

SSARR-8 模型을 이용한 洛東江 水系의 低水流出 解析

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

강주환*, ○김남일**, 이길성***, 황만하****

1. 서론

과거에는 저수유출모형으로 유역환경이 우리와 유사한 일본에서 개발된 Tank모형(Sugawara et al., 1984)이 널리 사용되어 왔다(김현영과 박승우, 1988; 박승우, 1993). 그러나 이 모형은 'black box'적 성격 때문에 모형 개선이 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 et al., 1995) 외에 저수유출 모의에 적용된 경우는 거의 찾아볼 수 없다. SSARR 모형은 미국 공병단(Corps of Engineers)에서 1956년 처음 개발되었으며, 유역추적모형과 河道追跡模型 외에 貯水池操作(reservoir regulation) 모형을 포함한다. 이 모형은 미국의 Columbia 江(Rockwood, 1961)과 베트남의 Mekong 江(Rockwood, 1968) 등과 같은 대하천에 성공적으로 적용된 바 있으며, 국내에서도 강주환(1986)이 한강유역에, 안상진과 이용수(1989)가 錦江水系인 보청천유역에, 그리고 한국수자원공사(1989)에서 낙동강유역에 각각 적용한 바 있다.

2. IS 流域模型

최근까지 국내에 적용된 SSARR 모형은 1975년 이전 버전인 SSARR-4이며, 최근 버전인 SSARR-8은 DC 유역모형 외에 IS 유역모형이 추가되어 두 가지 유역모형을 선택적으로 사용할 수 있게 되었다. IS 유역모형은 산악지형에서 降雪에 대한 유출해석 기능을 대폭 강화시킨 것으로서, 降雨만의 해석시 低水流出管理와 같은 長期的 模擬에 유용하도록 遮斷解析기능과 장기적인 回歸地下水의 추적기능이 추가되었다. 또한 蒸發散 기능이 대폭적으로 보완되었으며 유역별 연물수지분석 결과가 도표로 출력되는 기능도 포함하고 있다. 본 연구에서는 향상된 SSARR-8 모형의 IS 유역모형을 충분히 활용하여 낙동강 유역의 저수유출 해석을 시행하였다.

유역모형과 하도모형에서 채택하고 있는 기본적인 추적방법은 Nash 모형과 유사한 'cascade of reservoir' 방법이다. 각 저수지의 추적에는 連續方程式과 貯留方程式을 사용하여 다음과 같은 식이 사용된다.

$$[(I_1 + I_2)/2 - (O_1 + O_2)/2] \Delta t = S_2 - S_1 \quad (1)$$

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

1 목포대학교 토목공학과 조교수
2 서울대학교 토목공학과 박사과정
3 서울대학교 토목공학과 교수
4 한국수자원공사 선임연구원

여기서, I 와 O 는 각각 임의의 시각 t 에서 유입량과 유출량이고, S 는 저류량이며, T_s 는 저류시간 (time of storage)이다. 하첨자 1, 2는 각각 계산시간 시작점과 끝점이고, I_m 은 평균유입량, Δt 는 시간간격이다.

유역, 하도 및 저수지 추적시의 매개변수는 상저수지의 갯수와 각 저수지의 저류시간 (T_s)이 있는데, 유역모형에서는 저류시간이 직접 입력되지만 하도모형에서는 저류시간을 $T_s = KTS/I^n$ 과 같이 유량의 함수로 표현한다. 여기서, KTS 는 시행착오방법에 의해 결정되는 常數이고, I 는 유입유량, n 은 -1에서 1 사이의 값을 갖는 계수이다. 본 유역모형의 흐름도를 Fig. 1에 제시하였다.

3. 入力資料의 選定

3.1 기준 매개변수

水文模型에서 설정되는 媒介變數는 크게 物理的 매개변수(physical parameter)와 수문기상 매개변수(hydro-meteorologic parameter) 및 내부처리 매개변수(process parameter)로 구분될 수 있다(Fleming, 1977).

(1) 물리적 매개변수

기존 연구성과물의 활용을 위하여 낙동강수계의 유역을 건설부 보고서(1987)와 동일한 24개 小流域으로 분할하였으며, 강우 관측소 역시 보고서에서와 동일한 56개소의 지점을 선정하였다. SSARR 모형에 입력될 소유역과 하도 및 댐의 연결관계를 Fig. 2에 도시하였다.

