

대청유역 물수지 분석을 위한 장기 유출모의

이상진 · 김주철* · 노준우

한국 수자원공사 K-Water 연구원

(2010년 5월 20일 접수; 2010년 8월 17일 수정; 2010년 10월 7일 채택)

Long Term Runoff Simulation for Water Balance at Daecheong Basin

Sang-Jin Lee, Joo-Cheol Kim*, Joon-Woo Noh

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea

(Manuscript received 20 May, 2010; revised 17 August, 2010; accepted 7 October, 2010)

Abstract

For an accurate rainfall-runoff simulation in the river basin, it is important to consider not only evaluation of runoff model but also accurate runoff component. In this study long-term runoffs were simulated by means of watershed runoff model and the amounts of runoff components such as upstream inflow, surface runoff, return flow and dam release were evaluated based on the concept of water budget. SSARR model was applied to Daecheong basin, the upstream region of Geum river basin, and in turn the monthly runoff discharges of main control points in the basin were analyzed. In addition, for the purpose of providing the basic quantified water resources data the conceptual runoff amounts were estimated with water budget analysis and the reliability of the observations and the monthly runoff characteristics were investigated in depth. The yearly runoff ratios were also estimated and compared with the observations. From the results of the main control points, Yongdam, Hotan, Okcheon and Daecheong, the yearly runoff ratios of those points are consistent well with data reported previously.

Key Words : SSARR, Daecheong Basin, Water Balance, Runoff Components

1. 서론

우리나라의 댐운영은 단일 댐위주로, 그리고 댐 상류 유역의 수문학적 조건에 따라 온 것이 사실이지만, 점차 수계 전체를 고려하고 수계 내 댐들을 연계 운영할 필요성이 증대되고 있는 현실이다. 이에 따라 이수관리를 목적으로 저수지 또는 저수지군의 최적운영모형 개발에 관한 연구들을 다수 수행되어 왔다. 그러나, 이러한 이수물관리의 근간이 되는 수계 저수유출을

모의할 수 있는 모형은 정립되어 있지 못한 실정이다. 위와 같은 이수관리모형을 적용하기 위해서는 유역 유출량의 파악이 선행되어야 한다. 지금까지의 많은 연구에서 지적되어 왔듯이 주로 산지유역을 형성하고 있는 우리나라에서는 기초수문조사와 유량관측 부족 등의 영향으로 말미암아, 이수관리모형을 활용한 고품질 유출량 자료의 확보가 쉽지 않다. 유역 수자원의 효율적인 관리 및 배분을 위해서는 세밀한 강우-유출관계의 규명이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 먼저 하천 유출지점의 정확한 유량정보가 획득과 함께 소유역에서의 장기간에 걸쳐 신뢰성 있는 유출량자료의 확보가 요구된다. 안 등(2009)은 금강권역을 중심으로 MODSIM을 이용하여 농업용 수리시설의 용수

*Corresponding author : Kim Joo-cheol, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea
Phone: +82-42-870-7414
E-mail: kjoocheol@kwater.or.kr

공급을 평가하였으며, 이 등(2008; 2009)은 용담댐 상류에 위치한 양악천 유역을 "물수지 시험유역"으로 지정하고, 관개수로를 통한 유입량, 하류하천에서의 배수량, 양악천 상류 양악호에서의 강수량, 농지에서의 경작현황 및 물리면적 등을 조사하였다. 확보된 수문 자료를 활용하여 농업지역에서의 회귀율을 분석하였으며, 유역단위의 정량적 물수지 분석을 위해서는 하천으로 회귀하는 관개용수의 배수량 모니터링 개선의 필요성을 지적하였다. 신 등(2007)은 낙동강유역에 준분포형 모델인 SWAT 모델을 구축하고 물수지 시나리오에 따른 유허분석을 수행하였으며, 해외 사례로 Frevert 등(1994), Law와 Brown(1989)은 ModSim 유역물배분 네트워크 모델을 각각 미국의 Colorado 강 유역과 Snake 강 유역에 적용 및 구축하고 수리권에 대한 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 유역유출모형을 활용하여 유역내 장기 유출량을 모의함과 동시에 유역의 물수지 개념을 활용하여 상류 유입유량, 강우-유출량, 회귀수량, 방류량 등 다양한 유출성분을 산정하였다. 이 결과를 토대로 각 지점별로 월별 유출량을 산정하고 관측유량에 대한 신뢰도 검토와 지점의 월별 유출특성을 파악하여 유역내 수자원 정량화를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상유역 및 모형적용

본 연구의 대상유역은 신뢰성 높은 수문자료를 획득하기 위해 다년간 유역정밀조사와 현장조사를 실시한 바 있는 금강수계 상류영역인 대청유역을 대상으로 하였으며 해당유역을 총 7개의 소유역으로 구분하여 구성하였다.

