

유역물수지모형(WWASS)에 의한 임의 하천지점에서 일별 유출량의 모의발생

Daily Runoff Simulation at River Network by the WWASS (Watershed Water balance And Streamflow Simulation) Model

김 현 영* / 황 철 상* / 강 석 만* / 이 광 야*

Kim, Hyun Young / Hwang, Cheol Sang / Kang, Seok Man / Lee, Kwang Ya

Abstract

When various elements of water balance are displayed at several points of a river network, the runoff amounts at an estuary especially tidal influenced are affected from the elements. This problem can be solved by a model that can generalize and formulate the elements and simulate daily runoff and water requirement. The WWASS model was built using DIROM for the simulation of daily runoff and water requirement, and the water balance elements were modeled to be balanced at the each control point of river network. The model was calibrated, verified and applied to the watershed for the Saemankeum tidal land reclamation development project. It showed that the results from the streamflow simulation at the Mankyung and Dongjin estuary were acceptable for the design of the Saemankeum estuary reservoir.

Keywords : watershed water balance, daily runoff, river network, return flow, control point, inflow model, water requirement model

요 지

여러 소하천으로 이루어지는 수계에서 복잡한 물수지 요소가 여러 지점에서 발생하는 하천 말단 특히 감조지역에 수자원 시설물을 설치하고자 할 때 유입량의 추정이 문제가 되며 물수지 요소의 변동에 따라 말단의 유출량이 영향을 받는다. 이러한 문제는 하천의 유입·유출요소의 정형화를 필요로하며 소유역의 일유출량 추정 모형을 필요로 한다. WWASS 모형은 일별 유입량과 필요수량 추정 모형으로써 DIROM을 사용하고 있고 물수지 요소들을 하천의 조절점(control point)을 중심으로 처리하도록 되어있다. WWASS 모형을 새만금지구 유역에서 보정과 검정을 거친 후 만경강과 동진강 하구지점에 적용한 결과 바람직한 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 유역물수지, 일별 유출량, 하천망, 회귀수, 조절점, 유입량 모형, 공급량 모형

* 농어촌진흥공사 조사설계처

1. 서론

하천빈도나 하천밀도는 유역내 단위면적당의 하천의 갯수나 하천길이를 표현된다(Chow, 1964). 이는 하천의 유역이 여러 소하천의 하천망(river network)으로 구성됨을 의미하며 일종의 광의의 수자원 시스템으로 볼 수 있다. 오늘날 대부분의 하천유역은 고도의 산업발전과 인구의 증가로 인하여 농·생·공업 등의 용수가 유역내의 여러지점에서 다양한 시기에 대량으로 취수되어 소비되는가 하면 공급량의 일부는 다시 하천으로 회귀(return)되기도 한다. 한편 수계간이나 지역간 수자원이 용의 광역화로 유역내에는 항상 하천유출량의 변화를 수반할 수 있는 수 많은 요인이 존재하는 등 하천유출기구(mechanism)가 복잡·다양화 되고 있다. 종래 수자원 시스템을 협의의 수자원 시스템으로 보는 관점은 하천의 입의 지점에 설치되는 수자원 시설물만을 생각 하는 것이며, 이 지점에서의 물수지만을 분석한다는 것은 다양한 물수지요소가 서로 영향을 미치며 반응하는 전체 유역의 입장에서 볼 때 합리적인 대응 방법으로 볼 수 없다.

종래 수자원 시설물 위주의 물수지는 댐 또는 취입보 지점에서 단일 유역의 유입량과 시설물의 용수 공급량을 주어진 시간 간격으로 계산하고 부족수량의 발생여부를 파악하는 것이었다. 이때 해당 유역이 아무리 크고 복잡하더라도 하나의 유역으로 보고 가지야마(梶山)식이나 탱크모형 등 장기 유출량 수문모형을 사용하는 ROS(농업진흥공사, 1981)와 DIROM(김현영 등, 1988)등을 적용하였다. 이러한 시설물 위주의 물수지는 댐지점 상류 유역내 물수지가 복잡하여 농업용수의 회귀와 타유역으로 도수(diversion)가 존재할 때는 유입량 추정결과가 무의미해지는 단점을 가지고 있다. 또한 하천 수계를 따라 기존의 수자원 시설의 영향이나 취수의 영향을 분석할 수 없다.