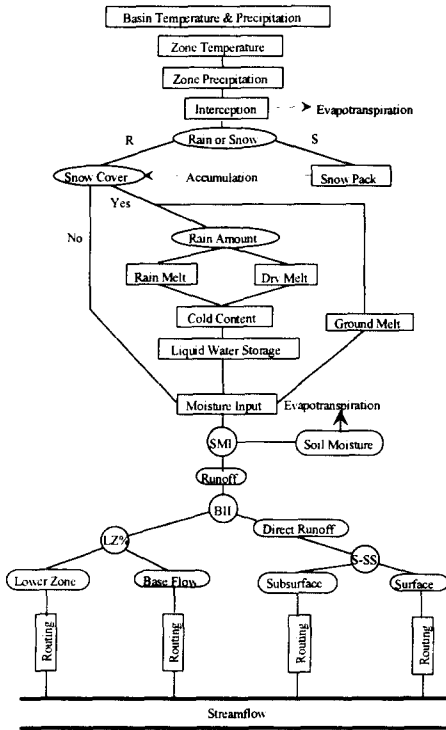


Fig. 1. SSARR 'Snowband' Watershed Model

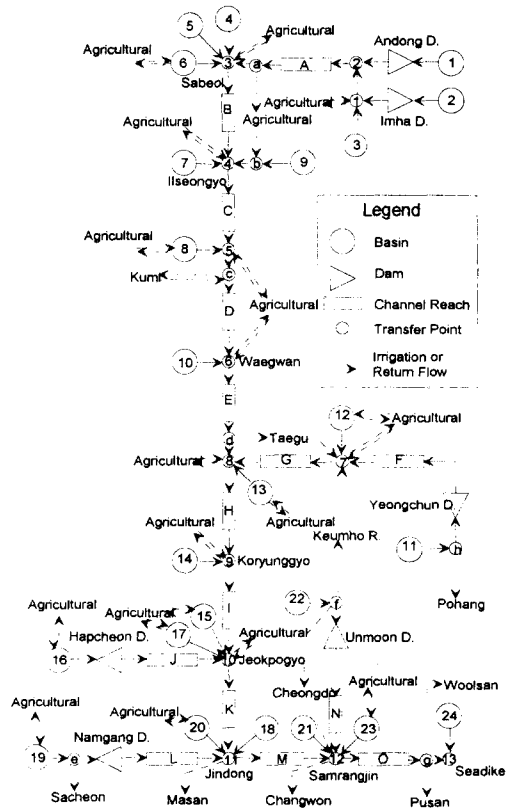


Fig. 2. Configuration of the Nakdong River Basin used with the SSARR Model

(2) 수문기상 매개변수

모형의 보정을 위해 선택된 강우사상은 평수해인 '93년과 갈수해인 '94년 자료인데 결측치에 대해서는 RDS(Reciprocal Distance Squared)방법을 통해 보정하였고, 고도별 면적비와 고도별 강우 가중치를 이용하여 Thiessen방법에 의해 산정된 단순 평면상의 유역평균 강우량을 보정하였다. 또한 차단량 산정과 위도, 월별, 고도, 강우강도 및 적설량에 따른 증발산 보정량과 관련된 매개변수에 대해서는 SSARR Manual (1991)의 변수설명 부분과 적용예 부분을 참조하여 설정하였다.

(3) 내부처리 매개변수

SSARR 모형에서 가장 민감한 변수 중 하나인 SMI-ROP 도표를 유역별로 산정하기 위하여 우선 초기치로서 한국수자원공사 보고서(1989)를 참조하여 유역별 SMI-ROP 도표를 CN값에 따라 3개의 중유역으로 나누어 분리·적용하였으며 이는 모형의 보정을 통해 개선된다. 침투량별 지하수 유입률인 BII-BFP 도표와 지표수와 복류수 분리에 관한 S-SS 도표 역시 한국수자원공사 보고서(1989)를 참조하여 SMI와 동일하게 전체 소유역을 3개로 나누어 적용하였다. BII에 관련된 기타 매개변수인 BIITS, BIIMX, BFLIM 및 회귀지하수와 관련된 PBLZ, DGWLIM 등의 기준값은 SSARR Manual (1991)에 제시되어 있는 값을 사용하였다. 유역추적에서의 매개변수로는 가상저수지의 수효와 저류시간이 있으며 각 매개변수의 기준값은 유역면적과 유로연장 및 도달 시간 등을 참고하여 산정하였다.

3.2 물수지 자료

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. 이러한 取配水 양상을 농업용수와 생공용수에 대하여 Fig. 2에 나타내었으며 각 취수장별 생공용수의 취수실적을 조사하였다. 한편 생공용수와는 달리 농업용수의 실제 실적량은 파악되어 있지 않은 실정이며 단순히 농경지의 면적과 栽培作物의 종류에 따른 용수소모량에 의해 간접적으로 산정할 수 있다. 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.

4. 模型의 補正

4.1 敏感度分析

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 표 1에 제시하였다.

표 1. 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								

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. 민감도의 지표유량으로서 高水時は 침투유량을 그리고 低水時は 직접유출이 끝나는 시점(변곡점 직후로서 '93년은 20일, '94년은 13일)에서의 유량을 각각 선정하였다. 여기서 민감도는 매개변수의 增減量에 대한 유량변화량의 幾何平均값으로 정의된다.