유역유출분석을 위해 수문모형을 이용하면 비교적 자료기간이 길고 관측밀도가 높은 강우량으로부터 유출량을 모의하여 산정할 수 있는데 이와 함께 유출분석은 일단위, 또는 주간, 순간, 월간 및 연단위의 유출을 연속적으로 모의할 수 있도록 여러 수문모형이 개발되어 왔으나, 국내에서 사용되어 온 모형으로는 미국 공병단의 SSARR, 미국 기상청의 NWSRFS 또는 NWS-PC, 개념적 모델인 TANK, 그리고 DAWAST

모형 등을 대표적으로 들 수 있다. 본 연구에서 적용한 SSARR7) 모형은 다른 모형에 비해 저수지 연계운영·조작 및 실무적용이 용이할 뿐만 아니라, 이수 물관리의 근간이 되는 수계 저수유출을 모의할 수 있는 장점이 있다(USACE, 1991).

강 등(1998)은 낙동강유역에 SSARR모형을 적용하고 유역내 용수이용을 수요측면에서 산정된 용수수요량을 이용하여 전유역에 대한 물수지분석을 실시하였다. 이 후 류 등(2007)은 금강유역을 중심으로 SASRR모형을 적용하여 적정 용수이용량을 분석하여 물수지 분석시 용수수요량과 같은 계획차원에서 산정된 용수량을 운영측면에서 이용할 경우 발생하는 문제점을 규명하고 적용방안을 제시하였고, 이 등(2009)은 이 모델을 바탕으로 다양한 유출성분을 산정하고 수문학적 공간 정보를 제공하였다. 모형구성을 위해서 7개 소유역에 대한 일 강수량, 관측유량, 생공농업용수 계획 이용량, 취수량, 댐 유입량, 댐 방류량 및 온도 등을 수집하였으며 실측자료 중 강수량, 관측유량 및 용수 이용량 자료에 대해서는 결측 및 이상치에 대해 검·보정을 실시하였다. 유역의 유출특성을 분석하기 위해 수통, 호탄, 옥천, 대청댐 등 금강유역의 주요지점을 대상으로 수위자료와 수위-유량관계 곡선자료를 수집하였다.

Table 1은 최근 7년(2001~2007)간 대청댐 지점에 대한 모형의 매개변수를 검토정하여 절대오차와 제곱평균제곱근오차를 분석한 결과이다. 모의치의 평가결과를 서로 비교하기 위하여 오차분석 지표를 시공간적으로 동질성을 가지는 관측의 평균으로 나누어 무차원화 하는 방법을 사용하였다.

두 오차를 함께 보여줄 수 있는 지표로는 Bias와 RMSE(Root Mean Squared Error)를 사용하였다. 기간 i 에 대한 관측을 Q_{oi} , 예측을 Q_{fi} 라 한다면 Bias와 RMSE는 식(1)과 식(2)와 같이 계산되며 R-Bias와 R-RMSE는 0에 가까울수록 정확한 값을 나타낸다. Bias는 관측 평균치와 예측치로 계산된 평균의 차를 나타내는 지표이며, RMSE는 관측에서 나타나는 오차(Error)를 제곱(Square)해서 평균(Mean)한 값의 제곱근(Root)을 나타낸다. 또한 시·공간적으로 다른 양상을 보이는 기간 및 유역에 대한 예측결과들의 평가결과를 서로 비교하기 위해, 식(3), 식(4)와 같이 각각