이러한 문제를 해결하기 위한 대표적인 유역 물수지 모형으로서 HYDROSS(Hydrologic River Operation Study System, US Bureau of Reclamation, 1983)와 SSARR(US Army Corps of Engineers, 1972)을 들 수 있다. 이들 모형은 유역의 다양한 물수지 요소들을 고려할 수 있도록 구축되어 있어 유출모의가 가능하나 자연상태의 실측유출량을 사용한다는 점과 한국과 같은 논농수의 공급과 회귀를 고려할 수 없다는 단점이 있다. 국내 연구로는 하천망 모형(서울대학교 농업개발연구소, 1993)을 들 수 있는데 이는 전체유역

을 수개의 소유역(cell)으로 구분하여 하천유출량을 해석하고 추적·합성함으로써 하천의 입의 지점에 대한 일별유출량을 정확히 추정할 수 있는 데 비하여 수계간이나 지역간 또는 유역간에 산재하는 단순 및 다중 시설물(저수지, 취입보, 양수장 등)의 동시 다발적인 운영조작 등에 대한 유출해석은 불가능하다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 유역물수지 모형 WWASS(Watershed Water balance And Streamflow Simulation)를 개발하여 새만금호의 만경·동진강 유역의 실측자료를 이용하여 적용성을 검증하였다.

2. 모형의 구성

WWASS의 기본구성 유역은 물수지 요소가 될수록 일회에 걸쳐 단순하게 발생하고 회귀될 수량이 재 취수되지 않는 소유역이 대상이다. 소유역은 지천 또는 지류를 중심으로 구분하며 본천과 합류하는 곳이나 수리시설물의 현 위치나 향후 예정지점이 하천유출량을 모의하는 조절점(control point : CP)이 된다. 소유역은 자연상태의 유출량을 모의하는데 유용하도록 단순한 토지이용 상태가 되도록 선정한다. 조절점을 중심으로 소유역을 일반화하여 물수지 요소를 표시하면 다음 그림과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 기본유역의 물수지를 계산하기 위해서는 각 물수지 요소를 입력변수로 처리하던가 아니면 모형에 의해 모의할 수 있어야 한다. 따라서 WWASS는 크게 유입량산정모형, 공급량(필요수량) 산정모형, 물수지 모형 및 하천유출의 순서와 각 소유역간의 물수지 요소를 연결시켜 주는 하천 네트워크 모형 등으로 구성된다.

2.1 유입량 산정모형

일반적으로 하천의 입의 구간에서의 유입요소는 상류유역으로부터 유하되어 오는 유입량과 그 구간내의 자체유역으로부터 강우에 의해 자연유출되는 황유입량, 각종용수의 회귀수 및 타 유역이나 시설로부터 도수되는 유입량 등을 들 수 있다. 이들 유입요소를 위하여 시스템에 구축된 해석방법과 수문모형은 다음과 같다.

상류 CP로부터의 유입량은 하천의 최상류부에서는 0이 되며, 나머지 하천구간에서는 상류 CP에서 유입, 유출량의 물수지로부터 나타나는 월류량(overflow)이 된다.

