

# 한강수계 유역유출 분석 모형 구축(II)

## - 모형구성을 중심으로 -

### Development of Rainfall-Runoff Model on Han River(II)

#### - Model Construction -

맹승진, 찬다 트리베디  
충북대학교

Maeng seung-jin, Chanda trivedi  
Chungbuk National University

#### 요약

본 연구에서는 한강수계의 소유역을 24개로 분할하였고 강우의 공간 분포를 작성하기 위해 151개의 강우관측소를 이용하여 강우자료를 정리하였다. 한강수계의 주요 제어지점으로 소양강댐, 충주댐, 충주조정지댐, 황성댐, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐을 선정하였다. SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 모형을 기본모형으로 선정하여 모형의 입력자료를 작성하고 2002년의 수문자료를 이용하여 매개변수의 민감도분석을 수행하였다. 민감도 분석 결과, 유역유출과 관련된 매개변수 중 토양습윤상태별 유출율, 침투량별 지하수유입률 및 지표수와 복류수를 분리하는 매개변수가 비교적 큰 민감도를 나타내었다.

#### Abstract

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.

## I. 서론

본 연구의 I보에서는 한강유역의 유출모형을 구성하기위해 기본 모형인 SSARR 모형의 입력자료를 구축하였다. 입력자료에 따른 모형의 매개변수에 대한 보정과 검증에 앞서 매개변수의 민감도 분석을 내부처리 매개변수에 한정하여 분석하였다. 본 연구에서는 유역 매개변수의 민감도 분석을 포함한 매개변수의 검토정과 연물수지 분석을 실시하고자 한다.

## II. 결과

### 1. 유역추적 매개변수의 민감도 분석

유역추적 매개변수에는 지표수, 복류수, 지하수 및 회귀지하수와 같은 4가지 흐름장에 대하여 각 흐름장의 가상저수지의 수효와 저류시간이 있다. 이들 매개변수는 유역면적과 평균 지

표면 유출거리 및 경사, 그리고 지체시간, 토지이용상태 및 토양의 상태에 따라 다르게 산정되어야 하는데, 민감도분석과 시행착오적 방법에 의해 결정되는 것이 통상적인 방법이다. SSARR 매뉴얼의 부록 D에 제시된 미국내의 두 개 지점에서 결정된 값은 표 1과 같다.

[표 1] 미국에서의 유역추적 매개변수

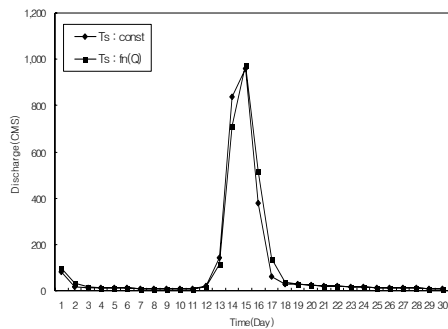
유역구분 흐름장 종 류	유역A (유역면적 : 530km <sup>2</sup> )		유역B (유역면적 : 6,250km <sup>2</sup> )	
	저수지 수효	Ts (hr)	저수지 수효	Ts (hr)
지표수	4	2.5	4	3.5
복류수	3	11.0	3	26.0
지하수	2	200.0	3	100.0
회귀지하수	2	2,000.0	2	2,000.0

표 1을 한강유역에서의 매개변수 결정에 참조하였는데 민감

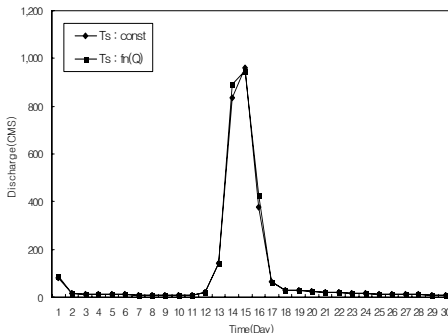
도분석에서 선정된 17번 소유역의 유역면적이 1,084.3km<sup>2</sup>이고 국내유역의 특징이 미국에 비해 산지가 많은 급경사임을 감안 하면 매개변수의 값은 유역B보다 유역A에 가까울 것으로 짐작할 수 있다. 문제를 단순화시키기 위하여 우선 가상저수지의 수효를 고정시켰는데 대표유역인 17번 유역뿐만 아니라 전체 유역에 대해서 이를 표 1의 유역A와 동일한 지표수 4개, 복류수 3개, 그리고 지하수와 회귀지하수에 대해서는 2개씩으로 하였다. 이러한 상태에서 17번 유역의 4가지 흐름장 각각의 저류시간  $T_s$ 를 변화시켜 가며 민감도분석을 시행하였다. 일반적으로 저류시간이 짧아질수록 첨두유량은 커지며 첨두시각은 빨라지게 된다.

