

한강수계의 고수 및 저수기 유출모형 매개변수 민감도 분석

추태호¹, 맹승진^{2*}, 옥치을¹, 송기현³

Sensitivity Analysis for Parameter of Rainfall-Runoff Model During High and Low Water Level Season on Han River Basin

Tai-Ho Choo¹, Seung-Jin Maeng^{2*}, Chi-Youl Ok¹ and Ki-Heon Song³

요약 본 연구는 수계별 한정된 수자원의 효율적 관리를 위한 기존댐의 연계운영과 병행하여 댐 상하류 유출을 고려한 종합적인 수자원관리방안 수립의 필요성이 대두됨에 따라, 고수기 및 저수기 댐 상하류의 수계주요지점에 대한 하천유출상황을 모의할 수 있는 유출모형을 구성하는데 목적이 있다. 또한 장단기적으로는 기존 모형을 검토하여 한국수자원공사의 “한강수계 댐 통합운영계획 수립” 업무에 활용될 수 있도록 하는데 있다. 본 연구에서는 한강수계의 소유역을 24개로 분할하였고 강우의 공간 분포를 작성하기 위해 151개의 강우관측소를 이용하여 강우자료를 정리하였다. 한강수계의 주요 제어지점으로 소양강댐, 충주댐, 충주 조정지댐, 횡성댐, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐을 선정하였다. SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 모형을 기본모형으로 선정하여 모형의 입력 자료를 작성하고 2002년의 수문자료를 이용하여 매개변수의 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석 결과, 유역유출과 관련된 매개변수 중 토양습윤상태별 유출율, 침투량별 지하수유입률 및 지표수와 복류수를 분리하는 매개변수가 비교적 큰 민감도를 나타내었다.

Abstract Growing needs for efficient management of water resources urge the joint operation of dams and integrated management of whole basin. As one of the tools for supporting above tasks, this study aims to constitute a hydrologic model that can simulate the streamflow discharges at some control points located both upper and down stream of dams. One of the currently available models is being studied to be applied with a least effort in order to support the ongoing project of KWATER (Korea Water Resources Corporation), "Establishment of integrated operation scheme for the dams in Han River Basin". On this study, following works have been carried out : division of Han River Basin into 24 sub-basins, use of rainfall data of 151 stations to make spatial distribution of rainfall, selection of control points such as Soyanggang Dam, Chungju Dam, Chungju Release Control Dam, Heongseong Dam, Hwachun Dam, Chuncheon Dam, Uiam Dam, Cheongpyung Dam and Paldang Dam, selection of SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) model as a hydrologic model, preparation of input data of SSARR model, sensitivity analysis of parameter using hydrologic data of 2002. The sensitivity analysis showed that soil moisture index versus runoff percent (SMI-ROP), baseflow infiltration index versus baseflow percent (BII-BFP) and surface-subsurface separation (S-SS) parameters are higher sensitive parameters to the simulation result.

Key Words : Han River Basin, Rainfall, Rainfall-Runoff Model, Sensitivity Analysis, SSARR Model

1. 서론

최근 기상 이변으로 인한 홍수와 가뭄의 빈번함, 급증

하는 용수수요 등은 수자원의 이용환경을 악화시키고 있다. 따라서 신규 수자원 개발의 필요성이 대두되고 있으

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2008).

¹부산대학교 산업토목학과

²충북대학교 지역건설공학과

³한국농촌공사 충북본부
접수일 08년 08월 11일

수정일 08년 09월 30일

*교신저자: 맹승진(maeng@cbnu.ac.kr)
게재확정일 08년 10월 16일

나, 댐 개발단가 상승과 댐 건설에 반대하는 환경보존 논리의 확산으로 인해 과거와 같은 인위적인 수자원개발이 어려워지고 있다. 이에 따라 미래세대의 필요를 충족시킬 수 있는 능력을 훼손시키지 않으면서 현재의 필요를 충족시키는, 이른바 지속가능한 개발이 대안으로 자리를 잡고 있다.

이제는 수자원관리 개념을 공급위주의 관리에서 수요 위주의 관리로 전환하고, 기존 댐의 운영방법 개선을 통해서 가용자원을 최대한 활용하여야만 한다. 우리나라의 경우에도 장래 물수요 증가와 기상 이변에 따른 가뭄과 홍수에 대비하기 위한 신규 수자원 개발이 불가피하나, 영월댐 건설의 백지화 과정을 통해 기존 댐의 효율적관리가 국가적인 물 관리 정책의 기초로 자리 잡게 되었다. 그러므로 발상의 전환에 의한 용수자원의 확보 및 홍수 조절용량의 확충을 도모해야만 한다. 즉, 수요관리를 통해 용수수요 증가를 억제시키고, 운영방법 개선을 통해 용수공급량을 확대해야 할 것이다.

이에 대한 여러 가지 대책 중 하나가 동일 수계 내 댐 군의 연계운영을 통한 기존 수자원 시설의 이용효율 극대화이다. 이러한 댐 군의 연계운영 계획수립을 위해서는 수계의 유출을 모의할 수 있는 모형이 구축되어야 하는데, 수계 유출을 모의할 수 있는 모형의 경우 금강수계를 대상으로는 정립되어가고 있으나 타 수계에서는 그렇지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 한강수계를 대상으로 유출모형을 구성하기 위해 기반모형으로 선정된 SSARR 모형의 매개변수 민감도 분석을 실시함으로써 향후 한강수계 전반에 걸친 유출모형 구성에 기여하고자 한다.

2. 기반 모형 선정 및 이론분석

2.1 기반모형 선정

한강수계의 고수 및 저수기 유출분석을 위해서는 유역 내 용수이용 상황과 상류댐의 물리적 특성이 반영되어야 한다. 기 개발된 모형 중에서 이러한 조건을 만족하는 모형은 미공병단에서 개발한 SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 모형이 유일하다. 따라서 본 연구에서는 한강수계의 유출을 위한 기반 모형으로 SSARR 모형을 선정하였다.