자체유역의 황유입량은 자연상태의 소유역으로부터

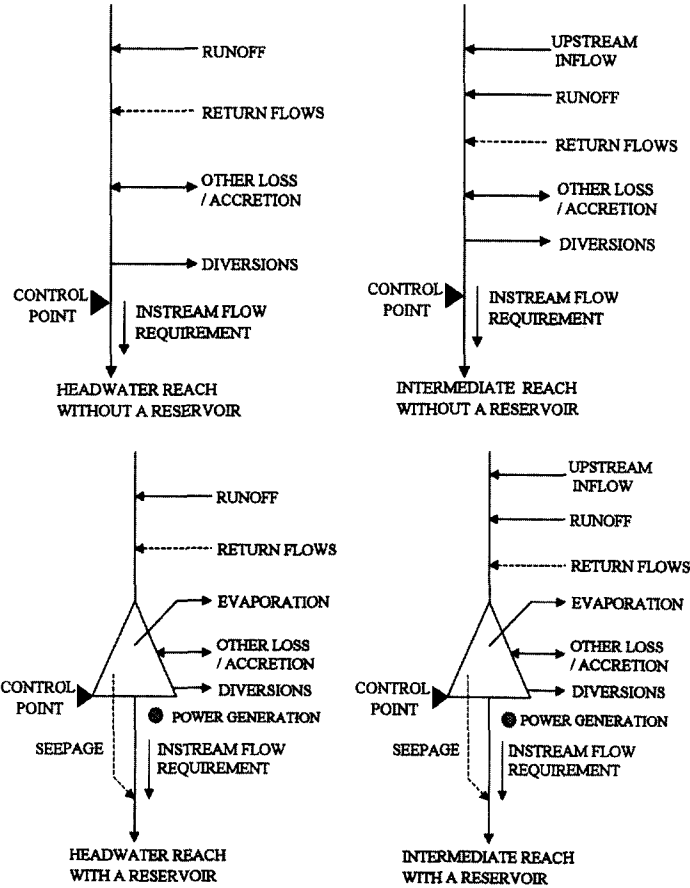


Fig. 1. Type of Stream Reaches

강우에 의해 유출되는 유입량이며, 본 시스템에서는 탱크모형을 수정하여 우리나라 미계측 소유역에서 일별 유출량을 추정할 수 있도록 개발된 DIROM 모형을 이용하여 산정할 수 있도록 하였다.

각종 용수의 회귀수는 식 (1)과 같이 공급한 수량의 회귀율로 정의하였다. 관개용수의 경우는 월별 회귀율을 실측자료에 의해 보정된 값을 사용하고 기타용수는 일정율을 사용토록 하였으며 입력변수로 처리하였다.

$$R_j = \sum F_j D_j \quad (1)$$

여기서, R 은 회귀수량, F 는 회귀율, D 는 용수량, j 는 용수종류를 나타내는 첨자이다.

도수유입량은 타 유역이나 수리시설로부터 도수되어 유입되는 수량을 말하는 것으로서 도수 목적에 따라 일정량으로 유입될 수도 있고 또는 필요수량 형태로

유입될 수도 있으므로 본 시스템에서는 도수 목적에 따라 유입량을 구분하여 처리할 수 있도록 하였다.

2.2 공급량 산정모형

하천의 공급요소는 농업용수, 생활용수, 공업용수, 축산용수, 환경용수 및 도수유출량 등으로 구분할 수 있다.

농업용수는 논벼를 위해 공급하는 관개용수로서 증발산량, 삼투량 및 유효강우량 등으로 구성되며 농업용수의 공급량과 필요수량이 같다고 가정한 것으로써 실제 DIROM의 적용성을 검토한 결과 계획수립 관점에서 큰 무리가 없는 것으로 나타났다(김현영 등, 1988).

$$REQ_i = ETp_i Kc + I - Re_i \quad (2)$$

여기서, REQ 는 농업용수량(mm), ETp 는 잠재증발산량(mm), Kc 는 비의 작물계수, I 는 삼투량

나라의 10대 하천 중의 하나인 만경강과 동진강을 주 하천으로 형성하며, 유역면적은 3,319 km²에 이른다. 유역내에는 광활한 김제·만경평야가 위치하는 등 용·배수체계가 복잡하고 수리시설물이 많으며 심진강 다목적댐이나 금강으로부터 생·공업 용수를 공급받고 있는 등 하천의 유출체계가 다양화되어 있다.

3.2 하천 네트워크 구성

Fig. 3은 이러한 유역특성을 고려하여 작성한 새만금지구 유역의 하천 네트워크이다. 이를 구성하는 CP는 총 29개소로서 저수지 있는 하천의 상류가 13개소, 저수지가 없는 하천의 상류가 3개소, 저수지 있는 하천의 중류가 5개소, 저수지 없는 하천의 중류가 8개소가 있다. 이 중 2930400의 고유번호를 가진 CP가 본 하천 네트워크의 최종 출구인 새만금 담수호의 배수갑문 지점 으로서 만경강측은 최상류의 0103100 CP로부터

시작하고, 동진강측은 최상류 1415102 CP로부터 시작하여 유출순서에 따라 하천유출량이 담수호로 유입되고 있음을 알 수 있다. 여기서 앞의 두자리는 조절점 고유번호이고 다음 두자리 숫자는 유출되어갈 하류 조절점 번호이며, 다음 한자리 숫자는 Fig. 1의 하천 형태와 저수지 유무를 나타내고, 다음은 연결저수지 유무 및 도수유입량 유무를 각각 나타낸다.