의 지표들을 시·공간적 동질성을 가지는 관측의 평균으로 나누어 무차원화 하는 지표(R-Bias, R-RMSE)로 나타내었다. 연도별로 Bias와 RMSE는 각각 -37.08~7.6, 20.83~187.21의 범위로 나타났으며, 상대치로 나타낸 R-Bias와 R-RMSE는 각각 -0.21~0.22와 0.6~2.08의 범위로 근사한 것으로 분석되었다.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{fi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{oi} \quad (1)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_{fi} - Q_{oi}]^2} \quad (2)$$

$$R-Bias = \frac{Bias}{M_o} \quad (3)$$

$$R-SE = \frac{SE}{M_o} \quad (4)$$

Table 1. Annual bias and RMSE of Daecheong Dam points

Year	Bias	R-Bias	RMSE	R-RMSE
2001	7.60	0.22	20.83	0.60
2002	-14.14	-0.16	187.21	2.08
2003	-37.08	-0.21	150.64	0.85
2004	-1.95	-0.02	123.50	1.49
2005	1.51	0.02	76.70	0.97
2006	-11.26	-0.13	93.84	1.10
2007	-10.46	-0.11	75.30	0.81

2.2. 물수지 적용

하천에서 관측된 유량자료를 장기간에 걸친 유출 성분으로 구분하면, 크게 3가지성분으로 나타낼 수 있다. 즉, 어떤 출구지점의 관측유량(Q_{ob})은 회귀수(αQ_e), 상류유입량(Q_{up}) 및 관측강우-유출량(βQ_{Rain})의 성분으로 구분된다. 여기서, 회귀수(αQ_e)란 유역

및 하도내 용수이용량의 회귀수를 의미하고, 상류유입량(Q_{up})은 상류 유출 제어지점의 관측유량으로 대청댐 방류량을 의미하며, 관측강우-유출량(βQ_{Rain})은 유역내 강우에 의한 자연유출량을 의미한다. 이때 검증지점의 정확한 유출율을 산정할 수 있다면, 관측자료의 연속성 및 신뢰도를 파악하는 척도를 제공할 수 있을 것이다. 이와같이 본 연구에서 적용한 물수지 개념은 식(5)과 같으며, Q_{out} 은 용담댐 하류 방류량이다.

$$Q_{ob} = \alpha Q_e + Q_{up} + \beta Q_{Rain} - Q_{out} \quad (5)$$

본 연구에서는 이와 같이 개념적 방법을 이용하여 유역내 수자원 정량화를 위하여 과거 수문기초자료를 유출성분별로 구분하고 강우-유출 관계를 분석하였다. 여기서 사용된 수문기초자료는 대청댐 방류량, 대전 및 청주권 취수량, 강우에 의한 자연유출량, 지점별 관측유량 등으로 각 성분별로 생성된 일자료를 이용하여 지점별 월별 유출량과 비교·분석하였다. 취수량 자료는 금강수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량산정 보고서(1999)와 대청댐 관리연보(2004) 등의 용수이용현황자료를 이용하였다.

주요 지점으로 대청상류의 호탄과 옥천지점을 중심으로 최근 7년간(2001~2007) 일유출량 분석을 수행한 후 이를 바탕으로 각 지점별 월유출특성을 분석하였다. 월유출 분석시 각 지점별 월유출량 분석과 더불어 월별로 수문자료(면적평균강우량, 관측유량, 계산유출량, 모의유량)의 통계분석을 수행하고 이를 Box and Whisker 다이어그램으로 나타내었다. 호탄 지점의 경우 Fig. 1와 같이 월별 강수현황(a)을 살펴보면 홍수기중 8월의 강수량 편차가 크게 나타났으며, 농번기인 4월~6월에는 강수량의 편차가 약 200 mm 내외이고, 이외의 이수기에는 평균 약 40 mm 정도 내외의 강수가 발생하는 것으로 분석되었다. 관측유량에 대한 월별 변동양상(b)에 나타난 바와 같이 홍수기 및 이수기 모두 강우에 대한 유출반응 양상이 잘 반영되는 것으로 나타났다. 물수지 개념으로 산정한 계산 유출량(c)과 SSARR 모의결과(d) 양상은 연중 대체적으로 유사한 경향으로 나타나 방법별로 모의된 결과가 적절한 것으로 판단된다.