SMI는 高水와 低水를 막론하고 가장 민감한 변수임이 입증되었으며, 고수시는 지표수와 복류수의 저류시간, 저수시는 BII, 지하수 중 회귀지하수가 차지하는 비율인 PBLZ, 지하수의 저류시간 등이 민감한 매개변수임이 확인되었다. 또한 n값을 0.2로 한 상태에서 KTS를 각각 10%, 50%, 90%, 150% 및 200%를 취하였을 때 이로 인한 침투유량의 변화를 계산하였는데, 이를 보면 KTS의 증가에 따른 침투유량이 크게 감소하였다.

4.2 媒介變數의 決定

목적함수로는 관측치와 계산치의 오차를 최소화하는 형태의 것을 취하는 것이 통상적이며, 오차는 絕對誤差와 相對誤差로 구분할 수 있다. 그러나 前者의 경우 유량이 큰 홍수기의 오차를 감소시키는 방향으로 매개변수가 결정될 우려가 있어 본 과업의 목적이기도 한 低水時の 정확도가 저하될 수 있다. 後者の 경우는 정반대로 低水時 위주로 매개변수가 결정되므로 高水時 유량은 전혀 반영되지 못할 소지가 있다. 따라서 앞에서 언급했듯이 高水時와 低水時를 분리하여 각각에 대해 선정된 민감한 매개변수를 통해 독립적인 모형의 보정절차가 가장 합당하다고 思料되어 목적함수 선정에 있어서도 高水時와 低水時를 구분하였다.

'93년 자료와 '94년 자료에 의한 민감도 분석결과에 따라 내부처리 매개변수 중 高水時 또는 低水時에 민감도가 큰 SMI와 Ts, 그리고 BII와 PBLZ 등을 제외한 나머지 매개변수는 처음에 설정한 기준값으로 고정하였다. 침투유량에 큰 영향을 미치는 SMI와 유역추적 매개변수 중 유량의 함수로 설정되는 Ts에 대해 低水時 결과까지 감안한 상태에서 수차례의 시행착오를 통해 값을 결정하였다. 이와 같이 최종적으로 결정된 매개변수에 의한 '93년 자료의 진동에서의 결과를 Fig. 3에 제시하였으며 보정전후의 高水時 오차를 각각 표 2에, 低水時 오차를 표 3에 제시하였다. 이를 보면 高水時 오차가 상당량 감소되었으며 低水時 오차도 '94년 자료에 있어서는 다소 감소되었으나 '93년 자료에 있어서는 고령교 이하의 하류부에서 보정전 결과에 비해 약간 열등한 결과를 보이고 있다.

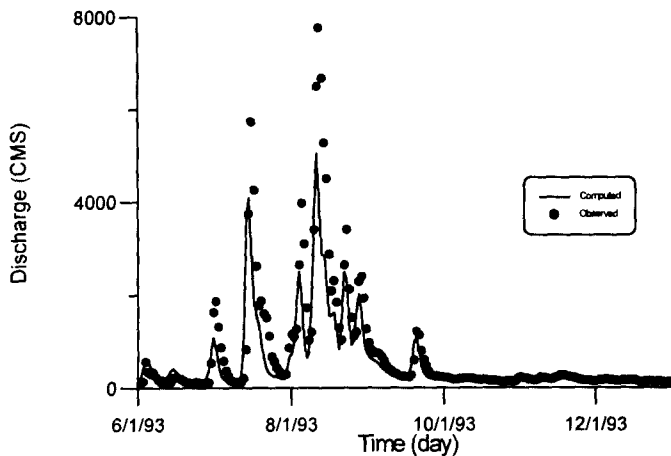


Fig. 3. Result for '93 Data at Jindong with the SSARR Model (After Calibration)

표 2. 補正前·後 高水時 誤差

지점	補正前						補正後					
	1993자료			1994자료			1993자료			1994자료		
	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)
사 별	2,196	1,806	17.8	1,394	1,403	0.6	2,196	2,400	9.3	1,394	1,509	8.2
일선교	3,387	2,228	34.2	1,241	1,493	20.3	3,387	2,872	15.2	1,241	1,546	24.6
왜 관	3,715	2,434	34.5	940	1,374	46.2	3,715	3,252	12.5	940	1,537	63.5
고령교	5,879	2,891	50.8	1,648	1,248	24.3	5,879	4,032	31.4	1,648	1,444	12.4
적포교	5,611	3,121	44.4	1,307	1,191	8.9	5,611	4,438	20.9	1,307	1,291	1.2
진 동	7,763	3,799	51.1	1,418	1,119	21.1	7,763	5,051	34.9	1,418	1,333	6.0
평균			38.8			20.2			20.7			19.3