3.3 실측 수문자료

WWASS의 적용성을 검토하기 위하여 '92년부터 '96년까지 최근 약 5개년간의 실측 수문 및 기상자료를 이용하여 모의발생한 것과 비교하였다. 기상자료는 강우량, 증발량, 평균풍속, 상대습도, 일조시간 및 평균기온 등이며 기상관측소는 해당 CP의 지배구역에 속한 전주, 군산, 정읍 및 부안 등이다. 유량자료는 농어촌진흥공사에서 직접 실측한 자료이며(농어촌진흥공사,

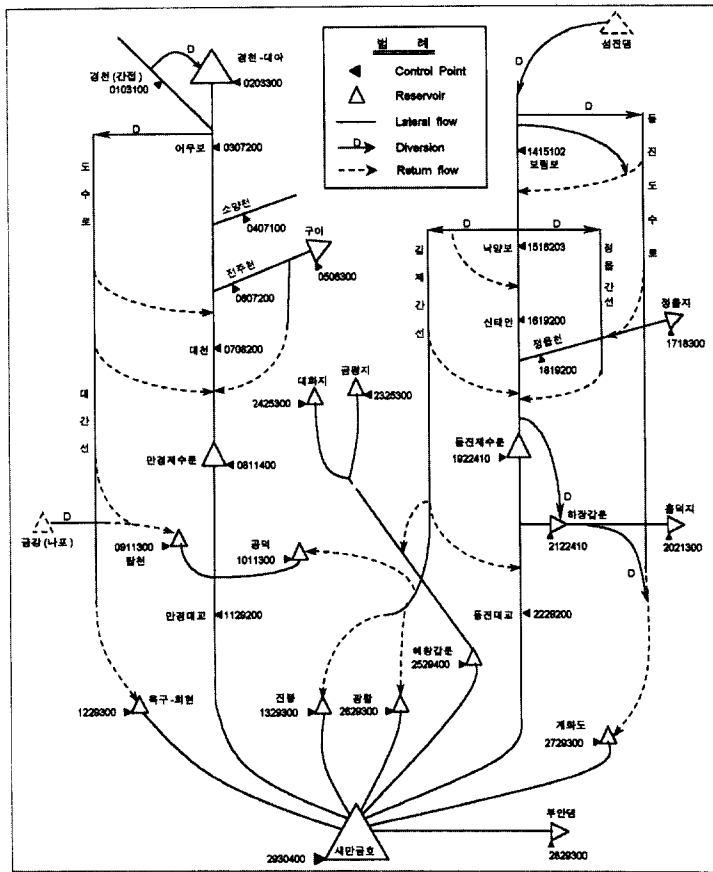


그림 3. River Network of Saemankeum Watershed

Table 1. Estimation of Water Supply for Representative Stations

(unit : 10³ m³)

Mon. Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Sum	Irrigation Area (ha)
Mankyung Gate	0.0	0.0	0.0	182.7	3,089.6	2,922.4	2,076.7	2,280.1	1,617.4	0.0	0.0	0.0	12,168.9	1,295.0
Dongjin Gate	0.0	0.0	0.0	87.0	1,526.1	1,452.6	1,146.7	1,246.7	839.9	0.0	0.0	0.0	6,298.9	590.0

Table 2. Calibrated Return Rate of Agricultural Water at Daecheon and Sintaein

(단위 : 10³ m³)

Mon. Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Mean
Taecheon	0.0	0.0	0.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	20.0
Sintaein	0.0	0.0	0.0	20.0	20.0	30.0	30.0	30.0	30.0	0.0	0.0	0.0	26.7

1997) 수위 관측소는 만경강의 대천, 만경제수문과, 동진강의 신태인, 동진제수문 지점이다. 이 중 '92년부터 '94년까지의 자료는 모형의 보정에 이용하였고, '95년부터 '96년까지의 자료는 모형의 검증에 이용하였다.