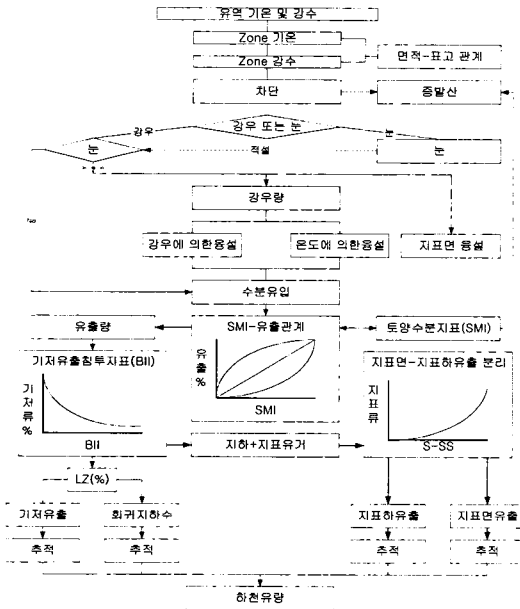
2.2 이론분석

한강수계의 유출분석을 위해 사용된 SSARR 모형은 미국 공병단의 북태평양지부에서 수자원시스템의 계획,

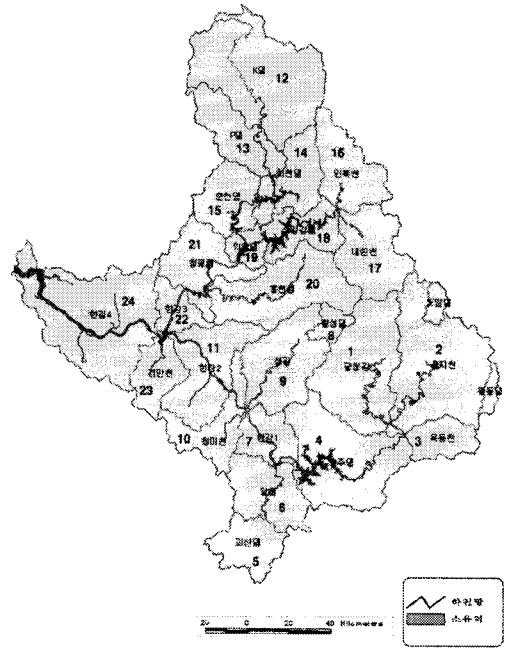
설계 및 관리를 위한 수학적 수문모형으로 1956년 처음 개발되었다. SSARR 모형에는 DC(Depletion Curve) 버전 모형과 IS(Integrated Snowband) 버전 모형이 있는데 본 연구에서는 저수유출모의에서 회귀지하수 추적기능과 증발산 기능 등 장기유출에 유용한 기능이 보완된 IS버전 모형을 적용하였다. SSARR-IS 모형은 유역을 고도에 따라 1~20개의 밴드로 분할하고 고도에 따른 강우량과 토양함수량 및 기온에 따른 증발산량의 변화 등을 고려하여 유출해석을 수행한다. 이 방법은 강설과 토양수분이 고도별로 차이가 있다는 점에 착안한 것으로, 밴드는 보통 고도 600m 간격으로 분할한다. SSARR 모형의 유출모의 시스템은 크게 입력, 용설, 토양수분, 유출로 구성되어 있으며 이들의 유출해석과정은 다음과 같다.

우선 유역내 또는 인근의 관측소에서 얻어진 강수량과 기온자료로부터 각 밴드별 강수량과 기온을 산정한다. 다음으로 차단에 의한 손실을 제외한 밴드별 강수량에 대해 그 날의 기온에 따라 강우와 강설로 구분한다. 강우의 경우는 적설이 없을 경우 바로 지표면으로 이동하게 되고, 강설인 경우는 기존의 적설량에 추가되거나 적설이 없을 경우 새로운 적설을 형성하기도 한다. 만일 적설이 있는 경우 강우량에 따라 강우에 의한 용설 또는 온도에 의한 용설을 일으키게 되고 용설된 수분은 토양으로 이동하게 된다. 강우와 용설량의 합은 토양수분지수(SMI : Soil Moisture Index)에 따라 토양수분과 유출량으로 나뉜다. 토양수분지수는 토양수분의 상태에 따른 유출율의 함수이다. 토양수분은 증발산에 의해서만 소멸되고 유출에 기여하지는 않는다. 유출량은 기저침투량지수(BII : Baseflow Infiltration Index)에 의해 직접유출과 기저유출로 구분된다. 직접유출은 다시 지표면-지표하유출비(S-S:Surface-Subsurface Separation)에 따라 지표면유출과 지표하유출로 구분되며, 기저유출은 회귀지하수층(LZ : Lower Zone)에 의해 지하수유출과 회귀 지하수유출로 나뉜다. 각 유출성분들은 지표면, 지표하, 지하수, 회귀지하수로 저수지에 유입되고 저수지추적방법을 통해 독립적으로 하도로 유입되어 각 유출량의 합이 하천유출량으로 산정된다[5,10~15].

이상과 같은 SSARR 모형의 유출해석 과정을 도시한 것은 그림 1과 같다.



[그림 1] SSARR 모형의 유출 흐름도



[그림 2] 소유역 분할도

3. 입력자료 구성

3.1 대상유역 및 소유역 분할

본 연구의 대상 수계인 한강수계는 유역면적이 25,702.6km²이고 하천의 길이가 494.4km로써 한국에서 제일 큰 유역이다. 한강수계는 수자원장기종합개발계획, 한강홍수예경보, 기존댐 용수공급능력조사(한강수계), 한강유역조사보고서 및 방재종합중장기계획에 따른 주요지점을 종합적으로 고려하여 그림 2와 같이 24개의 소유역으로 분할하였다[1~4,7].

