

SSARR-8 모형을 이용한 낙동강 수계의 저수유출 해석

Low Flow Analysis of the Nakdong River Basin by SSARR-8 Model

강 주 환* / 이 길 성** / 김 남 일*** / 황 만 하****

Kang, Ju Whan / Lee, Kil Seong / Kim, Namil / Hwang, Man Ha

Abstract

The SSARR model adopting IS(integrated snowband) watershed model is applied to the Nakdong River basin for low flow analysis. The IS watershed model is added to new version of the SSARR which has functions of simulating evapotranspiration, infiltration and lower zone routing. It provides annual water budget informations as an output file and can be operated by interactive mode. Sensitivity analysis for both cases of high and low flows was carried out, which becomes the knowledge base for model calibration. Model verification was performed using the relative errors of high flows and absolute errors of low flows at the control points. Monthly water budget analysis was done by IS watershed model, and it reveals that runoff coefficient is 52.6%.

Keywords: low flow analysis, SSARR-8 model, IS watershed model, water budget analysis

요 지

낙동강 유역의 저수유출 해석을 위해 IS(integrated snowband) 유역모형이 포함된 SSARR 모형을 적용하였다. IS 유역모형은 증발산, 침투 및 장기회귀 지하수 추적기능이 추가된 최신 버전으로서 연물수지분석에 관한 정보가 출력되며 대화식 구동방식인 IA(interactive)방식도 내재되어 있다. 고수시와 저수시 민감한 매개변수를 민감도 분석결과 도출할 수 있었고, 이를 토대로 모형의 보정이 이루어졌다. 7개 제어지점에서 유량의 관측치와 계산치를 비교하여 고수시 상대오차와 저수시 절대오차를 통하여 모형의 검증에 수행하였다. IS 유역모형을 사용하여 월별 물수지 분석을 수행하였다.

핵심용어 : 저수유출 해석, SSARR-8 모형, IS 유역모형, 물수지 분석

* 목포대학교 토목공학과 조교수

** 서울대학교 토목공학과 교수

*** 서울대학교 토목공학과 박사과정

**** 한국수자원공사 선임연구원

1. 서 론

유역환경이 우리와 유사한 일본에서 개발되었기 때문에 과거에는 저수유출모형으로 Tank모형(Sugawara 등, 1984)이 널리 사용되어 왔다(김현영과 박승우, 1988; 박승우, 1993). 그러나 이 모형은 black box 적 성격 때문에 모형개선이 쉽지 않고 저수지 조작 기능이 미비되어 있어 근래에는 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 모형이나 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System) 모형과 같이 토양함수량에 관한 실제 기구를 명시적 개념화한 모형에 대한 적용성 검토가 시도되고 있다. 그런데 NWSRFS 모형은 시간간격의 제약성 때문에 홍수기의 수문예보에 더욱 적합한 모형으로서 국내에서도 홍수사상을 모의한 경우(Cho 등, 1995) 외에 저수유출 모의에 적용된 경우는 거의 찾아볼 수 없다. 이러한 배경하에 본 연구에서는 낙동강 유역의 저수 유출해석을 위한 모형으로서 유역의 기후와 지형적 특성을 감안하고 입력자료의 양과 질을 고려하여 SSARR 모형을 선정하였다. SSARR 모형은 미국 공병단(Corps of Engineers)에서 1956년 처음 개발된 이래, 1975년 유역 및 하도추적에 대한 기본 골격을 갖추었으며(SSARR-4), 이후 Integrated Snowband(IS) 유역모형과 운영예보(operational forecasting)기능이 추가되어(SSARR-8) 현재에 이르고 있는 모형으로서 저수지 조작, 대유역의 실시간 일유출예보 등의 목적으로 널리 사용되고 있다. 유역추적모형과 하도추적모형 외에 저수지 조작(reservoir regulation) 모형까지 포함된 이 모형은 미국의 Columbia 강(Rockwood, 1961)과 베트남의 Mekong 강(Rockwood, 1968) 등과 같은 대하천에 성공적으로 적용된 바 있으며, 국내에서도 강주환(1986)이 한강유역에, 안상진과 이용수(1989)가 금강수계인 보청천유역에, 그리고 한국수자원공사(1996)에서 낙동강유역에 각각 적용한 바 있다. 강우 뿐 아니라 강설에 따른 유출계산도 가능한 SSARR 모형은 집중 매개변수 모형으로서 24개 이상의 매개변수를 시행착오방법에 의해 최적값을 찾게 된다. 계산시간간격은 6분에서 24시간까지 중에서 선택할 수 있고, Nemeč (1986)의 수문예보모형의 분류에 따르면 개념적 토양함수량 산정 모형 중 지표(index) 사용모형에 해당되며 SMI(soil moisture index), ETI(evapotranspiration index), BII(base-flow infiltration index) 등과 같이 몇 개의 매개변수가 지표형태로 주어지게 된다.

2. IS 유역모형

최근까지 국내에 적용된 SSARR 모형은 1975년 이전 버전인 SSARR-4인데, 여기서 채택하고 있는 유역모형은 DC(depletion curve) 유역모형이다. 최근 버전인 SSARR-8은 DC 유역모형 외에 IS 유역모형이 추가되어 두 가지 유역모형을 선택적으로 사용할 수 있게 되었다. IS 유역모형은 산악지형에서 강설에 대한 유출해석 기능을 대폭 강화시킨 것으로서 DC 모형의 모든 기능이 포함되어 있으며, 특히 강우만의 해석시 저수유출관리와 같은 장기적 모의에 유용하도록 차단해석기능과 장기적인 회귀지하수의 추적기능이 추가되었고, 증발산량 산정시 기온, 해발고도, 월별 강우량, 적설유무 및 토양함수량 등과 같은 구체적인 자료로부터 결정되도록 증발산량 산정 기능이 보완되었으며 유역별 연물수지분석 결과가 도표로 출력되는 기능도 포함하고 있다.

IS 유역모형은 한개의 유역을 고도별로 1-20개의 띠로 분할하여 적설량과 같이 고도와 밀접한 관계를 갖는, 즉 변량을 보다 정확하게 모의하기 위해 개발된 것이며, 강우에 따른 유출만을 해석할 경우에도 고도에 따른 강우량과 토양함수량 및 기온에 따른 증발산량의 변화를 고려한 유출해석이 가능한 모형이다. 입력자료는 free-format으로 입력이 가능하며 유역명을 비롯한 모든 지명이 숫자 뿐 아니라 문자로도 입력할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 향상된 SSARR 모형의 IS 유역모형의 기능을 충분히 활용하여 낙동강 유역의 저수유출 해석을 시행하였다.

유역모형과 하도모형에서 채택하고 있는 기본적인 추적방법은 Nash 모형과 유사한 cascade of reservoir 방법으로서, 유입량이 연속된 일련의 저수지를 통과함으로써 유출량이 평행이동 및 지체효과를 갖게되는 방법이다. 각 저수지의 추적에는 연속방정식 (1)과 저류방정식 (2)가 사용된다.

$$I_t = O_t + \frac{dS_t}{dt} \quad (1)$$

$$S_t = T_s O_t \quad (2)$$

여기서, I_t 와 O_t 는 각각 임의의 시각 t 에서의 유입량과 유출량이고, S_t 는 저류량이며, T_s 는 저류시간(time of storage)이다. 식 (1)은 식 (3)으로 표현할 수 있으며, 식 (2)를 식 (3)에 대입하면 식 (4)와 같은 추적식을 얻게 된다.

$$[(I_1 + I_2)/2 - (O_1 + O_2)/2] \Delta t = S_2 - S_1 \quad (3)$$

$$O_2 = O_1 + \Delta t(I_m - O_1)/(T_s + \Delta t/2) \quad (4)$$

여기서, 하침차 1, 2는 각각 계산시간 시작점과 끝점이고, I_m 은 평균유입량, Δt 는 시간간격이다.