표 3. 低水時 誤差 (단위 : CMS)

지점	補正前		補正後	
	1993년	1994년	1993년	1994년
사 별	23.3	28.0	23.8	24.7
일선교	33.4	15.5	33.5	13.7
왜 관	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
진 동	40.8	48.9	51.6	44.9
평균	39.9	33.7	41.5	30.8

5. 모형의 검증 및 연물수지 분석

5.1 모형의 검증

모형의 검증을 위하여 보정을 통해 결정된 매개변수값을 이용해 타해년도의 유출을 모의하였다. 갈수가 심했던 '92년을 검증대상으로 선정하였으며, 진동지점에서 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 또한 7개 제어지점에서 유량의 계산치와 관측치를 비교하여 고수시 상대오차와 저수시 절대오차를 표 4에 제시하였다.

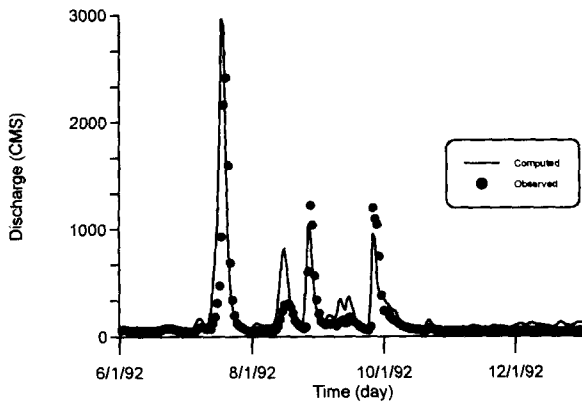


Fig. 4. Results for the '92 Data at Jindong with the SSARR Model (for Verification)

표 4. 모형의 검증결과

지점	高水時 誤差			低水時 誤差 (CMS)
	관측유량 (CMS)	계산유량 (CMS)	상대오차 (%)	
사 별	808	717	11.3	27.4
일선교	2,545	1,196	53.0	45.0
왜 관	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
진 동	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.

5.2 연물수지 분석

SSARR 모형의 현버전에 추가된 내용 중의 하나는 소유역의 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 부피 단위(m^3)로 환산하여 계산하였다. 낙동강유역의 예년평균강우량 1167.0 mm보다 다소 많은 1316.8 mm의 강우가 발생한 '93년의 경우 총 강우량의 18.3%와 32.0%가 각각 차단과 증발산에 의해 손실되고 있으며 직접 유출량은 39.6%, 기저유출량은 13.0%를 각각 차지하고 있다. 여기서 손실량과 총유출량의 합이 총강우량을 초과하는 이유는 회귀지하수유출의 저류시간이 길어 전년의 강우가 차년도에까지 영향을 미치기 때문이다.

6. 結論

SSARR 모형의 유역모형으로 기존의 DC모형 대신 IS모형을 낙동강 유역에 적용한 결과 다음과 같은 연구결과를 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 高水 및 低水에 모두 민감하였고 지표수와 복류수의 저류시간을 유량의 함수로 할 경우 常數로 고정시킨 경우와 비교해 볼때 低水時 뿐만 아니라 특히 高水時 민감한 결과를 보이고 있다. 低水時에는 SMI를 비롯해 BII, PBLZ 및 지하수의 저류시간 등이 민감한 매개변수로 확인되었다.

3. SSARR 최신버전에서 제공하고 있는 연물수지 분석결과에 의하면 1993년의 경우 총강우량의 18.3%가 차단, 32.0%가 증발산에 의해 손실되었으며, 직접유출량은 39.6%, 기저유출량은 13.0%로 총 52.6%가 유출되고 있다.

謝辭

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

참고문헌

- 강주환 (1986). 강우-유출모형에 의한 가지야마 공식의 한계성 검토. 공학석사 학위논문, 서울대학교 대학원.
- 건설부 한강홍수통제소 (1987). 낙동강 홍수예경보 및 저수관리 프로그램개발 최종보고서(저수관리부문).
- 김현영, 박승우 (1988). 관개용 지수지의 일별유입량과 방류량의 모의발생. 한국농공학회지, 30(1), 50-62.
- 박승우 (1993). Tank모형 셀프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정. 한국수문학회지, 26(3), 47-61.
- 안상진, 이용수 (1989). SSARR 모형에 의한 유역유출 해석. 한국수문학회지, 22(1), 109-116.
- 한국수자원공사 (1989). 낙동강수계 다목적댐 연계운영방안 연구 (1차) 보고서.
- Cho, W. C., Bae, D. H., and Seo K. W. (1995). "A comparison of flood forecasting systems in south Korea and USA." in "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." American Society of Civil Engineers, Transactions, No.3119.
- Rockwood, D. M. (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, 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.