3.2 소유역별 티센계수 및 고도별 면적비

본 연구와 연계하여 향후 한강수계의 소양강댐, 충주댐, 횡성댐, 충주조정지댐, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 괴산댐 및 팔당댐 유역과 24개 소유역 출구의 유출분석을 위해 필요한 강우관측소의 선정은 건설교통부 관할 91개소, 기상청 관할 11개소 및 한국수자원공사 관할 49개소 총 151개의 강우관측소를 기본으로 하여 구성하였다. 유출모의를 위한 강우-유출 모형인 SSARR-IS 유역모형은 소유역에 따른 고도별 면적비를 입력자료로 사용하게 된다. 이들 각각의 소유역에 대한 고도별 유역면적과 고도별 면적비는 DEM 자료와 Shp 파일로 작성된 한강수계 소유역분할도를 사용하여 GIS Tool인 ArcView 3.2에 의해 산정되었다[8,9].

3.3 용수이용자료 및 회귀율

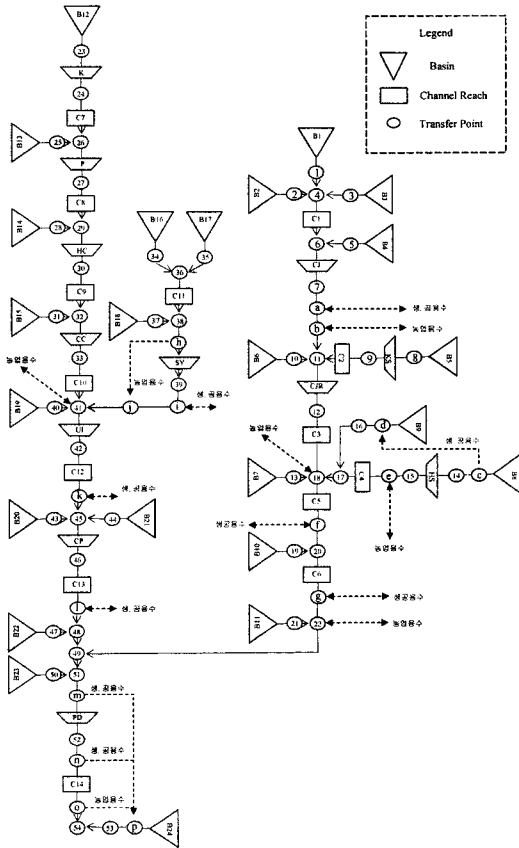
한강수계의 용수이용자료는 한강유역조사보고서를 참조하여 소유역별로 재정리하였으며 용수회귀율은 한강유역조사보고서에 제시되어 있는 것을 적용하였다. 즉 생활용수의 회귀율은 80%, 공업용수의 회귀율은 60%, 농업용수의 회귀율은 기간별로 구분하여 3월부터 8월까지는 35%, 9월부터 11월까지는 70%로 하였다[3].

이러한 한강수계의 용수이용체계를 고려한 모식도는 그림 3과 같다.

4. 결과

4.1 SSARR 모형의 매개변수 및 기준값 선정

SSARR 모형의 매개변수는 토양습윤상태별 유출률(SMI-ROP), 침투량별 지하수 유입률(BII-BFP), 지표수와 복류수의 분리(S-SS), BII와 관련된 BII의 저류시간(BIITS), 최대BII(BIIMX), 최대지하수유출률(BFLIM), 지하수중 회귀지하수가 차지하는 비율(PBLZ), 유역추적 매개변수는 지표수, 복류수, 지하수 및 회귀지하수의 각 흐름장에 대한 저류시간이다. 하도추적 매개변수는 식(1)의 n 과 KTS 이다.



[그림 3] 유출 모식도

$$T_s = \frac{KTS}{I^n} \quad (1)$$

여기에서 KTS 는 시행착오적 방법에 의해 결정되는 상수이고 I 는 유량, n 은 -1과 1 사이의 값을 갖는 계수이다. 매개변수의 민감도분석을 위해 각 매개변수의 기준값을 SSARR 매뉴얼을 참조하여 표 1과 같이 선정하였다 [6,15].

4.2 민감도 분석

한강수계의 민감도분석을 위해 선정된 소유역은 17번 소유역이다. 17번 소유역은 한강수계의 소유역에서 유역면적과 CN(curve Number)값이 전체평균에 비교적 가까운 소유역이다. 분석에 사용된 수문기상자료는 가뭄과 홍수가 심했던 '02년 자료 중 최대유량값을 보이는 시기를 전후로 하여 한 달간의 자료를 선정하였다.

[표 1] 내부처리 매개변수의 민감도분석을 위한 기준치

SMI	SMI (cm)	0	1	2	999				
	ROP (%)	15	53	100	100				
BII	BII (cm/day)	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	100.0
	BFP (%)	44	16	14	12	11	10	10	10
	BIITS : 40hr, BIIMX : 3cm/day, BFLIM : 0.13cm/hr								
S-SS	input rate (cm/hr)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
	sf. comp. (cm/hr)	0.00	0.19	0.68	1.18	1.68	2.18	2.68	
PBLZ	50 %								
T _s (hr)	surface:3, subsurface:10, baseflow:100, lower zone:1,000								

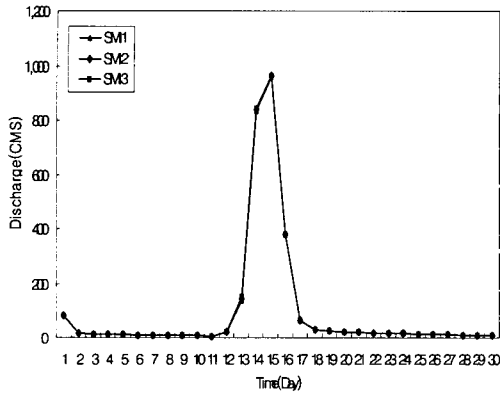
민감도분석을 위한 각 매개변수의 범위는 SSARR 매뉴얼을 참조하여 적당하다고 판단되는 범위를 설정하여 분석을 실시하였다. SMI-ROP곡선은 기준값으로부터 10%씩 상향 또는 하향시킨 곡선에 대한 민감도를 분석하였고, BII-BFP곡선은 BII값이 0일때의 값만 10%씩 증감시킨 값, 그리고 S-SS곡선은 0.15cm/hr씩 증감시킨 값에 대하여 각각 분석을 실시하였다. 이들을 포함하여 유역유출과 관련된 제반 매개변수의 기준값과 범위 및 민감도를 표 2에 제시하였다.