지표수에 대해서는 저류시간을 2~4시간까지 한 시간 간격으로 변화시켜 가며 그에 따른 유출수문곡선의 변화양상을 살펴보았다. 고수시의 경우에는 12.0m<sup>3</sup>/s의 첨두유량 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 입력 자료로 사용한 결과를 그림 1에 나타내었다.

복류수에 대해서도 저류시간을 8~12시간까지 두 시간 간격으로 변화시킨 일정한 경우와 그림 2와 같이 저류시간이 유량의 함수인 경우에 대하여 각각 모의하였다. 그 변화양상은 고수시와 저수시에서 지표수의 경우와 유사하게 나타났다.



▶▶ 그림 1. 지표수 저류시간을 유량함수로 한 민감도



▶▶ 그림 2. 복류수 저류시간을 유량함수로 한 민감도

지하수와 회귀지하수의 경우에는 저류시간이 일정한 경우에 대해서만 검토하였는데 그 결과는 50시간의 저류시간을 갖는 지하수의 경우에만 약간의 첨두유량의 상승이 있을 뿐 대체적으로 첨두유량에 미치는 영향은 미소한 정도이지만 저수시 민감도가 지하수의 경우 상당히 크게 나타났으며 회귀지하수의 경우에도 적지 않게 나타났다.

하도추적 매개변수에는 가상저수지의 수효와  $n$ , 그리고 KTS가 있는데 이들의 기준값은  $n$ 이 0.2인 상태에서 I보에 제시하였었다. 유역추적의 민감도분석과 마찬가지로 가상저수지의 수효를 고정된 상태에서  $n$ 과 KTS에 대한 민감도분석을 실시하였다.

모든 조건은 I보에서 제시한 값과 동일하게 한 상태에서  $n$ 에 대한 민감도분석 결과를 표 2와 그림 3에 제시하였다. 그림 3은  $n$ 의 값이 0.2일 때를 기준으로  $n$ 의 값의 변화에 대한 첨두유량의 변화량을 9개 제어지점별로 도시한 그림이다.  $n$ 의 범위는 -1.0~1.0 사이로 알려져 있는데  $n$ 이 음의 값을 가질 경우 I보의 식 (1)에서 볼 수 있듯이 유량이 증가할 때 저류시간도 증가하게 되므로 하류로 갈수록 유량은 작아질 수 있다. 하류로 갈수록 첨두유량의 감소폭을 크게 하기 위해서는  $n$ 값을 감소시켜야 하지만 저류시간이 유량과 무관해지는  $n$ 값이 0일 때를 제외한 나머지 경우에서 그림 3에서 보듯이  $n$ 값이 0 보다 작을 때는 첨두유량의 감소가 많았고 0.2에서 0.1 증가시킨 이후에는  $n$ 값의 증가에 따른 첨두유량의 증가는 미소하였다.

[표 2] 하도특성 매개변수  $n$ 에 대한 민감도 분석

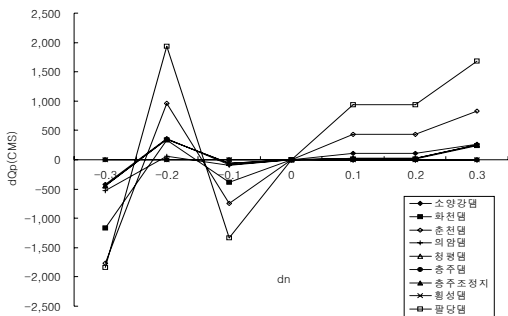
제어지점	첨두 관측 유량 (m <sup>3</sup> /s)	첨두계산유량(m <sup>3</sup> /s)						
		$n$						
		-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
소양강댐	1,657	647	1,170	876	1,100	1,130	1,130	1,130
충주댐	1,587	1,150	1,740	1,580	1,680	1,670	1,670	1,670
충주조정지	933	1,580	2,370	1,960	2,020	2,050	2,050	2,270
황성댐	422	271	271	271	271	271	271	271
화천댐	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  $n$ 값을 0.2로 한 상태에서 산정된 KTS를 각각 10%, 50%, 100%, 150% 및 200%를 취하였을 때 이로 인한 첨두유량의 변화를 표 3에 제시하였으며 KTS의 증감비율에 대한 첨두계산유량의 증감비율을 그림 4에 도시하였다. 이를 보면 KTS의 증가에 따른 첨두유량의 감소는 있으나 KTS가 감소할 경우 첨두유량의 변화는 1% 이내로 극히 미소하였고 일부 지점에서는 첨두유량의 변화가 증가되는 현상을 보였다.

