

찌타룸 유역의 수해 방재를 위한 강우-유출 모의 및 확률론적 예측*

김주철, 김정곤, 이상진, 맹승진

강우-유출 모의 및 예측의 목적은, 가뭄과 홍수와 같은 수해 방지를 위해 통합수자원관리의 효율적인 구현을 실시하여야 한다. 따라서 신뢰성 있는 하천유출량을 제공함으로써 수량, 수질, 환경, 생태 등을 망라한 종합적인 유역관리 수행을 위한 의사결정과정(Decision Support System, DSS)의 토대를 구축하고자 하는 것이다. 일단위 강우-유출을 연속적으로 모의할 수 있는 수문학적 강우-유출모형인 RRFs(Rainfall-Runoff Forecasting System)를 활용하여 농업용수 등 유역내 용수수요량과 3개 저수지를 고려한 인도네시아 찌타룸 유역을 대상으로 장기 유출모형을 구축하고 ESP 기법을 활용하여 확률 유량 예측 모의를 수행하여 그 적용성을 검토하였다.

주제어: 찌타룸 유역, 용수수요량, 강우-유출, ESP(Ensemble streamflow prediction)

I. 서론

강우-유출 모의 및 예측의 목적은, 가뭄과 홍수와 같은 수해 방지를 위해 통합수자원관리의 효율적인 구현을 실시하여야 한다. 따라서 신뢰성 있는 하천유출량을 제공함으로써 수량, 수질, 환경, 생태 등을 망라한 종합적인 유역관리 수행을 위한 의사결정과정(Decision Support System, DSS)의 토대를 구축하고자 하는 것이다. 현재 수계 전체를 고려한 DSS의 구축은 기존의 단일 댐 위주의 유역관리 방안에 대비되는 새로운 전략의 수립을 요구한다. 이에 따라 전 세계적으로 각종 이수관리를 목적으로 한 최적운영모형의 개발에 관한 연구가 단일 저수지 및 저수지군을 중심으로 수행되어 오고 있다. Kwater(한국수자원공사)에서는 일간, 월간 및 연간 유출을 연속적으로 모의할 수 있는 수문학적 강우-유출모형인 RRFs(Rainfall-Runoff Forecasting System)를 개발한 바 있다(USACE, 1991). 미국 공병단(US Army corporation)의 SSARR 모형을 기본 엔진으로 탑재한 이 모델은 다른 유출모형에 비하여 저수지 연계운영과 모의 조작 등이 용이할 뿐만 아니라 이수 관리의 근간이 되는 저수유출을 모의할 수 있는 장점을 갖추고 있다. 김주철 등(2010)은 이 모형을 활용하여 금강유역의 강우-유출 모의에 따른 습윤 및 건조 상태를 분석하였고, 맹승진 등(2010)은 RRFs를 바탕으로 논산지점에서의 장기

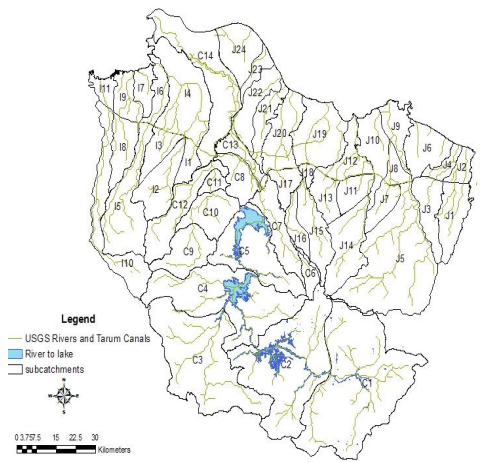
* 본 연구는 ADB에서 발주한 “인도네시아 찌타룸강 의사결정지원시스템 구축”에 의해 수행되었음.

유출분석에 관해 고찰하고 수위-유량 관계곡선식과 비교하였다.