민감도의 지표유량으로서 고수시는 침투유량을 그리고 저수시는 직접유출이 끝나는 시점(변곡점 직후로서 17일)에서의 유량을 각각 선정하였다. 여기서 민감도는 식(2)와 같이 매개변수의 증감량에 대한 유량변화량의 기하평균값으로 정의된다.

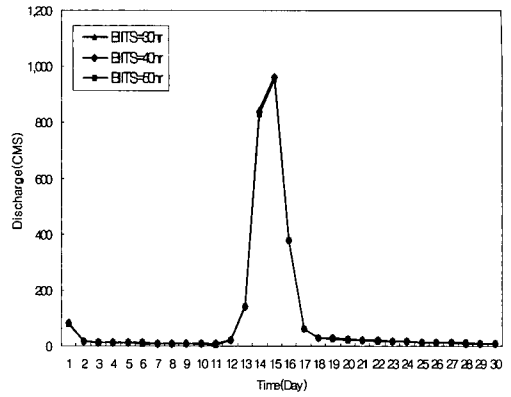
$$\sqrt{\frac{[(Q_u - Q_o)/Q_o]^2 + [(Q_l - Q_o)/Q_o]^2}{(P_u - P_o)/P_o + (P_l - P_o)/P_o}} \quad (2)$$

여기서 Q 와 P 는 각각 유량과 매개변수값을 나타내며 하첨자 o, u, l 은 각각 지표값과 상한값 및 하한값을 의미한다. 또한 침투값의 변화를 포함한 수문곡선의 전체적인 변화양상을 그림 4~그림 16에 도시하였다.

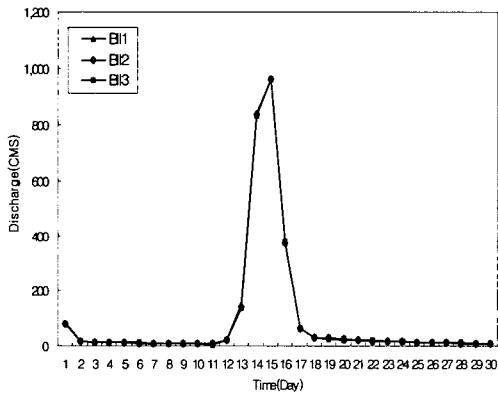
토양습윤상태별 유출율은 그림 4에 그 결과를 도시하였고 그림에서 SMI2 곡선에 대한 SMI1 곡선과 SMI3 곡선의 민감도를 분석해 표 2에 제시한 결과에 따르면, 이 매개변수를 통해 침투유량과 총유출량을 조정하는 데에는 한계가 있으나 중요한 매개변수 중에 하나라고 볼 수 있다.