유역, 하도 및 저수지 추적시의 매개변수는 가상저수지의 갯수와 각 저수지의 저류시간(T_s)이 있는데, 유역모형에서는 저류시간이 직접 입력되지만 하도모형에서는 저류시간을 다음 식 (5)와 같이 유량의 함수로 표현한다. 즉, 식 (2)를 참고하면 SSARR 모형의 유역모형은 선형이지만 저수지를 포함한 하도모형은 비선형임을 알 수 있다.

$$T_s = \frac{KTS}{I^n} \quad (5)$$

여기서, KTS 는 시행착오방법에 의해 결정되는 상수이고, I 는 유입유량, n 은 -1에서 1 사이의 값을 갖는

계수이다. 본 유역모형의 흐름도를 Fig. 1에 제시하였는데, 이를 간략히 설명하면 다음과 같다. 유역내에 위치한 측후소에서 얻어진 강수량과 기온자료로부터 각 띠별 강수량과 기온을 산정한다. 차단에 의한 손실을 제외한 띠별 강수량에 대하여 강우와 강설로 구분하여 강설시에는 기온에 따라 해빙된 수분총량을 유역별로 합산한다. 이 수분량은 SMI(soil moisture index)에 따라 일부는 유출되고 나머지는 토양수분의 증대에 기여하게 되며 이는 증발산에 의해 손실되기도 한다.

유출량은 BII(baseflow infiltration index)에 의해 직접유출과 기저유출로 구분된다. 직접유출량은 다시 S-SS(surface-subsurface)에 따라 지표수유출과 복류수유출로 구분되며, 기저유출은 LZ(lower zone)에 의해 지하수유출과 회귀 지하수유출로 나뉘게 되어 4가지의 각 유출량은 전술한 추적방법에 의해 각각 독립적으로 산정되어 하도로의 유입량이 된다.

3. 입력자료의 선정

3.1 기준 매개변수

민감도분석을 시행하기 전에 분석대상 매개변수의 종류와 그 기준값을 설정해야 하는데, 수문모형에서 설정되는 매개변수는 크게 물리적 매개변수(physical parameter)와 수문기상 매개변수(hydrometeorologic parameter) 및 내부처리 매개변수(process parameter)로 구분될 수 있다(Fleming, 1977). SSARR 모형에서 결정되어야 할 매개변수 중 주요변수를 다음과 같이 설정하였다.

(1) 물리적 매개변수

기존 연구성과물의 활용을 위하여 낙동강수계의 유역을 건설부 보고서(1987)와 동일한 24개 소유역으로 분할하였으며(Fig. 2), 강우 관측소 역시 보고서에서와 동일한 56개소의 지점을 선정하였다. SSARR 모형에 입력될 소유역과 하도 및 댐의 연결관계를 Fig. 3에 도시하였다. 또한 한 개의 소유역을 여러개의 밴드로 분할하는 IS 유역모형에는 고도별 면적비가 입력되어야 하는데 고도별 유역면적과 고도별 면적비를 각각 조사·입력하였다. 저수지 특성자료로는 수문이 있어 저수지 조작이 가능한 안동댐, 임하댐, 합천댐 및 남강댐 등 4개 댐의 방류량을 입력하였다.

(2) 수문기상 매개변수

모형의 보정을 위해 선택된 강우사상은 평수해인 '93년과 갈수해인 '94년 자료인데 결측치에 대해서는 RDS(Reciprocal Distance Squared)방법을 통해 보

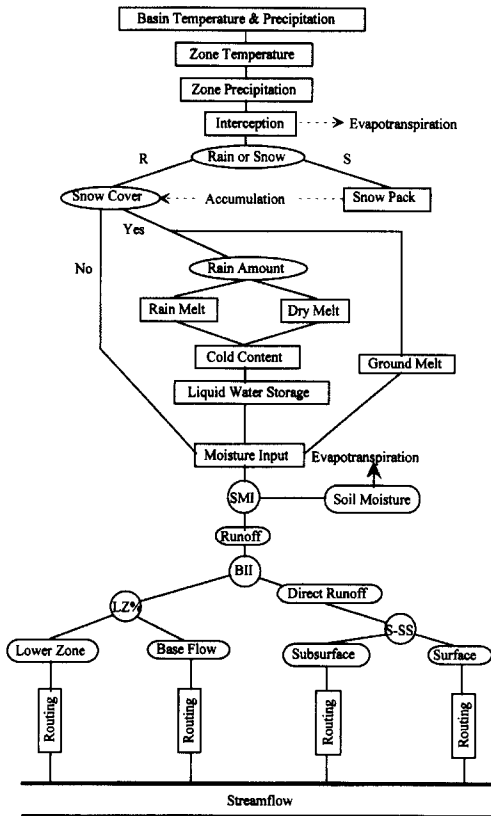


Fig.1. SSARR 'Snowband' Watershed Model

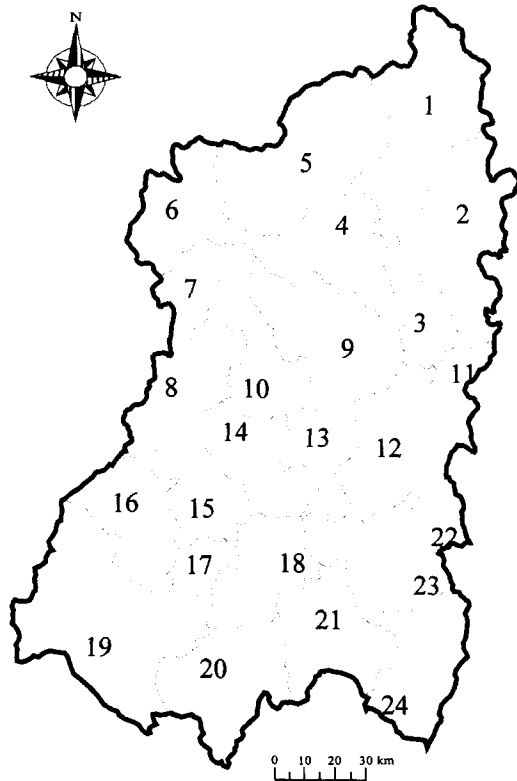


Fig.2. Division Map for Sub-basin of Nakdong River Watershed

정하였고, 고도별 면적비와 고도별 강우 가중치(한국수자원공사, 1996)를 이용하여 Thiessen방법에 의해 산정된 단순 평면상의 유역평균 강우량을 보정하였다. 또한 차단량 산정과 위도, 월(month), 고도, 강우강도 및 적설량에 따른 증발산 보정량과 관련된 매개변수에 대해서는 SSARR 사용자 지침서 (1991)의 변수설명 부분과 적용에 부분을 참조하여 설정하였으며 특히 증발산량 보정에 필요한 기온자료로 낙동강 유역의 월평균 기온자료를 사용하였다.