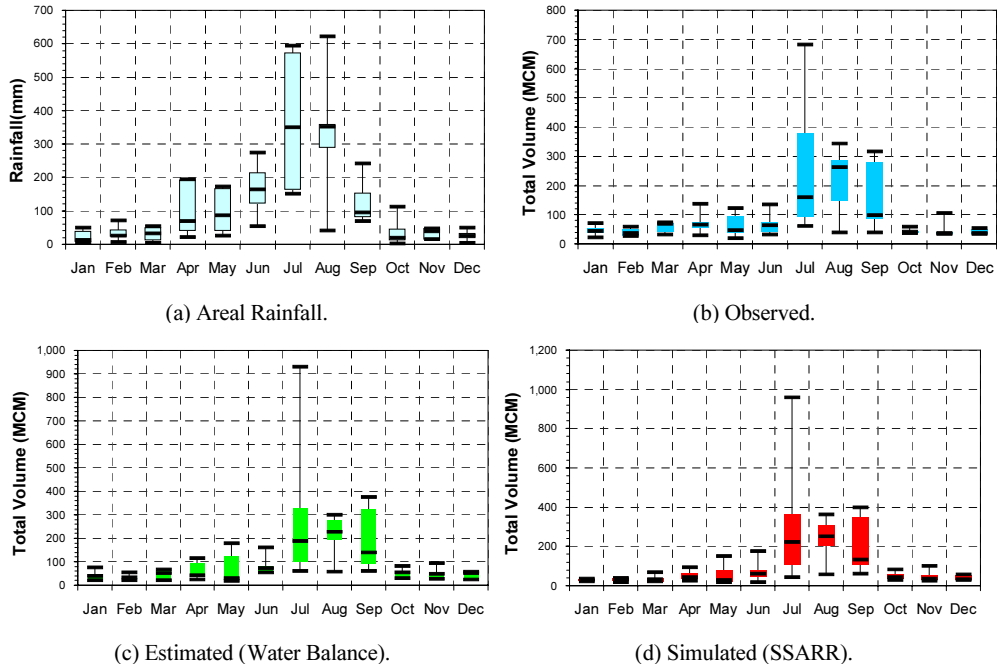


Fig. 1. Box and Whisker plot for Monthly Rainfall-Runoff at Hotan Station(2001 ~2007).

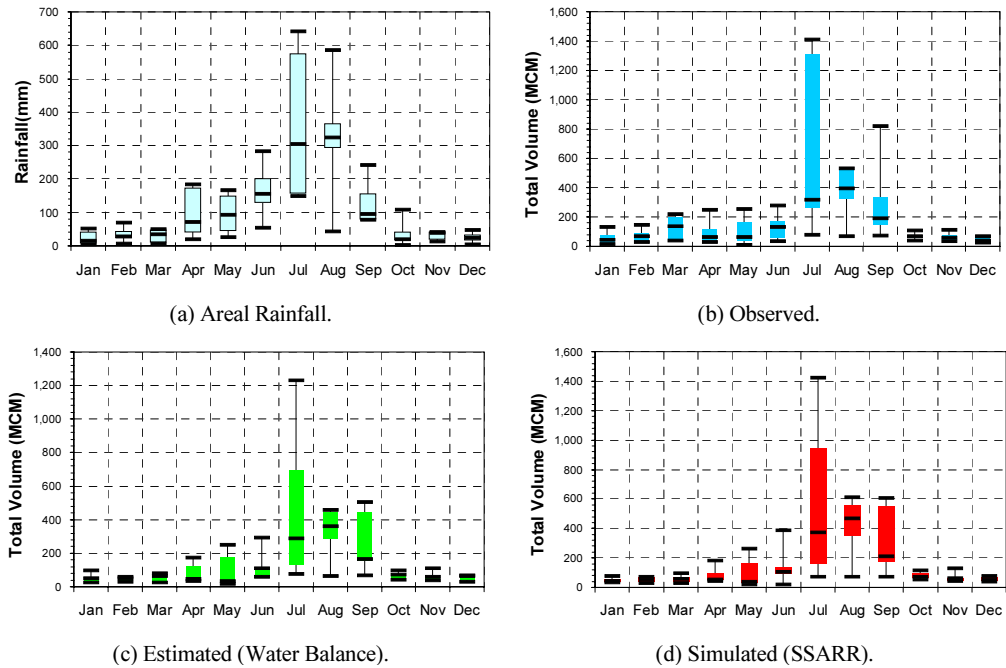


Fig. 2. Box and Whisker plot for Monthly Rainfall-Runoff at Okcheon Station(2001 ~2007).