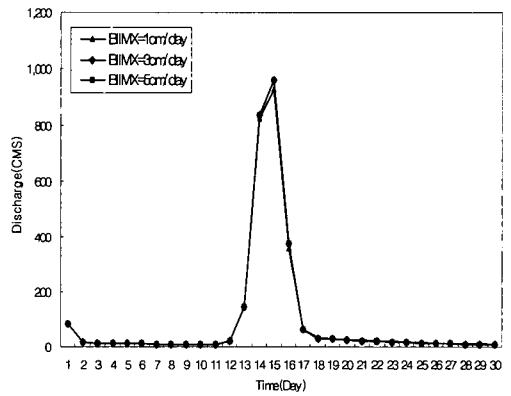
[그림 4] SMI의 민감도



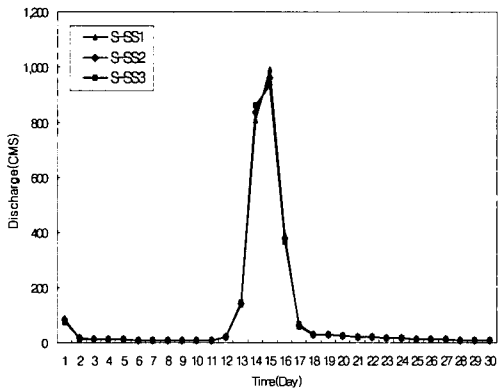
[그림 7] BITS의 민감도



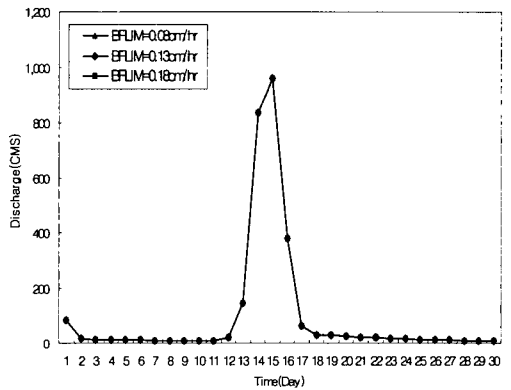
[그림 5] BII의 민감도



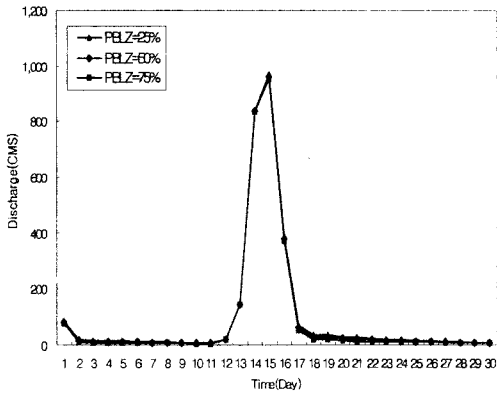
[그림 8] BIIMX의 민감도



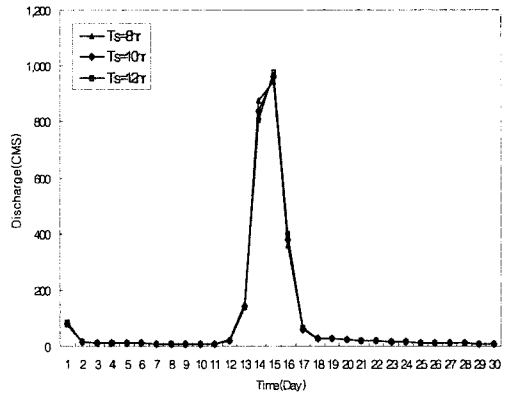
[그림 6] S-SS의 민감도



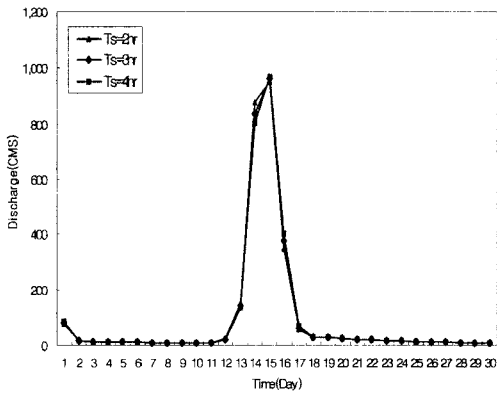
[그림 9] BFLIM의 민감도



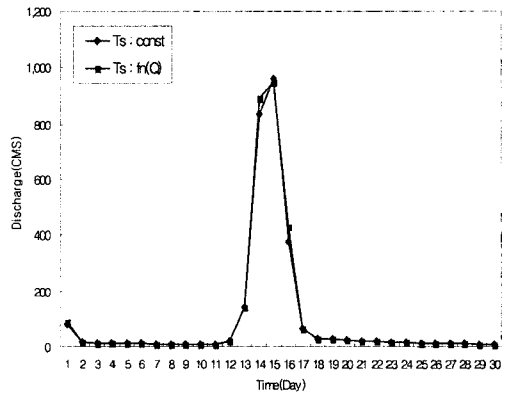
[그림 10] PBLZ의 민감도



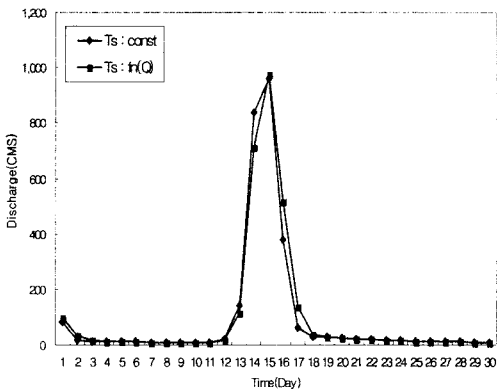
[그림 13] 복류수 저류시간의 민감도



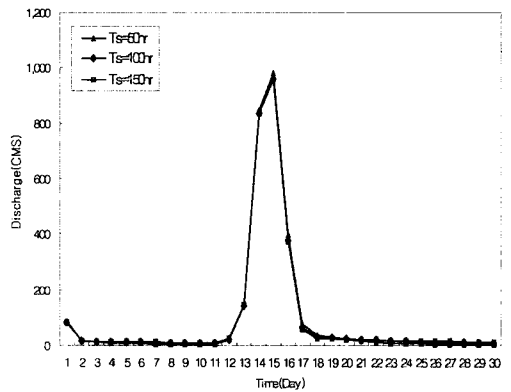
[그림 11] 지표수 저류시간의 민감도



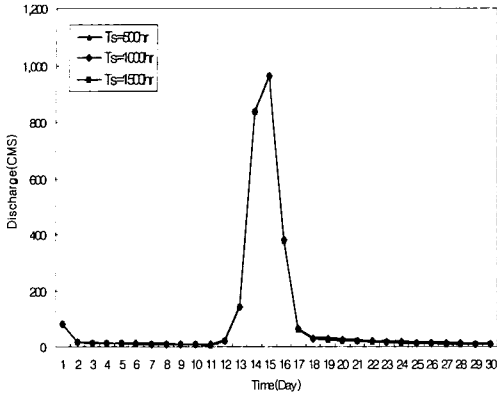
[그림 14] 복류수 저류시간을 유량함수로 한 민감도



[그림 12] 지표수 저류시간을 유량함수로 한 민감도



[그림 15] 지하수 저류시간의 민감도



[그림 16] 회귀지하수 저류시간의 민감도

침투량별 지하수 유입률은 총유출량 중 지하수로 유입 되는 비율을 설정하는 매개변수이며 분석결과를 그림 5 및 표 2에 제시하였는데 고수시 민감도보다 특히 저수시 민감도가 크게 나타나고 있다. 이를 통해 저수시에 대한 보완이 어느 정도 가능할 것임을 알 수 있다.

그림 6에 지표수와 복류수 분리 매개변수의 변화에 따른 결과를 도시하였는데 침투유량과 저수시 유량에서 타 매개변수 보다 다소 민감한 변화가 있으므로 이 매개변수를 통해 침투유량과 총유출량을 조절 할 수 있을 것으로 사료되나 한계가 있을 것으로 판단된다.

BII와 관련된 매개변수는 BII의 저류시간(BIITS), 최대BII(BIIMX)와 최대지하수유출률(BFLIM)이 있다. 이들의 분석 결과를 그림 7~그림 9에 도시하였는데 표 2에서도 볼 수 있듯이 고수시는 물론이고 저수시에도 둔감한 결과를 보이고 있다.