3.4 용수공급량 추정

식 (2)에 의해 각 용수공급량을 추정한 결과 Table 1과 같다. 이 용수공급량은 총 29개 소유역에 대해 추정하였으나 만경 및 동진제수문 지점만을 대표로 수록하였다. 표에서 보는 바와 같이 만경제수문의 경우 연간 12,168.9천 m³이 공급되는 것으로 나타났으며 동진점에서의 타용도 용수공급은 없는 것으로 조사되었다.

3.5 모형의 보정 및 검증

WWASS모형의 보정 및 검증은 소유역 유출량의 경우 DIROM의 매개변수와 농업용수 회귀율을 중심으로 수행하였다. 보정 및 검증방법은 우선 실측 및 모의 발생 수문곡선을 육안(eye-fitting)에 의해 연중 일별 변화를 세밀히 관찰한 다음 평균오차평방근법(root-mean-square)을 사용하여 수락여부를 결정하였다.

Fig.4와 Fig. 5는 만경강 대천교 지점의 보정과 검증결과를 보여주고 있다. 전체적으로 풍수기와 평수기는 보정결과가 양호한 반면 갈수기와 비관개기에는 보정의 정도가 낮음을 알 수 있다. 이는 이 기간 동안에 교량공사로 인한 하상의 변동과 수위-유량곡선의 부실 때문으로 추정된다. 반면에 Fig. 5는 '95년 8월 이후에 좋은 검증결과를 보여주고 있다. 이전의 오차는 보정시

고찰한 동일한 원인에 의해 발생한 것으로 판단된다. 이때 보정된 대천 및 신태인 지점의 회귀율은 Table 2와 같다.

Table 2에서 보는 바와 같이 보정된 관계기간중의 농업용수 회귀율은 대천의 경우 20 %, 신태인 지점의 경우 26.7 %로 각각 나타났다. 이와 같이 월별로는 수요량이 많은 7~8월은 회귀율이 높고 기타 월은 평균보다 낮음을 알 수 있다. 동 회귀율은 소유역 유출량 모형, 용수공급 모의모형, 실측 하천유량 등에서 발생하는 오차를 상쇄 또는 상충시킨 결과일 수도 있다. 그러나 이는 다수의 모형을 복합적으로 사용하는 경우 일반적으로 나타나는 현상으로서 결국 해당 조절점의 유출현상을 대표하는 여러 총괄형 매개변수(lumped parameter)중 하나로 풀이할 수 있다.

만경제수문에서는 대천교 지점에서 보정된 결과를 이용하여 제수문지점에서 모의발생하고 실측된 유출량 수문곡선으로 검증만을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 전반적으로는 실측·계산치간에 잘 접근되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 부분적으로는 첨두부에서 약간의 차이를 나타내고 있는데, 이것은 배수갑문의 조작과 수위기록에 있어 일평균 수위의 계산상 일어난 오차로 풀이된다.

동진강의 중류부에 위치하는 신태인교는 홍수기를 제외하면 강우에 의한 하천유출량보다는 섬진댐 방류량의 영향이 크다. 섬진댐 방류량은 정읍시 칠보지점의 동진도수로와 태인읍 낙양리 지점 낙양보에서 취수된 후 신태인교를 거쳐 동진제수문에 이르게 되고 여기에