옥천지점에 대한 월유출량 변화를 살펴보면 다음 Fig. 2과 같다. 월별 강수현황(a)과 8월을 제외하고 강우편차 대비 발생빈도가 균등한 것으로 조사되었고, 관측유량에 대한 월별 변동양상(b)은 홍수기 및 이수기 모두 강우에 대한 유출반응 양상이 잘 반영되는 것으로 나타났으며, 가장 큰 유출편차가 발생하는 시기는 9월으로 이는 일부년에서 발생한 태풍에 의한 것으로 추정된다. 물수지 관계식에 의한 계산유출량(c) 및 SSARR 모의유량에 대한 월별변동(d) 경향은 유사한 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출모의 결과 비교

이와같이 SSARR모형을 활용하여 유역내 장기 유출량을 모의함과 동시에 상류 유입유량, 강우 유출량,

회귀수량, 방류량 등 다양한 유출성분을 산정하고 유역의 물수지 개념을 활용하여 주요지점별로 월별 유출특성을 파악하였다. Fig. 3는 호탄지점의 월유출량 산정결과를 나타낸 것이다. (a)과 같이 유출모형 모의 결과는 홍수기에 부분적으로 관측유량의 침투치를 과대추정하고 있지만 대체적으로 근사한 결과를 보여주고 있다. (b)은 유출성분의 수지를 분석하여 추정된 유출결과를 도시한 것으로 이 역시 강우에 대한 유출양상을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 옥천지점의 월유출량 산정결과이다. 관측 유량, 계산유입유량 및 SSARR 모의유량 모두 근사하게 모의하는 것으로 나타났다. 일부 홍수기에서 관측 유량이 과대산정된 경향이 일부 나타나고 있으나 전반적으로 강우에 대한 유출양상을 잘 반영하고 있다.

Fig. 5은 대청댐지점의 월유출량 산정결과이다. 대청댐 지점은 수위-유량 관계에 따른 곡선식으로부터

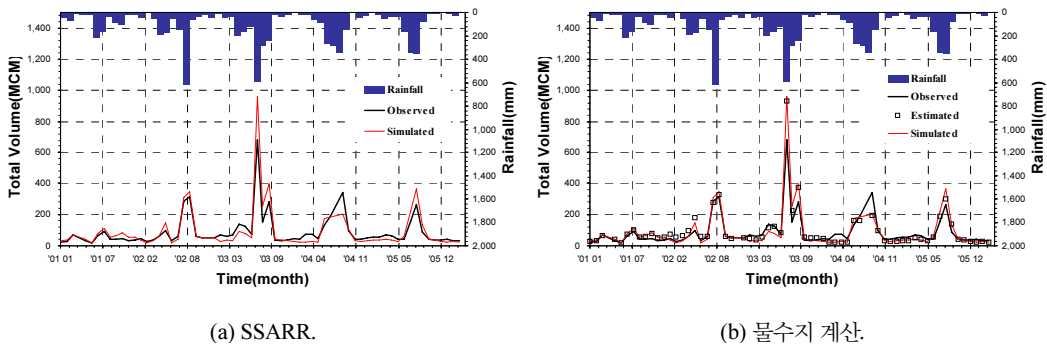


Fig. 3. Monthly Runoff Result at Hotan Station(2001 ~2007).

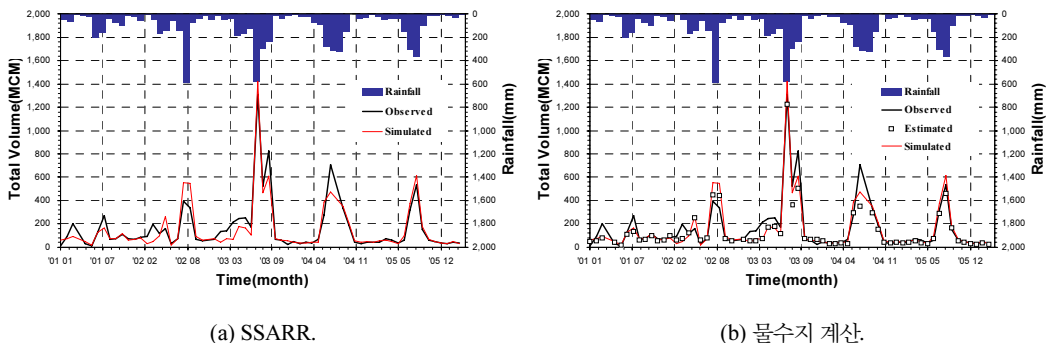


Fig. 4. Monthly Runoff Result at Okcheon Station.