지하수 중 회귀지하수가 차지하는 비율인 매개변수는 지하수로의 유입유량 중에서 지하 깊숙이 저류되었다가 비교적 오랜 시간이 경과한 후에 유출되는 유량이 전체 지하수 유입량에서 차지하는 비율을 나타내는 매개변수로서 분석결과를 그림 10에 제시하였는데 침투유량에 미치는 영향은 미소하지만, 표 2에서 볼 수 있듯이 저수시의 유량 변화가 두드러진다. 지하수 중 회귀지하수가 차지하는 비율의 증가에 따라 침투유량 직후에 형성되는 지하수감수곡선에 기여하는 지하수 유출량은 감소하게 되며 감소된 유량은 차후에 장기적으로 유출되는 것이다.

유역추적 매개변수에는 지표수, 복류수, 지하수 및 회귀지하수와 같은 4가지 흐름장에 대하여 각 흐름장의 가상저수지의 수효와 저류시간이 있다. 이들 매개변수는 유역면적과 평균 지표면 유출거리 및 경사, 그리고 지체시간, 토지이용상태 및 토양의 상태에 따라 다르게 산정되

어야 하는데, 민감도분석과 시행착오적 방법에 의해 결정 되는 것이 통상적인 방법이다. SSARR 매뉴얼의 부록 D에 제시된 미국내의 두 개 지점에서 결정된 값은 표 3과 같다.

이를 한강유역에서의 매개변수 결정에 참조하였는데 민감도분석에서 선정한 17번 소유역의 유역면적이 1,084.3km²이고 국내유역의 특징이 미국에 비해 산지가 많은 급경사임을 감안하면 매개변수의 값은 유역B보다 유역A에 가까울 것으로 짐작할 수 있다.

[표 2] 내부처리 매개변수의 민감도 분석

매개변수	범위	고수시		저수시	
		침투유량 (m ³ /s)	민감도	침투유량 (m ³ /s)	민감도
SMI	SMI1	960.0	0.02	62.9	0.02
	SMI2	962.0		63.0	
	SMI3	963.0		63.1	
BII	BII1	961.0	0.01	62.1	0.17
	BII2	962.0		63.0	
	BII3	962.0		64.0	
S-SS	S-SS1	991.0	0.51	56.6	1.72
	S-SS2	962.0		63.0	
	S-SS3	936.0		68.7	
BIITS	30hr	968.0	0.03	62.0	0.06
	40hr	962.0		63.0	
	50hr	957.0		63.7	
BIIMX	1cm/day	925.0	0.04	63.6	0.01
	3cm/day	962.0		63.0	
	5cm/day	962.0		63.0	
BFLIM	0.08cm/day	962.0	0.00	63.0	0.00
	0.13cm/day	962.0		63.0	
	0.18cm/day	962.0		63.0	
PBLZ	25%	968.0	0.01	71.9	0.28
	50%	962.0		63.0	
	75%	955.0		54.1	
Ts (surface)	2hr	950.0	0.03	55.6	0.36
	3hr	962.0		63.0	
	4hr	968.0		70.8	
Ts (subsurface)	8hr	943.0	0.09	60.7	0.17
	10hr	962.0		63.0	
	12hr	977.0		65.0	
Ts (baseflow)	50hr	981.0	0.03	75.7	0.32
	100hr	962.0		63.0	
	150hr	957.0		56.9	
Ts (lower zone)	500hr	964.0	0.00	65.8	0.07
	1,000hr	962.0		63.0	
	1,500hr	961.0		62.0	

[표 3] 미국에서의 유역추적 매개변수

유역구분 흐름장 종 류	유역A (유역면적 : 530km ²)		유역B (유역면적 : 6,250km ²)	
	저수지 수효	T _s (hr)	저수지 수효	T _s (hr)
지표수	4	2.5	4	3.5
복류수	3	11.0	3	26.0
지하수	2	200.0	3	100.0
회귀지하수	2	2,000.0	2	2,000.0

문제를 단순화시키기 위하여 우선 가상저수지의 수효를 고정시켰는데 대표유역인 17번 유역뿐만 아니라 전체 유역에 대해서 이를 표 3의 유역A와 동일한 지표수 4개, 복류수 3개, 그리고 지하수와 회귀지하수에 대해서는 2개씩으로 하였다. 이러한 상태에서 17번 유역의 4가지 흐름장 각각의 저류시간 T_s를 변화시켜 가며 민감도분석을 시행하였다. 일반적으로 저류시간이 짧아질수록 침투유량은 커지며 침투시각은 빨라지게 된다.

지표수에 대해서는 저류시간을 2~4시간까지 한 시간 간격으로 변화시켜 가며 그에 따른 유출수문곡선의 변화양상을 살펴보았다. 이를 그림 11에 도시하였고 표 2에 민감도분석 결과를 제시하였는데 고수시의 경우에는 12.0m³/s의 침투유량 하강이 있었으며 고수시 보다 저수시에 민감도가 큰 값을 보이고 있다. 한편 유역에서의 저류시간을 일정한 상수로 하지 않고 유량의 함수로 설정할 수도 있는데 이렇게 하면 저류시간이 유량증가에 따라 작아지게 함으로써 실제현상에 더욱 부합하게 된다. 지표수의 저류시간을 유량의 함수로 부여한 결과를 입력자료로 사용한 결과를 그림 12에 나타내었다.

복류수에 대해서도 저류시간을 8~12시간까지 두 시간 간격으로 변화시킨 일정한 경우와 저류시간이 유량의 함수인 경우에 대하여 각각 모의하였고 그 결과를 그림 13에 도시하였다. 그 변화양상은 고수시와 저수시에서 지표수의 경우와 유사하게 나타났다.

지하수와 회귀지하수의 경우에는 저류시간이 일정한 경우에 대해서만 검토하였는데 그 결과는 그림 15와 그림 16에서 볼 수 있듯이 50시간의 저류시간을 갖는 지하수의 경우에만 약간의 침투유량의 상승이 있을 뿐 대체적으로 침투유량에 미치는 영향은 미소한 정도이지만 표 2에서 볼 수 있듯이 저수시 민감도가 지하수의 경우 상당히 크게 나타났으며 회귀지하수의 경우에도 적지 않게 나타났다.