SSARR 모형에서 IS 유역모형의 가장 큰 장점 중의 하나가 강설에 대한 모의이다. 강설에 대한 모의를 위해서는 강설량, 적설심, 적설선의 고도 등 적설량과 관계된 자료 뿐 아니라 지온과 강우에 의한 용설자료 및 결빙자료 등 방대한 자료가 요구되는데, 낙동강 유역에서의 이러한 자료는 매우 미미한 실정이다. 낙동강 수계에서의 연간 강설량은 강수량의 2.3% 정도에 불과하며 1월 강수량의 약 28% 정도에 해당하는 적은 양이며

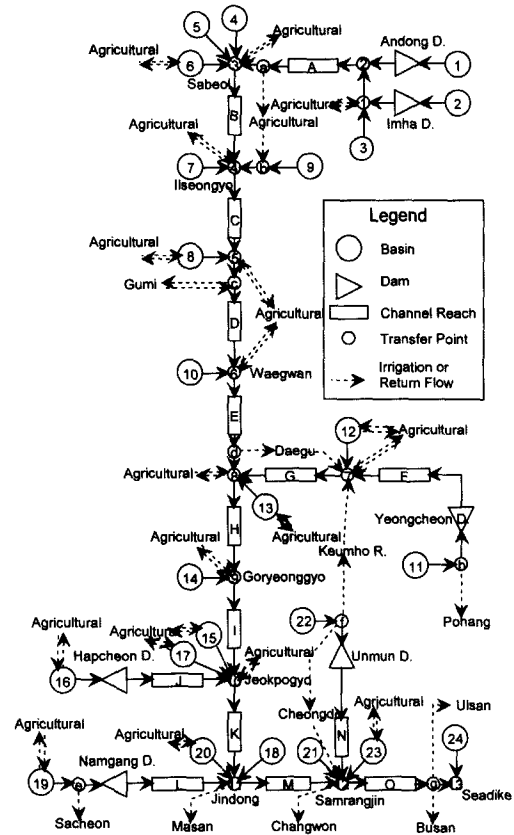


Fig.3. Configuration of the Nakdong River Basin used with the SSARR Model

상당부분이 증발에 의해 손실되므로 강설에 의한 유출 기여율은 무시할 수 있을 정도로 적기 때문에 강설에 대한 모의는 생략하였다.

(3) 내부처리 매개변수

SSARR 모형에서 가장 민감한 변수 중 하나인 SMI-ROP 도표를 유역별로 산정하기 위하여 우선 초기치로서 한국수자원공사 보고서(이순탁, 1989)를 참조하여 유역별 SMI-ROP 도표를 CN값에 따라 3개의 중유역으로 나누어 CN값이 62인 1번 소유역에서 9번 소유역까지와 CN값이 63인 10번 소유역에서 18번 소유역까지, 그리고 CN값이 64인 19번 소유역에서 24번 소유역까지로 분리·적용하였으며 이는 모형의 보정을 통해 개선된다. 침투량별 지하수 유입률인 BII-BFP 도표와 지표수와 복류수 분리에 관한 S-SS 도표 역시 한국수자원공사 보고서(이순탁, 1989)를 참조하여 SMI와 동일하게 전체 소유역을 3개로 나누어 적용하였다.

Table 1. 하도추적에 관한 매개변수

하도명	하도구간	길이 (km)	표고차 (m)	도달시간 (hr)	저수지 수효	저류시간 (hr)	유량 (CMS)	KTS
A	안동교~사벌	64.5	38.0	28.8	5	5.75	20	10.47
B	사벌~낙동	25.4	6.8	19.0	2	9.50	20	17.30
C	낙동~선산	35.7	8.7	25.6	3	8.54	20	15.55
D	선산~왜관	30.9	5.8	25.3	3	8.45	20	15.38
E	왜관~성서	16.7	3.5	15.1	2	7.56	30	14.93
F	영천댐~동촌	56.6	93.5	17.5	4	4.37	20	7.96
G	동촌~성서	28.0	13.7	16.2	2	8.12	20	14.78
H	성서~고령교	25.0	5.3	16.6	2	8.30	40	17.36
I	고령교~적포교	40.2	7.4	31.3	3	10.42	50	22.79
J	합천~적포교	48.7	76.1	15.9	4	3.98	20	7.25
K	적포교~진동	30.4	2.6	33.9	3	11.29	60	25.60
L	남강댐~진동	81.1	20.2	47.8	6	7.96	20	14.49
M	진동~삼랑진	38.8	4.1	37.7	3	12.56	70	29.38
N	운문댐~삼랑진	60.5	107.2	17.9	5	3.58	20	6.52
O	삼랑진~하구연	47.5	4.8	44.8	4	11.20	80	26.91

BII에 관련된 기타 매개변수인 BIITS, BIIMX, BFLIM 및 회귀지하수와 관련된 PBLZ, DGWLM 등의 기준값은 SSARR 사용자 지침서 (1991)에 제시되어 있는 값을 사용하였다.

유역추적에서의 매개변수로는 가상저수지의 수효와 저류시간이 있으며 각 매개변수의 기준값은 유역면적과 유로연장 및 도달시간 등을 참고하여 산정하였다. 하도추적에서도 유역추적과 마찬가지로 연속된 가상저수지의 추적방법이 사용되는 바, 가상저수지의 수효와 저류시간이 매개변수가 된다. 유역추적과 다른 점은 가상저수지의 저류시간 T_c 가 식 (5)와 같이 결정되는 것이다. 가상저수지의 수효와 KTS 및 n 값의 일반적인 산정절차는 다음과 같다.

- 1) n 값을 가정한다. 0.20을 취하는 것이 통상적이다.
- 2) 총저류시간을 결정한다. 이는 근사적으로 도달시간과 일치한다(선형화도의 경우 완전 일치).
- 3) 가상저수지의 수효를 결정한다. 보통 8-16 km 당 1개로 한다. 이로부터 각 가상저수지당 저류시간을 구할 수 있다.
- 4) 식 (5)로부터 KTS를 구한다.

낙동강에서의 구간별 도달시간은 미국 개척국(USBR)에서 개발한 다음 식(6)을 검증자료의 제약성 때문에 수정없이 그대로 사용하였다.

$$T_c = (0.871 \frac{L^3}{H})^{0.385} \quad (6)$$

여기서 T_c 는 도달시간(hr), L 은 하도길이(km), H 는 표고차(m)이다. 이렇게 구한 도달시간에 해당하는 유량을 실측 유량-도달시간관계(건설부, 1987)를 참조

하여 저류시간을 비롯한 각종 매개변수와 함께 Table 1에 제시하였으며, 이때 n 값은 0.20으로 고정하였다.

3.2 물수지 자료

유황모형의 정확성을 제고하기 위해서 유역내의 물수지 분석이 수행되어야 하는데 이를 위해서는 도수를 통한 소유역간 또는 낙동강 유역 밖으로 이동되고 있는 농업용수 및 생공용수의 수량피악이 선행되어야 한다. 대부분의 농업용수와 본류구간에서 취수되고 있는 구미용수 및 운문댐에서 취수되는 청도용수 등은 각 소유역 내에서 취수되어 해당 소유역에서 회수되는 경우인데 이와는 달리 소유역간 또는 낙동강 유역 밖으로 용수가 이동되는 경우가 있다.