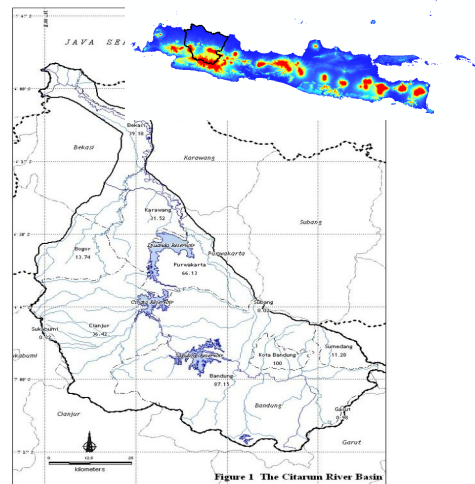
RRFS은 장기 유출뿐만 아니라 ESP(Ensemble Stream-flow Prediction)기법에 의한 장단기 유출예측을 수행할 수 있는 모듈도 함께 제공하고 있다. ESP는 결정론적 강우-유출모형에 대한 입력으로 미래에 발생할 가능성이 있는 모든 강우 시나리오를 적용하여 그 결과물로서 다수의 유출 시나리오를 얻는 것이다. NCEP(National Center for Environmental Prediction) 등에서 ESP 기법을 이용한 확률론적 예측을 적용하고 있으며, Corley(1996, 2001, 2003)은 기후확률예보를 정립하고 이것을 사용하여 ESP 예측의 정확성 개선 방안을 제시하였다. Eum, *et. al.*,(2006)은 이수기 저수지 운영을 위한 앙상블 유량예측의 효용성을 위해 매월 10일 간격으로 3차례 앙상블예측을 갱신하여 예측정확도를 향상시켰으며, 예측정확도에 따른 저수지 운영효과의 개선여부를 정량적으로 분석하였다. 본 연구에서는 인도네시아 짜타룸 유역을 대상으로 장기 유출모형을 구축하고 기본적인 확률 유량 예측 모의를 수행하여 그 적용성을 검토하였다.

II. 대상유역 및 유출모의

1. 대상유역



(a) Citarum 전체 권역



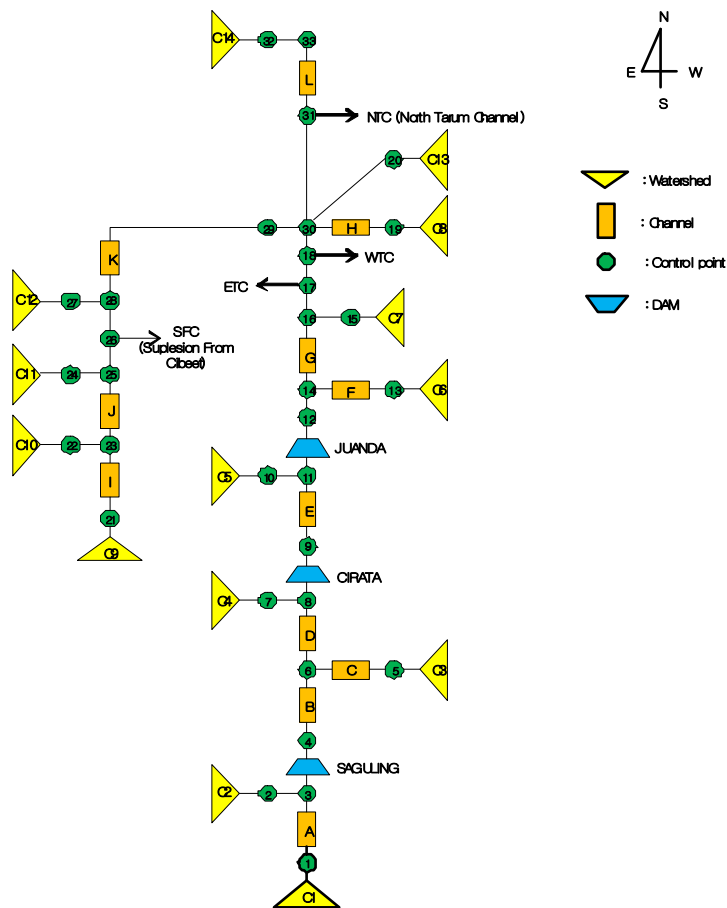
(b) Citarum Basin

<그림 1> 인도네시아 짜타룸강 권역

본 연구의 대상유역인 인도네시아 Citarum 권역은 전체면적이 13,600km²이며 유역의 중심부에 3개의 다목적 댐이 운용 중인 대규모 유역이다. 또한 유역의 하류부에는 대상유역의 좌우에 위치한 도심지 및 농경지에 대한 용수공급을 위한 3개의 대규모 도수로가 연결되어 있다. WTC(West Tarum