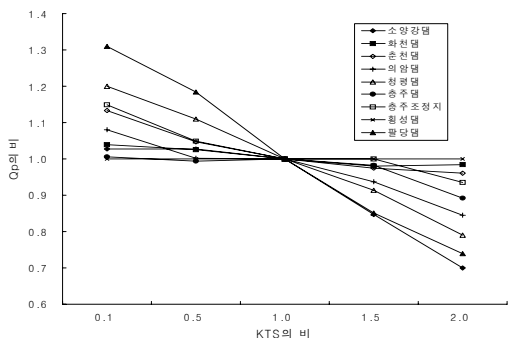
[표 3] 하도특성 매개변수 KTS에 대한 민감도 분석

제어지점	침투 관측 유량 (m <sup>3</sup> /s)	침투계산유량(m <sup>3</sup> /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
횡성댐	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.



▶▶ 그림 3. n의 민감도



▶▶ 그림 4. KTS의 민감도

2. 매개변수의 결정

최종적인 매개변수의 값을 결정하기 위하여 목적함수가 먼저 선정되어야 하는데 목적함수로는 관측치와 계산치의 오차를 최소화하는 형태의 것을 취하는 것이 통상적이며, 오차는

절대오차와 상대오차로 구분할 수 있다. 그러나 전자의 경우 유량이 큰 홍수기의 오차를 감소시키는 방향으로 매개변수가 결정될 우려가 있어 저수시의 정확도가 저하될 수 있다. 후자의 경우는 정반대로 저수시 위주로 매개변수가 결정되므로 고수시 유량은 전혀 반영되지 못할 소지가 있다. 따라서 고수시와 저수시를 분리하여 각각에 대해 선정된 민감한 매개변수를 통해 독립적인 모형의 보정절차가 가장 합당하다고 사료되어 목적함수 선정에 있어서도 고수시와 저수시를 구분하였다. 즉, 고수시에는 SMI, BII, S-SS와 유역에서의 저류시간을 통해 9개 제어지점에서 연최대유량에 대한 상대오차를 최소로 하는 것을 목적함수로 선정하였고, 저수시에는 BII, PBLZ 및 지하수의 저류시간을 통해 기저유출이 지속되는 기간 위주로 9개 제어지점에 대해서 각 지점별 풍수량 이하에 해당되는 유량의 평균절대오차의 최소화를 역시 목적함수로 선정하였다. 본 연구에서는 9개 제어지점에서의 유출량 자료만을 근거로 하여 기설정된 보정방향과 민감도분석 결과에 따라 시행착오적인 방법으로 매개변수를 결정하였다.

2001년 자료와 2002년 자료에 의한 모형의 보정방향과 민감도분석 결과에 따라 내부처리매개변수 중 고수시 또는 저수시에 민감도가 큰 SMI, BII, S-SS와 유량별 Ts, 그리고 PBLZ 등을 제외한 나머지 매개변수는 처음에 설정한 기준값으로 고정하였다. 침투유량에 큰 영향을 미치는 SMI, BII, S-SS와 유역추적 매개변수 중 유량의 함수로 설정되는 Ts에 대해 저수시 결과까지 감안한 상태에서 수차례의 시행착오를 통해 각각 그 값을 결정하였다. SMI-a는 CN값이 59 이하인 12, 13, 14, 16번 소유역, SMI-b는 CN값이 60~69인 5, 7, 8, 9, 15, 18, 20, 21, 22, 23번 소유역, SMI-c는 CN값이 70 이상인 나머지 소유역의 곡선이다.