유역간 용수이동상황을 살펴보면 관개기인 5월에서 9월까지 풍양, 양서 펌프장에서 취수되어 농업용수가 부족한 위천유역으로 이동되는 경우와 같이 취수된 농업용수가 타소유역으로 이동된 후 타하도로 유출되는 경우가 있고, 왜관 하류부의 본류에서 취수되어 대구로 공급되는 경우 및 운문댐 저류지에서 취수되어 광역 상수도 계획에 따라 대구로 이동되는 수량 등 소유역간 이동양상이 있으며, 영천댐에서 취수되어 형산강 유역인 포항의 생공용수를 공급하는 경우와 홍수시 남강댐에서 사천으로 방류되는 경우 및 진동·본포·원동 및 물금취수장에서 취수되어 각각 마산·창원·울산 및 부산 등의 생공용수를 공급하게 되는 경우 등 유역 밖으로 유출되는 경우가 있다. 이러한 취배수 양상을 1.0 CMS 이상인 경우에 대해서만 농업용수(농업용수인 경우 Agricultural이라고 명시)와 생공용수에 대하여 Fig. 3에 나타내었으며

각 취수장별 생공용수의 취수실적을 조사하여 입력하였다. 한편 생공용수와는 달리 농업용수의 실제 실적량은 파악되어 있지 않은 실정이며 단순히 농경지의 면적과 재배작물의 종류에 따른 용수소모량에 의해 간접적으로 산정할 수 있다. 농업용수 자료의 선형 회귀분석에 의하면 연도별 농업용수 수요량의 감소율은 약 0.6%를 보이고 있으며, 모형에 입력될 농업용수 자료는 소유역별·하도구간별로 추정된 '88년 농업용수 이용현황자료(이순탁, 1989)로부터 '93년과 '94년에 대해 각각 3.0%와 3.6% 감소된 양으로 추정하였다.

유역 또는 하도구간에서 취수된 용수는 해당 유역과 하도로 환원되는 경우와 타유역 또는 타하도로 배수되는 경우로 나눌 수 있으며, 이러한 회귀수율(환원을 및 배수율)은 하도의 물수지 분석에서 매우 중요한 요소이다. 그러나 낙동강 유역에서 이러한 회귀수율을 산정할 수 있는 동시측정된 유량과 취수량 관측치가 없는 실정 이기에 회귀수율은 취수량의 일정비율(회귀수율)로 산정하게 된다. 취수에 의한 회귀수율은 물의 용도에 따라 상이하며 계절별로도 크게 변화한다. 실제 낙동강 저수관리 프로그램에서는 생공용수에 대해서 환원율과 배수율을 각각 80%와 60%로 가정하여 사용하고 있으며 농업용수는 성수기(3월~8월)에 30~40%, 비성수기(8월~11월)에 60~80%로 가정하여 사용하고 있다.

농업용수 및 생공용수의 취수에 대한 모의를 위해 SSARR 모형에서는 가상적인 유역을 만들어 취수량 만큼을 음(-)의 수량으로 유출되는 형식으로 모의할 수 있다. 또한 회귀수율에 있어서는 회귀되는 지점에 회귀 수량이 유출되도록 모의할 수 있는데, 이때 농경지의 저류효과를 고려하기 위하여 비교적 저류시간이 긴 가상적인 하도를 거친 후 유출되도록 한다.

4. 모형의 보정

변수추정을 위해서는 각 소유역에서 유출량의 계산치와

관측치 자료로부터 유역별 매개변수가 결정되어야 하지만 몇 개소의 제어지점을 제외한 대부분의 관측자료가 부실하거나 수위-유량곡선의 신빙성이 다소 결여되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에 표시된 7개 제어지점 즉 사벌, 일선교, 왜관, 고령교, 적포교, 진동 및 삼랑진에서의 결과만으로 변수를 보정하였다.

4.1 민감도분석

3.1절에서 언급된 세가지 종류의 매개변수 중 내부처리 매개변수에 해당하는 매개변수에 대하여 한 개의 소유역을 선정하여 각 매개변수별로 민감도분석을 실시하였는데, 민감도분석의 기준값은 3.1절에서 산정한 값으로 하였으며 이를 Table 2에 제시하였다. 선정된 소유역은 8번인데 이는 중상류에 위치하고 있으며 유역면적이 전체평균에 가까운 소유역이다. 분석에 사용된 수문 기상자료는 '93년 자료와 가뭄이 심했던 '94년 자료 중 최대유량값을 보이는 시기를 전후로 한 한달간의 자료를 선정하였다.

민감도분석을 위한 각 매개변수의 범위는 SSARR 사용자 지침서(USACE, 1991)을 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 0.15 cm/hr 증감시킨 값에 대하여 각각 분석을 실시하였다. 이들을 포함하여 유역유출과 관련된 제반 매개변수의 기준값과 범위 및 민감도를 고수시는 Table 3, 그리고 저수시는 Table 4에 각각 제시하였다. 민감도의 지표유량으로서 고수시는 첨두유량을 그리고 저수시는 직접유출이 끝나는 시점(변곡점 직후로서 '93년은 20일, '94년은 13일)에서의 유량을 각각 선정하였다. 여기서 민감도는 식 (7)과 같이 매개변수의 증감량에 대한 유량변화량의 기하평균값으로 정의된다.

Table 2. 내부처리 매개변수의 민감도분석을 위한 기준치

SMI	SMI (cm)	0	1	2	3	4	5	6	999
	ROP (%)	7	17	39	62	79	87	100	100
BII	BII (cm/day)	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	100.0
	BFP (%)	43	15	13	12	11	10	10	10
BIITS : 40 hr, 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	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	
PBLZ	50 %								
T _s (hr)	surface:3, subsurface:10, baseflow:100, lower zone:1,000								

Table 3. 유역유출과 관련된 매개변수의 고수시 민감도분석

매개변수	범위	침투유량(CMS)		민감도	
		'93 자료	'94 자료	'93 자료	'94 자료
SMI	SMI1	446.0	75.6	0.48	0.37
	SMI2	502.9	81.4		
	SMI3	541.4	87.5		
BII	BII1	520.3	84.2	0.08	0.10
	BII2	502.9	81.4		
	BII3	495.5	78.7		
S-SS	S-SS1	539.5	81.3	0.06	0.00
	S-SS2	502.9	81.4		
	S-SS3	516.8	81.5		
BIITS	30 hr	506.7	82.8	0.03	0.06
	40 hr	502.9	81.4		
	50 hr	499.5	80.3		
BIIMX	1 cm/day	485.3	81.4	0.04	0.00
	3 cm/day	502.9	81.4		
	5 cm/day	502.9	81.4		
BFLIM	0.08cm/day	503.2	81.4	0.00	0.00
	0.13cm/day	502.9	81.4		
	0.18cm/day	502.9	81.4		
PBLZ	25 %	507.5	83.7	0.02	0.06
	50 %	502.9	81.4		
	75 %	498.4	79.2		
T_s (surface)	2 hr	535.2	81.1	0.14	0.01
	3 hr	502.9	81.4		
	4 hr	513.9	81.3		
T_s (subsurface)	8 hr	523.7	81.8	0.15	0.02
	10 hr	502.9	81.4		
	12 hr	504.5	81.0		
T_s (baseflow)	50 hr	517.5	86.0	0.04	0.09
	100 hr	502.9	81.4		
	150 hr	498.8	79.3		
T_s (lower zone)	500 hr	503.2	81.2	0.00	0.02
	1,000 hr	502.9	81.4		
	1,500 hr	503.5	82.3		

$$\sqrt{\frac{[\frac{(Q_u - Q_o)/Q_o}{(P_u - P_o)/P_o}]^2 + [\frac{(Q_o - Q_l)/Q_o}{(P_o - P_l)/P_o}]^2}{2}} \quad (7)$$

여기서 Q 와 P 는 각각 유량과 매개변수값을 나타내며 하첨자 o, u, l 은 각각 전술한 지표값과 상한값 및 하한값을 의미한다. Table 3과 Table 4에서 볼 수 있듯이 SMI는 고수와 저수를 막론하고 가장 민감한 변수임이 입증되었으며, 고수시는 지표수와 복류수의 저류시간, 저수시는 BII, 지하수 중 회귀지하수가 차지하는 비율인 PBLZ, 지하수의 저류시간 등이 민감한 매개변수임이 확인되었다.