하도추적 매개변수에는 가상저수지의 수효와 n, 그리고 KTS가 있는데 이들의 기준값은 n이 0.2인 상태에서

표 1에 제시하였다. 유역추적의 민감도분석과 마찬가지로 가상저수지의 수효를 고정된 상태에서 n과 KTS에 대한 민감도분석을 실시하였다.

모든 조건은 표 1과 동일하게 한 상태에서 n에 대한 민감도분석 결과를 표 4와 그림 17에 제시하였다. 그림 17은 n의 값이 0.2일 때를 기준으로 n의 값의 변화에 대한 침투유량의 변화량을 9개 제어지점별로 도시한 그림이다. n의 범위는 -1.0~1.0 사이로 알려져 있는데 n이 음의 값을 가질 경우 식 (1)에서 볼 수 있듯이 유량이 증가할 때 저류시간도 증가하게 되므로 하류로 갈수록 유량은 작아질 수 있다. 하류로 갈수록 침투유량의 감소폭을 크게 하기 위해서는 n값을 감소시켜야 하지만 저류시간이 유량과 무관해지는 n값이 0일 때를 제외한 나머지 경우에서 그림 17에서 보듯이 n값이 0 보다 작을 때는 침투유량의 감소가 많았고 0.2에서 0.1 증가시킨 이후에는 n값의 증가에 따른 침투유량의 증가는 미소하였다.

[표 4] 하도특성 매개변수 n에 대한 민감도 분석

제어 지점	침투 관측 유량 (m ³ /s)	침투계산유량(m ³ /s)						
		n						
		-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
소양강 댐	1,657	647	1,170	876	1,100	1,130	1,130	1,130
충주댐	1,587	1,150	1,740	1,580	1,680	1,670	1,670	1,670
충주 조정지	933	1,580	2,370	1,960	2,020	2,050	2,050	2,270
횡성댐	422	271	271	271	271	271	271	271
화천댐	1,894	1,830	2,090	1,970	2,000	2,050	2,050	2,080
춘천댐	1,840	1,910	2,690	2,250	2,330	2,440	2,440	2,600
의암댐	2,066	2,340	3,840	3,110	3,500	3,510	3,510	3,740
청평댐	3,924	2,630	5,360	3,650	4,400	4,830	4,830	5,230
팔당댐	5,585	3,920	7,700	4,430	5,760	6,700	6,700	7,440

또한 n값을 0.2로 한 상태에서 산정된 KTS를 각각 10%, 50%, 100%, 150% 및 200%를 취하였을 때 이로 인한 침투유량의 변화를 표 5에 제시하였으며 KTS의 증감 비율에 대한 침투계산유량의 증감비율을 그림 18에 도시하였다. 이를 보면 KTS의 증가에 따른 침투유량의 감소는 있으나 KTS가 감소할 경우 침투유량의 변화는 1% 이내로 극히 미소하였고 일부 지점에서는 침투유량의 변화가 증가되는 현상을 보였다.

[표 5] 하도특성 매개변수 KTS에 대한 민감도 분석

제어지점	침투 관측 유량 (m ³ /s)	침투계산유량(m ³ /s)				
		KTS× 0.1	KTS× 0.5	KTS× 1.0	KTS× 1.5	KTS× 2.0
소양강댐	1,657	1,130	1,130	1,100	932	769
충주댐	1,587	1,690	1,670	1,680	1,650	1,500
충주조정지	933	2,320	2,120	2,020	2,020	1,890
형성댐	422	271	271	271	271	271
화천댐	1,894	2,080	2,050	2,000	1,960	1,970
춘천댐	1,840	2,640	2,440	2,330	2,270	2,240
의암댐	2,066	3,780	3,510	3,500	3,280	2,960
청평댐	3,924	5,280	4,880	4,400	4,020	3,480
팔당댐	5,585	7,550	6,820	5,760	4,900	4,260

이상과 같은 매개변수의 민감도분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 유역추적과 관련된 매개변수 중 SMI, BII, S-SS는 고수 및 저수시 모두 민감하였고 지표수와 복류수의 저류시간을 유량의 함수로 할 경우 상수로 고정시킨 경우와 비교해 볼 때 저수시 뿐만 아니라 특히 고수시 민감한 결과를 보이고 있다. 저수시에는 S-SS를 비롯해 PBLZ 및 지하수의 저류시간 등이 민감한 매개변수로 확인되었다.

5. 결론

본 연구에서는 한강수계의 원활한 수자원 확보와 관리를 위해 필요한 댐연계운영의 수반 절차인 유출모형을 구성하고자 하였다. 이러한 유출모형의 구성을 위해 우선적으로 유출모형의 민감도분석이 실시되어야 한다. 따라서 본 연구를 통해 수행한 민감도분석에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

한강수계내 용수이용 상황과 상류댐의 물리적 특성을 반영할 수 있는 SSARR 모형을 기본모형으로 선정하였다.

대상 수계인 한강수계를 24개의 소유역으로 구분하였고 소유역별 경우자료 및 수문기초자료를 수집하고 한강수계 소유역의 고도별 면적비, 티센계수, 용수이용량, 회귀율을 산정하여 SSARR 모형의 입력자료로 활용하였다.

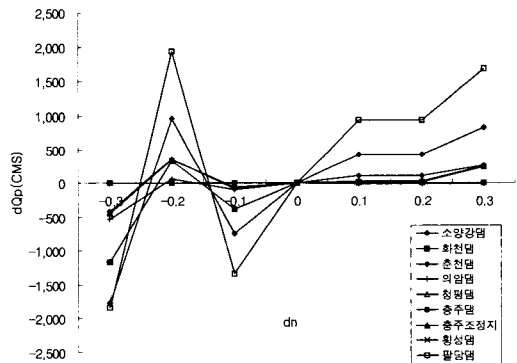
유역추적과 관련된 매개변수 중 SMI, BII, S-SS는 고수 및 저수시 모두 민감하였고 지표수와 복류수의 저류시간을 유량의 함수로 할 경우 상수로 고정시킨 경우와 비교해 볼 때 저수시 뿐만 아니라 특히 고수시 민감한 결

과를 보이고 있다. 저수시에는 S-SS를 비롯해 PBLZ 및 지하수의 저류시간 등이 민감한 매개변수로 확인되었다.