생산된 관측유량값이 결정되는 주요 지점과는 달리 저수위 용량 관계에 의해 유입량이 산정되는 댐지점이다. 관측유량, 계산유입유량 및 SSARR 모의유량 모두 근사하게 모의하는 것으로 나타났으며, 강우에 대한 유출양상도 잘 반영하는 것으로 나타났다. 특히 유출성분 분석시 상류유입량은 옥천지점의 관측유량이 적용되는데 물수지 계산량이 관측유량을 근사하게 산정하는 것으로 분석되었으며, 이로부터 옥천지점에 대한 관측유량의 신뢰도가 확보되고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

3.2. 지점별 유출특성

일 유출모의 결과로부터 월단위로 합산하여 SSARR모형과 유출성분의 수지를 비교 분석함과 동시에 본 연구에서는 SSARR 모의에 의한 연간 유출을 산정하고 관측값과 비교 분석하였다.

2001~2007년을 중심으로 주요지점인 용담댐, 옥천지점 및 대청댐지점의 연별 유출을 산정하였다. Table 2에서와 같이 주요지점별로 연유출을 적절하게 모의하고 있는 것으로 분석되었다. 지점별 평균으로 볼 때 금강유역의 관측 및 모의 연유출율은 각각 53.6% 및 51.8%인 것으로 나타났다. 이 값은 수문학적으로 판단할 때 비교적 큰 값으로서 미국이나 유럽에 비해 상대적으로 유역이 작고, 유역경사가 급하며, 유로연장이 짧은 지형특성과 집중호우에 의해 일시에 다량 유출되는 수문특성을 반영하는 것으로 판단된다. 건설교통부(2001)에 의하면 1966년~1998년동안 분석한 한국의 주요4대유역중 하나인 금강유역의 연

유출량은 66억^m으로 한국의 연평균 강수량 1,276억 ^m과 비교할 때 연유출율은 약 53%정도인 것으로 보고한 바 있다.

Table 2. Annual Runoff Rate at Main Control Points (2001 ~ 2007, %)

년도	용담댐		옥천		대청댐	
	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated
2001	-	-	44.70	41.61	39.06	27.14
2002	76.60	66.23	38.23	43.36	56.05	48.21
2003	84.72	72.84	72.34	60.01	79.81	62.51
2004	56.86	61.23	46.38	40.49	54.65	55.11
2005	60.90	70.30	40.39	48.82	51.70	55.81
2006	56.36	48.13	42.93	39.58	60.80	47.67
2007	56.31	59.89	35.82	41.95	60.28	52
Average	62.96	64.41	42.53	43.25	56.70	51.76

4. 결론

본 연구에서는 유역유출모형을 활용하여 유역내 장기 유출량을 모의함과 동시에 유역의 물수지 개념을 활용하여 상류 유입유량, 강우-유출량, 회귀수량, 방류량 등 다양한 유출성분을 산정하였다. 이 결과를 토대로 각 지점별로 월별 유출량을 산정하고 관측유량에 대한 신뢰도 검토와 지점의 월별 유출특성을 파악하여 유역내 수자원 정량화를 위한 기초자료를 제

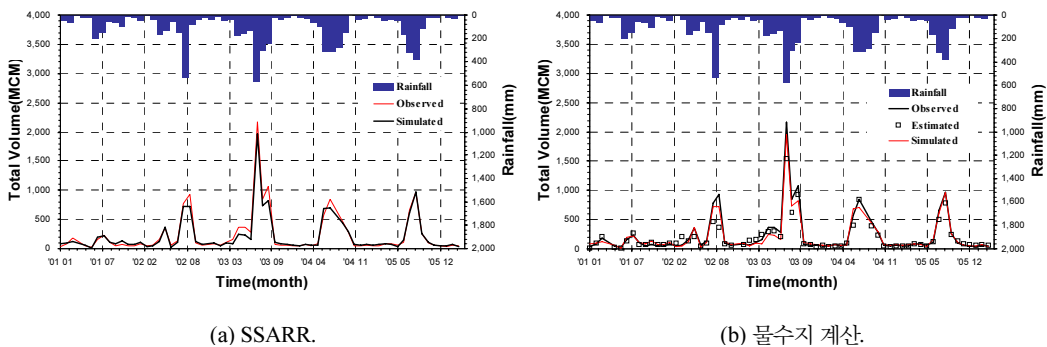


Fig. 5. Monthly Runoff Result at Deacheong-dam Station.