유역추적 매개변수에는 지표수, 복류수, 지하수 및 회귀지하수 등 4가지 흐름장에 대하여 각 흐름장의 가상 저수지의 수효와 저류시간이 있다. 이들 매개변수는 유

Table 4. 유역유출과 관련된 매개변수의 저수시 민감도분석

매개변수	범위	저수유량(CMS)		민감도	
		'93 자료	'94 자료	'93 자료	'94 자료
SMI	SMI1	19.3	7.5	0.42	0.43
	SMI2	21.8	8.4		
	SMI3	22.5	8.9		
BII	BII1	19.5	7.0	0.31	0.52
	BII2	21.8	8.4		
	BII3	24.0	9.9		
S-SS	S-SS1	21.1	8.6	0.03	0.02
	S-SS2	21.8	8.4		
	S-SS3	22.2	8.4		
BIITS	30 hr	22.0	8.3	0.03	0.08
	40 hr	21.8	8.4		
	50 hr	21.7	8.6		
BIIMX	1 cm/day	24.8	8.4	0.15	0.00
	3 cm/day	21.8	8.4		
	5 cm/day	21.3	8.4		
BFLIM	0.08 cm/day	21.7	8.4	0.01	0.00
	0.13 cm/day	21.8	8.4		
	0.18 cm/day	21.8	8.4		
PBLZ	25 %	27.3	10.9	0.51	0.58
	50 %	21.8	8.4		
	75 %	16.2	6.0		
T_s (surface)	2 hr	21.0	8.3	0.11	0.08
	3 hr	21.8	8.4		
	4 hr	22.6	8.7		
T_s (subsurface)	8 hr	21.2	8.4	0.13	0.00
	10 hr	21.8	8.4		
	12 hr	22.3	8.4		
T_s (baseflow)	50 hr	16.4	8.7	0.36	0.27
	100 hr	21.8	8.4		
	150 hr	20.6	6.8		
T_s (lower zone)	500 hr	23.4	8.4	0.10	0.15
	1,000 hr	21.8	8.4		
	1,500 hr	21.9	9.3		

역면적과 평균 지표면 유출거리 및 경사, 그리고 지체 시간, 토지이용상태 및 토양의 상태에 따라 다르게 산정되어야 하는데, 민감도분석과 시행착오적 방법에 의해 결정되는 것이 통상적인 방법이다. 일반적으로 저류시간이 짧아질수록 침투유량은 커지며 침투발생시간은 빨라지게 되는데, 지표수에 대해서 저류시간을 2시간~4시간까지 한시간 간격으로 변화시켜 가며 그에 따른 유출수문곡선의 변화양상을 살펴본 결과 '93년 자료에 있어서 저류시간 3시간에 비해 2시간일 경우 약 32 CMS의 침투유량 상승이 있었으며 '94년의 경우에는 별 변화가 없는 등 고수와 저수시 모두 민감도가 그리

큰 값을 보이지는 않고 있다. 한편 유역에서의 저류시간을 일정한 상수로 하지 않고 유량의 함수로 설정할 수도 있는데 이렇게 하면 저류시간이 유량증가에 따라 작아진다는 실제현상에 더욱 부합하게 된다. '93년 자료에서 지표수의 저류시간을 유량의 함수로 부여한 결과 100 CMS 이상의 침투유량 상승이 야기되어 저류시간이 2시간으로 일정한 경우보다 훨씬 더 큰 상승을 볼 수 있다. 그 이유는 저류시간을 유량의 함수로 함으로써 침투시간 직전기간 동안 유량의 집중효과가 있기 때문으로 판단된다. '94년의 결과를 보면 유출량이 100 CMS 이하이기에 저류시간이 유량의 함수인 경우에도 저류시간이 3시간으로 일정한 경우와 저류시간 자체에 있어 별 차이가 없게 되므로 침투유량도 미소한 차이만을 보이게 된다.

북류수에 대해서도 저류시간이 8시간~12시간까지 두 시간 간격으로 변화시킨 일정한 경우와 저류시간이 유량의 함수인 경우에 대하여 각각 모의한 결과 그 변화양상은 고수시와 저수시 모두 지표수의 경우와 유사하게 나타났다. 지하수와 회귀지하수의 경우에는 저류시간이 일정한 경우에 대해서만 검토하였는데 그 결과는 대체적으로 침투유량에 미치는 영향은 미소한 정도이지만 Table 4에서 볼 수 있듯이 저수시 민감도가 지하수의 경우 상당히 크게 나타났으며 회귀지하수의 경우에도 적지 않게 나타났다. 하도추적 매개변수에는 가상저

수지의 수효와 n , 그리고 KTS 가 있는데 이들의 기준 값은 n 이 0.2인 상태에서 Table 1에 제시한 바 있다. 유역추적의 민감도분석과 마찬가지로 가상저수지의 수효를 고정한 상태에서 n 과 KTS 에 대한 민감도분석을 실시하였다. 모든 조건은 Table 1과 동일하게 한 상태에서 n 에 대한 민감도분석 결과를 Table 5에 제시하였다. 여기서 n 값이 변하면 Table 1에서 저류시간은 변하지 않도록 KTS 의 값이 따라 변하게 된다. n 의 범위는 -1.0~1.0 사이로 알려져 있는데 n 이 음의 값을 가질 경우 식 (5)에서 볼 수 있듯이 유량이 증가할 때 저류시간도 증가하게 되므로 하류로 갈수록 침투유량은 작아질 수 있는데 이는 Table 3의 침투관측유량과 상반된 결과를 보이게 된다.

하류로 갈수록 침투유량의 증가폭을 크게 하기 위해서는 n 값을 증가시켜야 하지만 저류시간이 유량과 무관해지는 n 값이 0일때를 제외한 나머지 경우에서 보듯이 n 값이 0.2에서 0.1 증가시킨 이후에는 n 값의 증가에 따른 침투유량의 증가는 미소하였다. 또한 n 값을 0.2로 한 상태에서 Table 1의 KTS 를 각각 10%, 50%, 90%, 150% 및 200%를 취하였을 때 이로 인한 침투유량의 변화를 Table 6에 제시하였는데, 이를 보면 KTS 의 증가에 따른 침투유량의 감소는 두드러지지 않으나 KTS 가 감소할 경우 침투유량의 변화는 1% 이내로 극히 미소하였다.

Table 5. 하도특성 매개변수 n 에 대한 민감도분석

제어지점	침투관측유량 (CMS)	침투계산유량(CMS)					
		$n=0.0$	$n=0.1$	$n=0.2$	$n=0.3$	$n=0.4$	$n=0.5$
사별	2.196	2.622	2,511	2,643	2,689	2,694	2,694
일선교	3.387	2.811	2,716	2,834	2,862	2,864	2,864
왜관	3.715	3.006	2,839	2,993	3,057	3,072	3,081
고령교	5.879	3.415	3,232	3,392	3,461	3,475	3,483
적포교	5.611	3.776	3,527	3,750	3,821	3,832	3,837
진동	7.763	4.369	3,987	4,370	4,417	4,422	4,424
삼랑진	7.570	4.926	4,139	4,765	4,972	4,991	4,993

Table 6. 하도특성 매개변수 KTS 에 대한 민감도분석

제어지점	침투관측유량 (CMS)	침투계산유량(CMS)				
		$KTS \times 0.1$	$KTS \times 0.5$	$KTS \times 1.0$	$KTS \times 1.5$	$KTS \times 2.0$
사별	2,196	2,694	2,694	2,689	2,513	2,039
일선교	3,387	2,864	2,864	2,862	2,749	2,212
왜관	3,715	3,088	3,088	3,057	2,902	2,178
고령교	5,879	3,490	3,490	3,461	3,311	2,446
적포교	5,611	3,842	3,842	3,821	3,654	2,649
진동	7,763	4,422	4,424	4,417	4,300	2,865
삼랑진	7,570	4,987	4,989	4,972	4,648	3,397