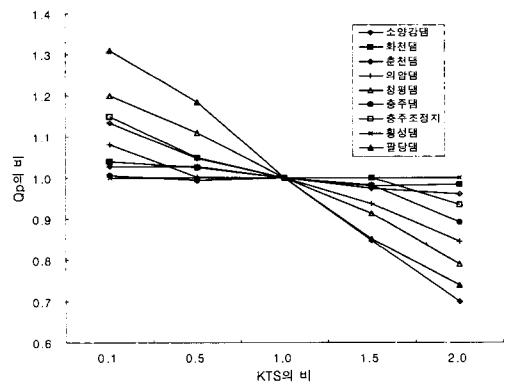
민감도 분석 결과 향후 유출모형의 보정을 위해서 사용자는 SMI, BII, S-SS를 변화하여 침투부를 제어하며 저류시간 매개변수를 변화하여 저수부와 지체시간을 제어하여야 할 것이다.

하도추적 매개변수는 가상저수지의 수효와 n, 그리고 KTS가 있는데 이들의 민감도 분석 결과 n값이 0 보다 작을 때는 침투유량의 감소가 많았고 0.2에서 0.1 증가시킨 이후에는 n값의 증가에 따른 침투유량의 증가는 미소하였다. n값을 0.2로 한 상태에서 산정된 KTS를 각각 10%, 50%, 100%, 150% 및 200%를 취하였을 때, KTS의 증가에 따른 침투유량의 감소는 있으나 KTS가 감소할 경우 침투유량의 변화는 1% 이내로 극히 미소하였고 일부 지점에서는 침투유량의 변화가 증가되는 현상을 보였다.

향후, 본 연구에 의해 도출된 결과는 한강수계 통합 물관리를 위한 기반 기술로 활용될 것이다.



[그림 17] n의 민감도



[그림 18] KTS의 민감도

참고문헌

[1] 건설부(1998), “방재종합 중장기 계획 보고서”.

[2] 건설교통부 한강홍수통제소(1995), “한강홍수에경보”.

[3] 건설교통부 한국수자원공사(2004), “한강유역조사 보고서”.

[4] 건설교통부 한국수자원공사(2004), “수자원장기종합개발 계획”.

[5] 안상진, 이용수(1989), “SSARR 모형에 의한 유역유출 해석”, 한국수문학회지, 제22권, 제1호, pp. 109-116.

[6] 한국수자원공사(1996), “낙동강수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발(분석모델 부분) 보고서”.

[7] 한국수자원공사(1997), “기존댐 용수공급 능력 조사(한강) 보고서”.

[8] 한국수자원공사(2000), “저수유출수문모형 개발”.

[9] 한국수자원공사(2004), “한강수계 연속유출모형 실용화 보고서”.

[10] D. M. Rockwood(1968), "Application of Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation -“SSARR”- Program to the Lower Mekong River." in The Use of Analog and Digital Computer in Hydrology Symposium, International Association of Scientific Hydrology, UNESCO, pp. 329-344.

[11] M. G. Anderson and T. P. Burt(1985), “Hydrological Forecasting”, John Wiley & Sons, pp. 505-558.

[12] V. P. Schermerhorn and D. W. Kuehl(1968), "Operational Streamflow Forecasting with SSARR Model." The Use of Analog and Digital Computer in Hydrology Symposium, International Association of Scientific Hydrology, UNESCO, pp. 317-328.

[13] V. P. Singh(1989), “Hydrologic Systems-Watershed Modeling”, Prentice Hall, pp. 246-259.

[14] SSARR Program, http://www.nwd-wc.usace.army.mil/ftp/pub/SSARR_program/

[15] Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model, <http://www.nwd-wc.usace.army.mil/report/ssarr.htm>

추 태 호(Tai-Ho Choo)

[정회원]



- 1984년 2월 : 경희대학교 토목공학과(공학사)
- 1990년 12월 : 미국 피츠버그대학교 토목공학과(공학석사)
- 1998년 12월 : 미국 피츠버그대학교 토목환경공학과(공학박사)
- 1984년 2월 ~ 2002년 9월 : 한국수자원공사 재직

• 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 산업토목학과 부교수

<관심분야>

방재공학, 수리수자원공학, 상하수도공학

맹 승 진(Seung-Jin Maeng)

[정회원]



- 1990년 2월 : 충북대학교 농공학과(농학사)
- 1995년 8월 : 충북대학교 농공학과(농학석사)
- 2002년 2월 : 충북대학교 농공학과(농학박사)
- 1996년 4월 ~ 2005년 2월 : 한국수자원공사 재직

• 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 지역건설공학과 조교수

<관심분야>

강우-유출, 방재공학, 물관리 시스템

옥 치 율(Chi-Youl Ok)

[정회원]



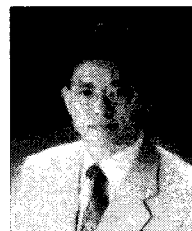
- 1970년 2월 : 동아대학교 토목공학과(공학사)
- 1976년 2월 : 동아대학교 토목공학과(공학석사)
- 1987년 8월 : 동아대학교 토목공학과(공학박사)
- 1977년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 산업토목학과 교수

<관심분야>

하천공학, 해안 및 항만공학, 수문학

송 기 현(Ki-Heon Song)

[정회원]



- 1986년 2월 : 충북대학교 농공학과(농학사)
- 2002년 2월 : 충북대학교 농공학과(농학석사)
- 2006년 2월 : 충북대학교 농공학과(박사수료)
- 1986년 11월 ~ 현재 : 한국농촌공사 충북본부 팀장 재직

<관심분야>

농업수리공학, 관개배수, 경지정리