Canal), ETC(Eest Tarum Canal), NTC(Nest Tarum Canal)로 구분되는 이 도수로는 독립된 여러유역들을 동서방향으로 연결하면서 물배분을 하고 있다. 유역유출분석 모형을 기반으로 주요 제어지점에 대한 유출모의 검증은 위해서는 전체 대상유역을 유출특성 및 지형특성 등에 따라 다수의 소유역으로 분할해야 하므로 <그림 1>(a)와 같이 Citarum 권역을 소유역으로 분할하였다. 본 연구에서는 <그림 1>(b)와 같이 주요 3개댐이 연계되어 있는 중앙부의 찌타룸강 유역(6,641km²)을 대상으로 14개의 소유역으로 분할하고 모의를 수행하였다.

2. 유역 유출모식도



<그림 2> Schematic Diagram of CRB Drainage System

이와 같이 분할된 소유역을 중심으로 <그림 2>와 같이 대상유역의 장기 유출 모의를 위한 모식도를 작성하였다. 3개의 댐과 용수수요량(농업, 공업 및 생활용수)을 고려하였고, 전절에서 기술한 바와

같이 유역의 하류부에 유입된 유량이 WTC, ETC, NTC를 통하여 유량이 배분될 수 있도록 구성하였다.

3. 매개변수 선정

유출모형을 구성하는 주요한 매개변수들은 크게 물리적 매개변수(physical parameter), 수문기상 매개변수(hydro-meteorological parameter) 및 내부처리 매개변수(process parameter)로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이에 따라 Citarum 유역을 대상으로 해당 매개변수들을 선정하였다.

1) 물리적 매개변수

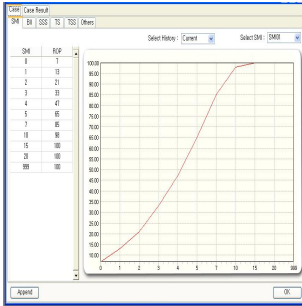
고도에 따른 강우량의 공간적 변동성 평가를 위하여 고도별 면적비가 선정되어야 한다. DEM을 기반으로 한 개의 소유역을 여러 개의 밴드로 분할하는 방식으로 고도별 유역면적과 고도별 면적비를 각각 선정하였다. 유역내 일련의 저수지 연계 조작기능을 고려한 모의를 위하여 Saguling, Cirata, Juanda 등 3개 댐의 유입량과 방류량 자료를 입력하였다.

2) 수문기상 매개변수

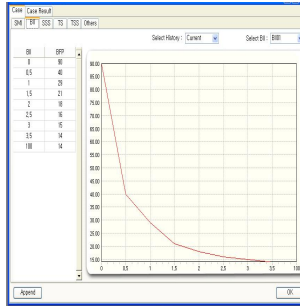
대상유역 내 위치한 122개의 강우관측소를 대상으로 1980-2009 기간에 대하여 일 강우자료를 수집하였다. 소유역별 면적평균강우는 Thissen 법을 이용하여 선정하였다. Thissen 법에 따라 선정된 유역평균 강우량은 유역을 단순한 평면으로 간주하여 선정된 것이므로 고도별 강우가중치를 부여하여 보완하였다. 각 소유역별로 관측소 평균고도에 해당하는 고도에서의 고도별 강우가중치를 100%로 하고 각 고도에 따른 강우가중치를 보정계수를 이용하여 선정하였다.