4.2 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 본 과업의 목적이기도 한 저수시의 정확도가 저하될 수 있다. 후자의 경우는 정반대로 저수시 위주로 매개변수가 결정되므로 고수시 유량은 전혀 반영되지 못할 소지가 있다. 따라서 앞에서도 언급했듯이 고수시와 저수시를 분리하여 각각에 대해 선정된 민감한 매개변수를 통해 독립적인 모형의 보정절차가 가장 합당하다고 사료되어 목적함수 선정에 있어서도 고수시와 저수시를 구분하였다. 즉, 고수시에는 SMI와 유역에서의 저류시간을 통해 수위-유량 관계곡선의 신뢰도가 떨어지는 삼랑진을 제외한 6개 제어지점에서 연최대유량에 대한 상대오차를 최소로 하는 것을 목적함수로 선정하였고, 저수시에는 BII, PBLZ 및 지하수의 저류시간을 통해 기저유출이 지속되는 기간 위주로 6개 제어지점에 대해서 각 지점별 풍수량 이하에 해당되는 유량의 평균절대오차의 최소화를 역시 목적함수로 선정하였다. 그러나 일유출모형이라는 한계 때문에 시시각각 큰 변화를 보이는 고수시 유량에 대해 변수추정을 통한 정확도의 증진은 크게 기대할 수 없으며, 신빙성 있는 소유역별 유량관측자료가 결여되어 있다는 점에서 저수시의 변수추정도 한계가 있다. 그러므로 모형의 정확한 보정은 장기간의 소유역 유출자료가 축적된 후로 미루고 현단계에서는 6개 제어지점에서의 유출량 자료만을 근거로 하여 기설정된 보정방향과 민감도분석 결과에 따라 시행착오적인 방법으로 매개변수를 결정하였다.

'93년 자료와 '94년 자료에 의한 민감도 분석결과에 따라 내부처리 매개변수 중 고수시 또는 저수시에 민감도가 큰 SMI와 T_s , 그리고 BII와 PBLZ 등을 제외한 나머지 매개변수는 처음에 설정한 기준값으로 고정하였다. 철두유량에 큰 영향을 미치는 SMI와 유역추적 매개변수 중 유량의 함수로 설정되는 T_s 에 대해 저수시 결과까지 감안한 상태에서 수차례의 시행착오를 통해 Table 7과 Table 8과 같이 각각 그 값을 결정하였다.

Table 7에서 SMI-A는 왜관지점 상류부분인 1번

유역에서 10번유역까지의 곡선이며 SMI-B는 11번유역에서 24번유역까지의 곡선이다. 또한 Table 8에서 TS와 TSS는 각각 지표수흐름과 복류수흐름의 저류시간으로서 유역 구분 없이 모든 유역에 동일한 곡선으로 적용된다. 저수시 보정에 있어서도 고수시의 결과를 감안한 상태에서 시행착오를 통해 BII, PBLZ 및 지하수, 회귀지하수의 T_s 등을 결정하였다. 최종적으로 결정된 BII를 Table 9에 제시하였고 PBLZ는 변화가 없으며 지하수와 회귀지하수의 T_s 는 각각 150 hr와 1,500 hr로 결정하였다.

Table 7. 최종 SMI-ROP 도표

SMI (cm)	ROP(%)	
	SMI-A	SMI-B
0	10	10
1	15	25
2	25	35
3	45	55
4	65	75
5	75	85
6	80	90
10	100	100
999	100	100

Table 8. 최종 유량별 T_s 값

유량 (CMS)	T_s (hr)	
	TS	TSS
0	10	13
10	8	11
15	7	10
20	6	9
40	5	8
100	4	7
400	3	6
1000	2	5

Table 9. 최종 BII-BFP 도표

BII (cm/日)	BFP(%)		
	BII-a	BII-b	BII-c
0.0	40	41	39
1.0	15	16	14
1.5	13	14	12
2.0	12	12	11
2.5	11	11	10
3.0	10	10	10
5.0	10	10	10
100.0	10	10	10

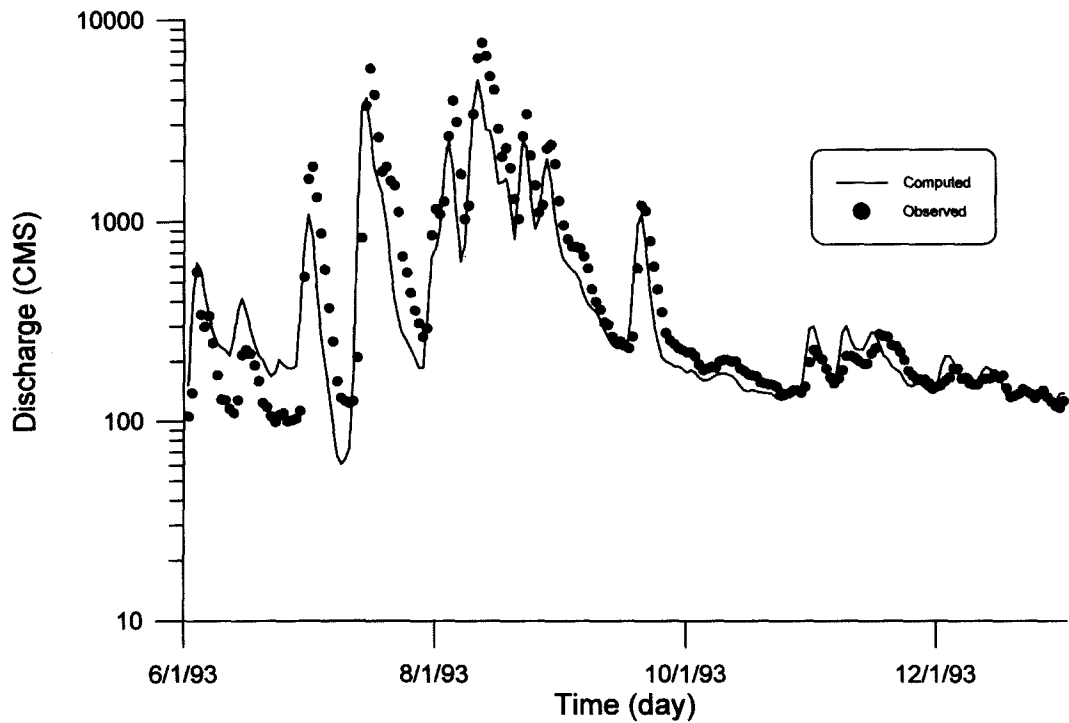


Fig. 4. Results for '93 Data at Jindong with the SSARR Model(after Calibration)

Table 10. 보정전 고수시 오차

지점	1993자료			1994자료		
	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)
사벌	2,196	1,806	17.8	1,394	1,403	0.6
일선교	3,387	2,228	34.2	1,241	1,493	20.3
왜관	3,715	2,434	34.5	940	1,374	46.2
고령교	5,879	2,891	50.8	1,648	1,248	24.3
적포교	5,611	3,121	44.4	1,307	1,191	8.9
진동	7,763	3,799	51.1	1,418	1,119	21.1
평균			38.8			20.2

Table 11. 보정후 고수시 오차

지점	1993자료			1994자료		
	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)
사벌	2,196	2,400	9.3	1,394	1,509	8.2
일선교	3,387	2,872	15.2	1,241	1,546	24.6
왜관	3,715	3,252	12.5	940	1,537	63.5
고령교	5,879	4,032	31.4	1,648	1,444	12.4
적포교	5,611	4,438	20.9	1,307	1,291	1.2
진동	7,763	5,051	34.9	1,418	1,333	6.0
평균			20.7			19.3

