수자원 계획상에서 간과 되어왔던 대형 및 중소형 댐, 그리고 다양한 저류시설물에 의한 하류 하천의 건천화, 하류 유출량의 감소에 따른 유지용수 확보, 정밀한 수문 성분 분석, 갈수시 저수해석, 강변여과수 개발을 통한 취수원 다변화에의 응용 등의 다양한 문제의 해결을 위한 기초 연구로서 활용될 수 있을 사료되며, 보다 정밀한 자료와 분석, 그리고 시나리오에 따른 장래연구를 기대하여 본다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

강두기, 정강운, 신현석 (2003). "SWAT 모형을 이용한 유역내 저류시설물에 의한 장기유출에의 영향분석." **대한토목학회 2003년도 정기 학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2015-2019.

김남원, 정일문, 원유승 (2004). "완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형의 개발 및 평가(I, II)." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제37권 제6호, pp. 499-507, pp. 509-515.

김현준, 장철희, 김남원(2003). "장기 강우-유출 모형의 비교." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권 제3호, pp. 49-57.

김현준, 정성원 (1993). "다중감수 수문모형의 개발." **한국수자원학회 학술대회지**, 한국수자원학회, pp. 327-334.

김태철, 박승기, 안병기 (1996). "한국 하천의 일 유출량 모형." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권 제5호, pp. 223-233.

신현석, 강두기, 김균태 (2004). "SWAT 모형을 이용한 태화강유역 장기유출 분석." **대한토목학회 2004년도 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp.732-736.

신현석, 윤치승, 박무중, 김홍태 (2002). "저류시설물 및 수문요소에 의한 장기유출 신뢰도 분석." **대한토목학회 2002년 학술발표회**, 대한토목학회, pp.78-82.

이관수, 이영석, 정일광 (1995). "탱크모형의 매개변수 추정을 위한 상태공간모형의 결정." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권 제2호, pp. 125-136.

이도훈, 허준 (2003). "지하수 순환을 고려한 장기유출 모형의 개발." **한국수자원학회 학술발표회논문집(2)**, 한국수자원학회, pp. 715-718.

이현, 차은정, 최영진 (1999). "SWAT/GRASS GIS Linkage를 이용한 기후 및 수자원 자료분석 연구." **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp.353-358.

장철희, 김현준, 김남원 (2003). "용담댐 유역의 장기-유출 분석을 위한 AvSWAT 2000 모형의 적용." **한국수자원학회 학술발표회논문집(1)**, 한국수자원학회, pp. 46-49.

한국수자원공사(1997). **댐건설 전후의 자연환경변화에 관한 연구**. 한국 수자원공사.

Calder, I.R., Hall, R.L., Bastable, H.G., and Gunston, H.M. (1995). "The impact of land use change on water resources in sub-Saharan Africa: a modelling study of Lake Malawi." *Journal of Hydrology*, Vol. 170, pp. 123-135.

Dunn, S.M., and Mackay, R. (1996) "Modelling the hydrological impacts of open ditch drainage." *Journal of Hydrology*, Vol. 179, pp. 37-66.

Griffiths, G.A., and Clausen, B. (1997). "Streamflow recession in basins with multiple water storage."

- Journal of Hydrology*, Vol. 190, pp. 60-74.
- Hopel, K.W., Panu, U.S., McLeod, A.I., and Singh, V.P. (1998). *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*. Water Science and Technology Library.
- 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.
- Ramireddygari, S.R., Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Perkins, S.P., and Govindaraju, R.S. (2000). "Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on streamflow and groundwater : the case of Wet Walnut Creek Watershed, Kansas, USA." *Journal of Hydrology*, Vol. 236, pp. 223-246.
- Singh, V.P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygari, 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.
- Tolleksen, J.M. (1995). "A review of baseflow