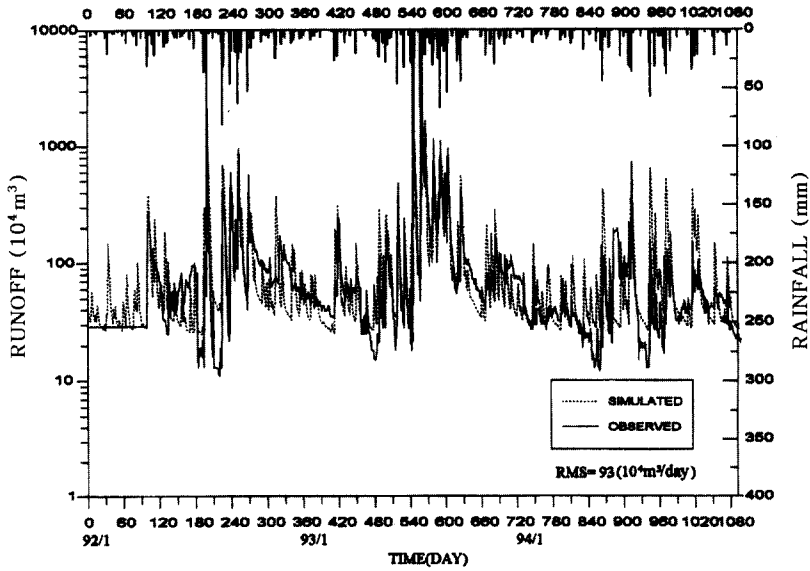


Fig. 4. WWASS Model Calibration at Taecheon Bridge, Mankyung River

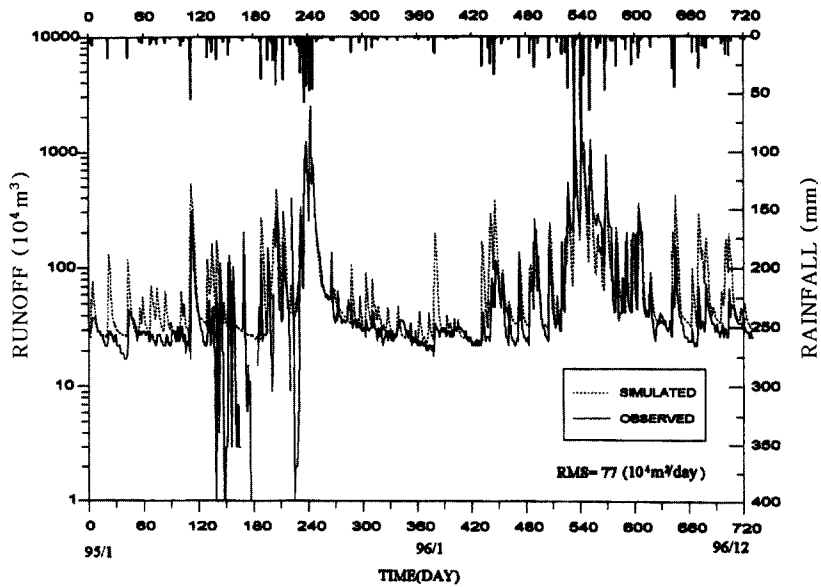


Fig. 5. WWASS Model Verification at Taecheon Bridge, Mankyung River

서 다시 조절되어 고부천으로 도수되는 데, 이때 동진 제수문의 조작·운영은 신태인교 지점의 하천흐름에 배수(backwater)를 발생시킨다.

Fig. 7과 Fig. 8은 신태인교 지점의 보정과 검정결과를 보여주고 있다. 전반적으로 보정과 검정결과가 실

측 Hydrograph의 경향을 쫓아가는 것을 볼 수 있으나 부분적으로 큰 오차를 나타내는 이유는 신태인교의 수위가 동진제수문의 배수의 영향하에 있기 때문이다. 따라서 이 경우 RMS는 무의미하고 실측 수문곡선과의 변화 양상만을 고려해야 한다.