저수시 보정에 있어서도 고수시의 결과를 감안한 상태에서 시행착오를 통해 BII, PBLZ 및 지하수, 회귀지하수의 Ts 등을 결정하였다. 최종적으로 결정된 BII를 제시하였고 PBLZ는 75%로 하였고, 지하수와 회귀지하수의 Ts는 각각 150 hr와 1,500 hr로 결정하였다.

이와 같이 최종적으로 결정된 매개변수에 의한 결과, 고수시 오차는 유역의 상류에 위치한 댐을 위주로 감소되었고 저수시 오차에서 2001년과 2002년 자료에 있어서는 모두 감소되었다.

3. 모형의 검증 및 연불수지 분석

모형의 검증을 위하여 보정을 통해 결정된 매개변수값을 이용해 타년도의 유출을 모의하였다.

또한 9개 제어지점에서 유량의 계산치와 관측치를 비교하여 고수시 상대오차와 저수시 절대오차를 분석한 결과, 고수시 검증결과에 따르면 상대오차의 평균값이 보정자료와 비슷한 크

기의 오차로 나타남으로써 검증결과는 만족스럽다고 할 수 있다. 저수시 검증결과도 보정자료에 비해 절대오차가 그리 크지 않으며, 9개 지점 전부에서의 절대오차는 보정 자료에 비해 월등히 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 한강유역 9개 지점의 고수 및 저수시의 검증 결과는 대체적으로 만족스런 결과를 보이고 있다.

본 연구에 적용된 SSARR 모형은 최신버전(Y2K)으로서 이전까지 국내에 적용된 DC(depletion curve) 유역모형과는 달리 IS(integrated snowband) 유역모형을 적용하였다. IS 유역모형은 DC 모형의 모든 기능을 포함하고 있는 동시에 장기간의 유출해석에 대한 기능을 대폭 보완시킨 것으로서 차단에 대한 모의기능과 장기적 회귀지하수 추적기능 및 증발산 모의기능을 개선시킨 것이다. 또한 추후 저수관리시스템에 갖추어져야 할 대화식 구동방식인 Interactive(IA)방식이 도입되어 키보드를 통한 기존방식인 Batch(BA)방식과 서로 병행하여 사용할 수 있게 하였다. 특히 SSARR 모형에서 물수지 분석에 관한 출력자료가 제공된다는 것인데, 2000년 모의결과를 보면 각 소유역에서 월별 물수지 계산결과가 강우량, 차단량, 증발산량 및 유출량 등의 항목으로 구분되어 일목요연하게 정리되어 있는데, 이로부터 연물수지 결과를 얻기 위하여 길이단위(cm)로 나타내진 결과를 유역면적을 고려하여 부피단위(m<sup>3</sup>)로 환산하였다.

2000년의 경우 총 강우량의 39.1%가 각각 차단과 증발산에 의해 손실되고 있으며 직접유출량은 51.7%, 기저유출량은 15.2%를 각각 차지하고 있다. 여기서 손실량과 총유출량의 합이 총 강우량을 초과하는 이유는 회귀지하수유출의 저류시간이 길어 전년도와 차년에까지 영향이 있기 때문이다.

### III. 결 론

본 연구의 I보와 II보의 결과를 요약하면 다음과 같다.

한강수계내 용수이용 상황과 상류댐의 물리적 특성을 반영할 수 있는 SSARR 모형을 기본모형으로 선정하였다. 대상수계인 한강수계를 24개의 소유역으로 구분하였고 소유역별 강우자료 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 결과를 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 첨두부를 제어하며 저류시간 매개변수를 변화하여 저수부와 지체시간을 제어하여야 할 것이다. 민감한 변수 순으로 9개 제어지점에서의 관측치와의 오차가 최소가 되도록 시행착오방법에 의해 최적 매개변수값을 추정하였다. SSARR에서 제공하고 있는 연물수지 분석결과에 의하면 2000년의 경우 총강우량의 39.1%가 차단, 증발산에 의해 손실되었으며, 직접유출량은 51.7%, 기저유출량은 15.2%로 총 66.9%가 유출되고 있다. 향후, 본 연구에 의해 도출된 결과는 한강수계 통합 물관리를 위한 기반 기술로 활용될 것이다.