Table 12. 저수시 오차 (단위 : CMS)

지점	보정전		보정후	
	1993년	1994년	1993년	1994년
사벌	23.3	28.0	23.8	24.7
일선교	33.4	15.5	33.5	13.7
왜관	36.9	46.4	27.1	43.5
고령교	50.0	32.9	57.0	35.6
적포교	54.8	30.2	56.2	22.4
진동	40.8	48.9	51.6	44.9
평균	39.9	33.7	41.5	30.8

이와 같이 최종적으로 결정된 매개변수에 의한 '93년 자료의 진동에서의 결과를 Fig. 4에 제시하였으며 보정 전후의 고수시 오차를 각각 Table 10과 Table 11, 그리고 저수시 오차를 Table 12에 제시하였다. 이를 보면 고수시 오차가 상당량 감소되었으며 저수시 오차도 '94년 자료에 있어서는 다소 감소되었으나 '93년 자료에 있어서는 고령교 이하의 하류부에서 보정전 결과에 비해 약간 열등한 결과를 보이고 있다.

5. 모형의 검증 및 연물수지 분석

5.1 모형의 검증

모형의 검증을 위하여 보정을 통해 결정된 매개변수 값을 이용해 타년도의 유출을 모의하였다. 갈수가 심했던 '92년을 검증대상으로 선정하였으며, 진동지점에서의 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 또한 7개 제어지점에서 유량의 계산치와 관측치를 비교하여 고수시 상대오차와 저수시 절대오차를 Table 13에 제시하였다.

Table 13. 모형의 검증결과

지점	고수시 오차			저수시 오차 (CMS)
	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	
사별	808	717	11.3	27.4
일선교	2,545	1,196	53.0	45.0
왜관	1,788	1,745	2.4	18.1
고령교	2,160	2,416	11.9	38.2
적포교	2,094	2,713	29.6	36.4
진동	2,415	2,972	23.1	58.1
평균			21.9	37.2

고수시 검증결과에 따르면 상대오차의 평균값이 보정자료에 비해 다소 오차가 크게 나타났으나 일선교 지점의 침투유량의 관측치가 다른 지점의 관측치에 비해 매우 큰 점으로 미루어 관측치의 신빙성이 떨어진다고 판단되므로 고수시 검증결과는 만족스럽다고 할 수 있다.

저수시 검증결과도 보정자료에 비해 절대오차가 그리 크지 않아 대체적으로 만족스런 결과를 보이고 있다. 또한 이러한 결과가 Tank모형과 같은 기존 모형의 결과에 비해 눈에 띄게 증진된 결과는 아니지만 차후 양질의 입력자료가 구축되었을 때에는 본 모형을 적용할 경우 매개변수 결정 과정에 있어서 한층 객관적이고 구체적인 방법을 제시한다는 점에서 모형의 결과가 타모형에 비해 우수한 결과를 기대할 수는 있을 것이다.

5.2 연물수지 분석

본 연구에 적용된 SSARR 모형은 최신버전('91)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 기능

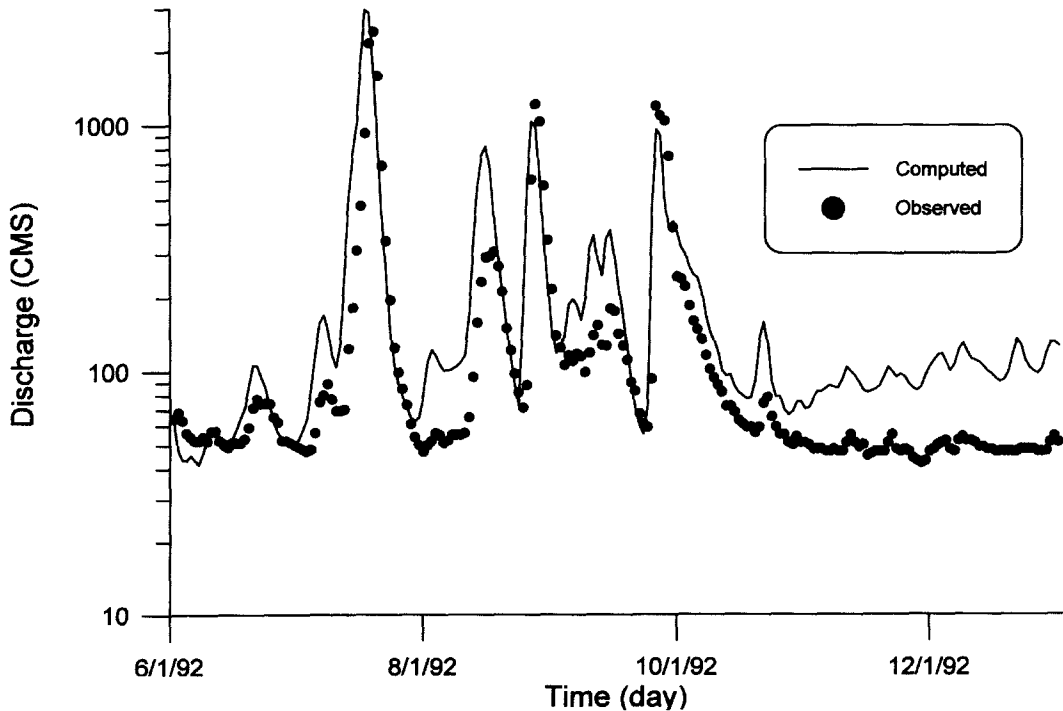


Fig. 5. Results for '92 Data at Jindong with the SSARR Model(after Verification)

을 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 모형의 현버전에 추가된 내용 중의 하나는 물수지 분석에 관한 출력자료가 제공된다는 것인데, '93년 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 피피단위(m³)로 환산하여 Table 14에 제시

하였다. 낙동강유역의 예년평균강우량 1167.0 mm보다 다소 많은 1316.8 mm의 강우가 발생한 '93년의 경우 총 강우량의 50.3%가 각각 차단과 증발산에 의해 손실되고 있으며 직접유출량은 39.6%, 기저유출량은 13.0%를 각각 차지하고 있다. 이를 개념적인 모식도로 작성하면 Fig. 6과 같으며, 여기서 손실량과 총유출량의 합이 총 강우량을 초과하는 이유는 회귀지하수유출의 저류시간이 길어 전년도와 차년도에까지 영향이 있기 때문이다. 계산된 총유출을 52.6%는 소유역의 유출량의 총합을 의미하므로 낙동강 전체 유역의 출구인 하구언에서 계산된 유출량과는 의미가 다르다. 하지만 유역출구에서의 유출량은 댐의 방류량이나 농업·생·공용수에 대한 정확한 값을 알고 있어야 하므로 위에서 계산된

Table 14. 연물수지 계산결과 ('93년)