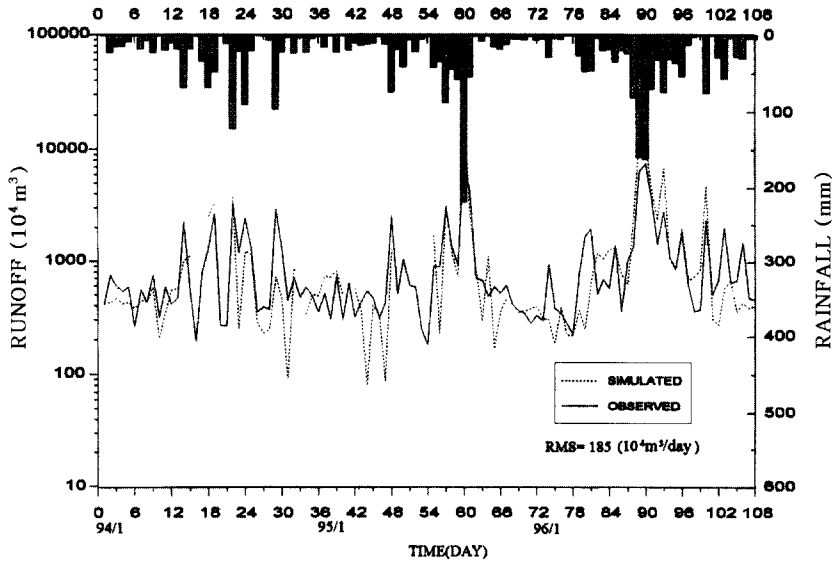


Fig. 6. WWASS Model Verification at Mankyung Gate, Mankyung River

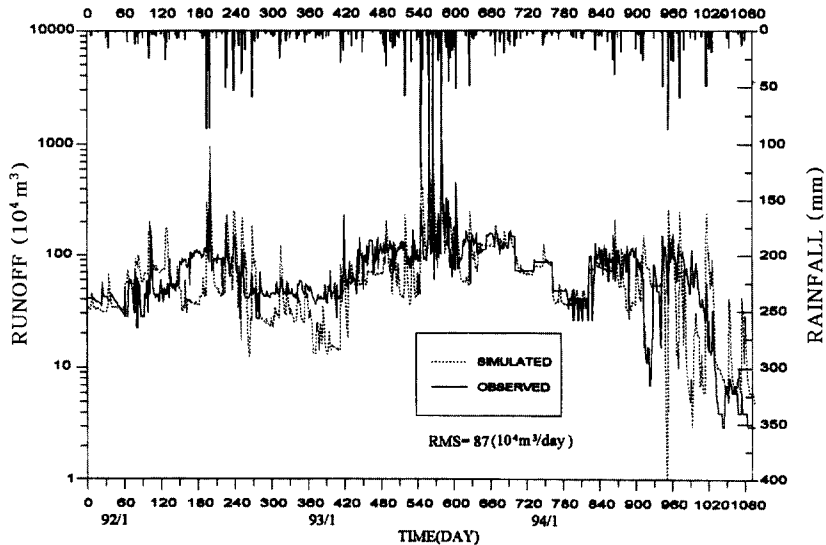


Fig. 7. WWASS Model Calibration at Shintaein Bridge, Dongjin River

4. 임의 지점의 일 유출량의 모의발생

만경대교 지점과 동진대교 지점은 조석의 영향으로 수위-유량곡선을 유도할 수 없으므로 일별 유출 Hydrograph의 추정是不可能的하다. 이 경우 조석의 영향이 없는 지점에서 구축한 수문모형에 의해 유출량을 추정하고 유역면적비에 의해 추정하는 것이 일반적인

방법이다. WWASS모형은 이러한 경우 아무런 문제 없이 쉽게 일별 유출량을 계산할 수 있다.

Table 3에 WWASS모형에 의한 모의발생치와 가지아리(梶山)식에 의한 유출량을 비교하였다. 모의발생치는 일별 유출량이나 비교를 위해 월별로 집계하였다. 표에서와 같이 5개년 평균 WWASS의 결과가 미산식보다 만경대교 지점의 경우 약 179 백만 m^3 정도가

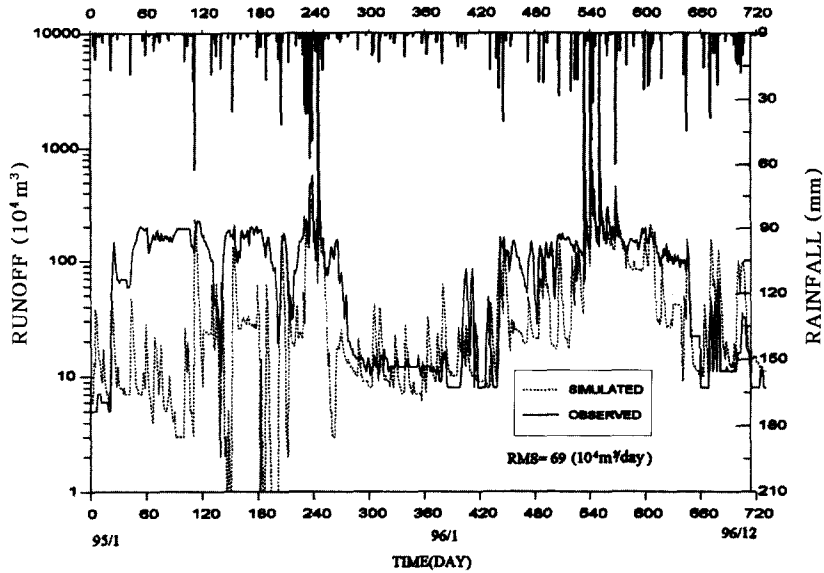


그림 8. WWASS Model verification at Shintaein Bridge, Dong-jin River

Table 3. Runoff Simulation by WWASS and Kajiyama at Mankyung and Dongjin Bridge (1992~1996 : 5 yrs)