공하고자 하였다.

금강수계 상류영역인 대청유역을 대상으로 유출모형은 최근 다양하게 적용 보고된 SSARR모형을 선정하였다. 최근 7년(2001~2007)간 대청댐 지점에 대한 모형의 매개변수를 검보정하여 절대오차와 제곱평균 제곱근오차를 분석한 결과 R-Bias와 R-RMSE는 각각 -0.21~0.22와 0.6~2.08의 범위로 이수기와 홍수기 모두 대체적으로 관측치와 근사한 경향을 나타내었다.

또한 유역내 수자원 정량화를 위하여 개념적인 유역 물수지 방법을 이용하여 과거 수문기초자료를 유출성분별로 구분하고 강우-유출 관계를 분석하였다. 여기서 사용된 수문기초자료는 대청댐 방류량, 대전 및 청주권 취수량, 강우에 의한 자연유출량, 지점별 관측유량 등으로 각 성분별로 생성된 일자료를 이용하여 대청상류의 호탄과 옥천지점을 중심으로 월별 유출특성(면적평균강우량, 관측유량, 계산유출량, 모의유량)을 분석하였다. 지점별로 월유출량 분석결과 홍수기에 부분적으로 관측유량의 침투치를 과대 추정하고 있지만 대체적으로 근사한 결과를 보여주었다.

아울러 일 유출모의 결과로부터 월단위로 합산하여 SSARR모형과 유출성분의 수지를 비교 분석함과 동시에 SSARR 모의에 의한 연간 유출율을 산정하고 관측값과 비교 분석하였다. 2001~2007년을 중심으로 주요지점인 용담댐, 옥천지점 및 대청댐지점의 년별 유출율을 산정한 결과 기 보고된 자료와 비교하여 년유출율을 적절하게 모의하고 있는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원 의지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 강주환, 이길성, 김남일, 황만하, 1998, SSARR-8 모형을 이용한 낙동강 수계의 저수유출 해석, 한국수자원학회지, 31(1), 71-84.
- 건설교통부, 1999, 금강수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량산정 보고서, I.112- I.139.
- 건설교통부, 2001, 수자원 장기종합계획 - Water Vision 2020, 57-348.
- 류경식, 황만하, 2007, 대규모 유역에서의 적정 용수이용량 산정, 한국농공학회지, 49(3), 3-12.
- 신현석, 강두기, 김상단, 2007, 낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석, 한국수자원학회논문집, 40(3), 251-263.
- 안소라, 박근애, 신영호, 김성준, 2009, MODSIM을 이용한 농업용 수리시설의 용수공급을 평가- 금강권역을 중심으로 -, 한국수자원학회논문집, 42(10), 825-843.
- 이상진, 안정민, 김주철, 노준우, 2009, 유출관리모형을 활용한 수문학적 공간정보 분석, 공간정보시스템학회지, 11(1), 97-103.
- 이현석, 김영성, 양재린, 고덕구, 2008, 용담시험유역에서의 물수지 분석, 한국수자원학회 2008년도 학술 발표회 논문집, 1884-1888.
- 이현석, 김영성, 양재린, 고덕구, 2009, 농업지역 물수지 분석을 위한 현지 조사, 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 논문집, 1860-1864.
- 한국수자원공사, 2004b, 대청댐 관리연보, VI.용수이용편.
- Frevert, D. K., Labadie, J. W., Larson, R. K., Parker, N. L., 1994, Integration of water right and network flow modeling in the Upper Snake River Basin., Proceedings of the 21st Annual Conference, Water Resources Planning and Management Division, ASCE, Denver, Colo., USA, 48-55.
- Law, J., Brown, M., 1989, Development of a large network model to evaluate yield of a proposed reservoir, Computerized Decision Support System for Water Managers, ASCE, New York, 11-30.
- USACE, 1991, SSARR User manual, North Pacific Div., Portland, 1-344.