유역 번호	유역면적 (km ²)	강우량 (10 ⁸ m ³)	차단량 (10 ⁸ m ³)	증발산량 (10 ⁸ m ³)	유출량(10 ⁸ m ³)				
					지표수	복류수	지하수	회귀수	총유출
1	1583.5	19.84	3.90	7.45	3.46	3.30	1.35	1.12	9.24
2	1360.5	16.97	3.35	6.06	3.16	2.94	1.07	0.91	8.08
3	604.3	8.05	1.30	2.59	1.60	1.59	0.53	0.47	4.18
4	1038.5	14.82	2.22	4.62	3.18	3.05	1.00	0.73	7.96
5	1806.7	24.48	4.12	8.16	5.49	5.03	1.64	1.42	13.58
6	911.4	14.27	2.06	4.60	3.11	3.00	1.03	0.98	8.11
7	419.7	6.50	0.90	2.08	1.34	1.33	0.46	0.42	3.55
8	1000.1	13.00	2.42	4.25	2.58	2.45	0.79	0.71	6.52
9	1408.7	17.24	3.04	6.09	3.17	3.05	1.11	0.95	8.29
10	941.0	11.89	2.24	3.75	1.70	2.76	0.82	0.71	5.99
11	234.6	3.03	0.49	0.93	0.46	0.76	0.21	0.20	1.63
12	1309.3	15.43	2.92	4.97	2.15	3.52	1.07	0.95	7.68
13	544.0	6.59	1.20	2.14	0.89	1.47	0.48	0.43	3.26
14	767.6	10.05	1.71	3.14	1.48	2.41	0.72	0.63	5.25
15	781.1	10.88	1.80	3.13	1.71	2.83	0.77	0.68	6.00
16	924.6	13.08	2.29	3.90	2.10	3.46	0.91	0.80	7.27
17	401.0	6.07	0.95	1.73	0.94	1.55	0.46	0.41	3.36
18	808.3	10.43	1.86	3.18	1.54	2.55	0.76	0.69	5.53
19	2285.0	11.90	5.42	4.74	0.44	1.04	0.46	0.90	2.84
20	1181.3	17.72	2.84	4.80	2.49	6.05	1.33	1.23	11.10
21	976.4	14.59	2.31	4.13	2.03	5.07	1.10	1.00	9.19
22	301.5	3.27	0.69	1.09	0.31	0.74	0.21	0.19	1.45
23	1145.8	15.83	2.74	4.59	2.04	4.96	1.15	1.03	9.18
24	921.3	13.86	2.18	3.85	1.91	4.60	1.06	0.98	8.56
합	23656.2	299.82	54.94	95.96	49.29	69.52	20.47	18.53	157.82
비율		100.00	18.32	32.01	16.44	23.19	6.83	6.18	52.64

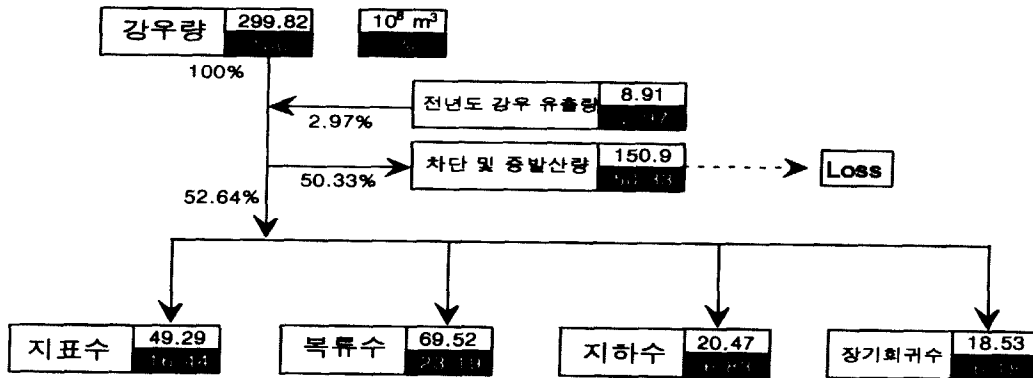


Fig.6. Mean Annual Water Balance(1993)

소유역 유출량의 총합은 나름의 의미를 가진다고 할 수 있다. 이 값을 기존의 결과와 비교하면 54.6%(이순탁, 1989)에 비해 다소 작게 산정되고 있으며, 49% (한국건설기술연구원, 1990), 42%(한국건설기술연구원, 1993)에 비해서는 다소 크게 산정되고 있다.

6. 결 론

SSARR 모형의 유역모형으로 기존의 DC모형 대신 IS모형을 낙동강 유역에 적용한 결과 다음과 같은 연구 결과를 도출하였다.

(1) 저수유출과 같은 일유출 모의시 증발산량과 차단량의 산정이 중요시되는데 IS유역모형의 적용으로 이들을 현실성 있게 산정할 수 있었으며, 특히 장기 회귀지하수 추적기능의 설정으로 인해 보다 정확한 저수유출을 모의할 수 있었다.

(2) 민감도분석 결과 SMI는 고수 및 저수에 모두 민감하였고 지표수와 복류수의 저류시간을 유량의 함수로 할 경우 상수로 고정시킨 경우와 비교해 볼 때 저수시뿐만 아니라 특히 고수시 민감한 결과를 보이고 있다. 저수시에는 SMI를 비롯해 BII, PBLZ 및 지하수의 저류시간 등이 민감한 매개변수로 확인되었다.

(3) 민감한 변수 순으로 삼량진을 제외한 6개 제어지점에서의 관측치와의 오차가 최소가 되도록 시행착오 방법에 의해 최적 매개변수값을 추정하였다.

(4) SSARR 최신버전에서 제공하고 있는 연물수지 분석결과에 의하면 1993년의 경우 총강우량의 50.3%가 차단, 증발산에 의해 손실되었으며, 직접유출량은 39.6%, 기저유출량은 13.0%로 총 52.6%가 유출되고 있다.

감사의 글

본 연구는 '낙동강 수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발(분석모델부분)' 용역의 일부로서 한국수자원공사의 재정적 지원에 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

강주환 (1986). 강우-유출모형에 의한 가지야마 공식의 한계성 검토. 석사학위논문, 서울대학교.
 건설부 한강홍수통제소 (1987). 낙동강 홍수예경보 및 저수관리 프로그램개발 최종보고서(저수관리부문).
 김현영, 박승우 (1988). "관개용 저수지의 일별유입량과 방류량의 모의발생." 한국농공학회지, 한국농공학회, 제30권, 제1호, pp. 50-62.
 박승우 (1993). "Tank모형 셀프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제26권, 제3호, pp. 47-61.
 안상진, 이용수 (1989). "SSARR 모형에 의한 유역유출 해석." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제22권, 제1호, pp. 109-116.
 이순탁 (1989). 낙동강수계 다목적댐 연계운영방안 연구(1차) 보고서. 한국수자원공사.
 한국건설기술연구원 (1990). 수자원 장기 종합계획(91-2011). 한국수자원공사.
 한국건설기술연구원 (1993). 21세기를 바라보는 水資源展望. 한국수자원공사.
 한국수자원공사 (1996). 낙동강 수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발 (분석모델 부분).
 Cho, W.C., Bae, D.H., and Seo K.W. (1995).

- "A comparison of flood forecasting systems in south Korea and USA." *Reduction of natural and environmental disasters in water environment*. Proc. of the International Joint Seminars, Seoul National Univ., Seoul, Korea, 45-54.
- Fleming, G. (1977). *Computer simulation techniques in hydrology*. Elsevier, pp. 55-57.
- Nemec, J. (1986). *Hydrological forecasting*. D. Reidel Publishing Company.
- Rockwood, D.M. (1961). "Columbia basin streamflow routing by computer." *Transactions*, American Society of Civil Engineers, No. 3119.
- Rockwood, D.M. (1968). "Application of streamflow synthesis and reservoir regulation-SSARR"-Program to the lower Mekong river." *The Use of Analog and Digital Computer in Hydrology Symposium*, International Association of Scientific Hydrology, UNESCO, pp. 329-344.
- Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E. and Katsuyama, Y. (1984). *Tank model with snow component*.
- USACE (1991). *SSARR User manual*. North Pacific Div., Portland.
- Wood, E.F. (1980). *Real-time forecasting /control of water resource systems*. Pergamon Press.

〈최종본 접수일 : 1997년 12월 24일〉