(단위 : $10^4 \text{ m}^3 / \text{mon.}$)

Mon.	Mankyung Bridge			Dongjin Bridge		
	WWASS(a)	Kajiyama(b)	(a) - (b)	WWASS(a)	Kajiyama(b)	(a) - (b)
1	1,874	1,621	253	1,471	957	514
2	1,921	1,749	173	1,203	902	301
3	2,638	2,812	$\Delta 175$	1,898	1,552	346
4	2,757	3,983	$\Delta 1,226$	2,360	2,040	321
5	3,173	3,225	$\Delta 52$	1,760	1,791	$\Delta 31$
6	6,393	13,034	$\Delta 6,641$	2,862	6,048	$\Delta 3,187$
7	10,949	14,926	$\Delta 3,977$	6,405	9,489	$\Delta 3,084$
8	11,178	17,299	$\Delta 6,120$	5,680	9,351	$\Delta 3,671$
9	5,604	6,249	$\Delta 644$	2,411	3,560	$\Delta 1,149$
10	3,514	3,778	$\Delta 264$	2,511	2,241	270
11	3,209	2,806	403	2,305	1,774	531
12	2,276	1,871	405	1,612	1,089	523
계	55,487	73,352	$\Delta 17,864$ (32%)	32,478	40,794	$\Delta 8,316$ (26%)

적었다. 이러한 경향은 동진대교지점에서 비슷한 결과를 보여주고 있다. 특히 WWASS는 관개기중 미산식 보다 적게 나타나고 있는데 이는 다른 CP로의 도수량이 많아 만경 및 동진대교지점으로 유하량을 감소시킨 현실을 잘 반영한다고 볼 수 있다. 또한 동진대교지점의 유출량 감소율이 줄어든 것은 섬진강 다목적댐 칠

보발전의 방류량이 WWASS에서 잘 고려되고 있음을 보여주는 것이라 하겠다.

5. 요약 및 결론

중래 단일 시설물 중심의 물수지 모형의 문제점을 개선하기 위해 유역물수지 모형(WWASS)을 개발 만

경·동진강 유역의 실측자료를 이용하여 모형의 보정과 검정을 실시하고 조석의 영향을 받는 만경·동진대교 지점에서 유출량을 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) WWASS 모형의 매개변수인 농업용수 회귀율을 20~30 %로 보정하였을 경우 실측 유량에 가장 접근하였다.

(2) WWASS 모형의 보정 및 검정결과 일부 실측자료가 부실한 기간을 제외하고 연중 실측 Hydrograph 변화와 잘 일치하고 있었으며 RMS도 보정시보다 작아져 좋은 검정결과를 얻었다.

(3) WWASS모형을 이용하여 조석의 영향을 받는 만경·동진대교 지점에서의 유출량을 측정된 결과 미산식보다 약 25~30 % 정도 적게 나타났으며 관계기간 중의 타유역으로의 관개용수공급도 잘 표현하고 있었다.

(4) 향후 WWASS모형을 이용하여 유역내 물수지 요소의 변화에 따라 유출량 추정이 가능하므로 수계를 일관한 수자원계획수립에 정도 높게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김현영, 박승우 (1988). "관개용 저수지의 일별유입량과 방류량의 모의발생." 한국농공학회지, 제30권, 제1호. pp. 50-62.

농업진흥공사 (1981). Program 해설 제1집.

농어촌진흥공사 (1997). 새만금지구 간척종합 개발사업 수문조사 보고서. pp. 119-198.

서울대학교 농업개발연구소(1993), 농어촌용수의 개발 및 최적이용 모형화 연구Ⅲ. pp. 172-186.

Chow, V.T. (1964). *Handbook of applied hydrology*. McGraw Hill.

US Army Corps of Engineers (1972). *SSARR program discription and user manual*. North Pacific Div.

US Bureau Reclamation (1983). *HYDROSS-Hydrologic River Operation Study System, User's guide*.

(논문번호:98-030/접수:98.05.27/심사완료:98.07.13)