3) 내부처리 매개변수

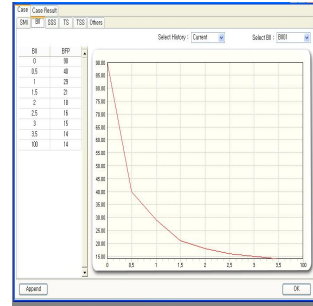
RRFS의 가장 민감한 매개변수 중의 하나인 토양습윤상태별 유출율(SMI-ROP), 침투량별 지하수 유입율(BII-BFP), 지표수와 복류수 분리(S-SS) 도표를 유역별로 선정하기 위하여 우선 초기치로서 Citarum 유역의 토지이용도와 토양도를 이용하여 GIS tool에 따라 결정하였다. 여기서 SMI01은 3개 댐의 상류지역, SMI02는 Cirata, Juanda 댐의 자기유역 그리고 SMI03은 Juanda 댐의 하류지역을 대상으로 한 선정결과이다. <그림 3>은 영역별 토양습윤상태별 유출율, 침투량별 지하수 유입율, 지표수와 복류수 분리지표 매개변수 선정 결과이다.



(a) SMI-ROP



(b) BII-BFP



(c) S-SS

<그림 3> Estimation of Main Parameter

III. 결과 및 고찰

1. 모형 보정 및 검증

모형의 보정과 검증을 위해서는 통상적으로 과거 일정기간을 대상으로 모형의 보정을 실시하며 해당기간에서 결정된 적정매개변수를 이용하여 타년도의 유출량을 모의하고 이를 관측치와 비교분석을 실시한다. 본 연구에서는 1997~2003년을 대상으로 모형을 검증하였다. 모형의 검증방법으로는 아래와 같이 상대편의(Relative Bias: RB)와 상대평균제곱근오차(Relative Root Mean Square Error: RRMSE) 방법을 이용하였으며 상대편의는 년단위 모의결과에 대한 검증을 목적으로 실시하였고 상대평균제곱근오차는 일단위 모의결과에 대한 검증을 목적으로 실시하였다.

$$RB = \frac{M_F - M_Q}{M_Q} \quad RRMSE = \frac{1}{M_Q} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - Q_i)^2}$$

여기서 F_i 와 Q_i 는 각각 i 일의 계산유량과 관측유량을 의미하고 M_F 와 M_Q 는 각각 연평균 계산유량 및 관측유량으로서 다음과 같이 정의된다.

$$M_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad M_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

<표 1>은 3개 댐 지점 유입량의 고수유출(홍수기)과 저수유출(평·갈수기)에 대한 상대편의와 상대평균제곱근오차를 분석한 것이며, 표본 예로 <그림 4>에 2002년 Cirata Dam Station에 대한 모의결

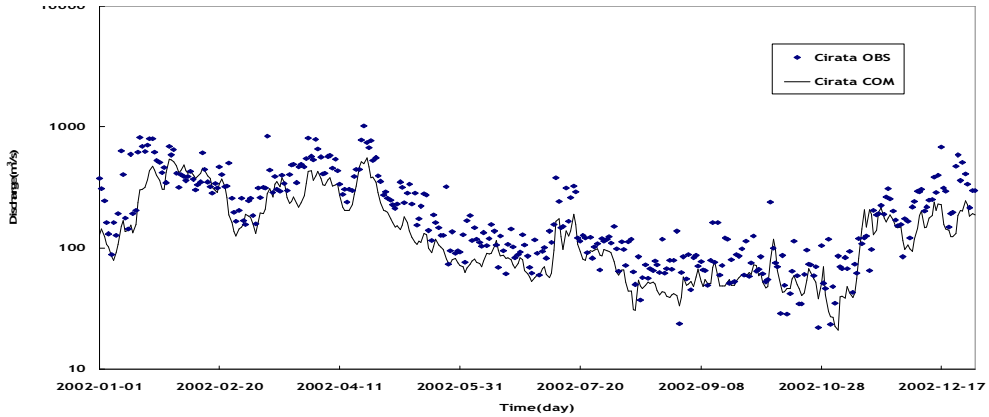
과를 나타내었다. 이를 토대로 <그림 1> 및 <그림 5>와 같이 2004년 및 2005년에 대하여 검증모의를 수행한 결과 저수유출 뿐 만 아니라 고수유출 시에서도 관측치를 합리적으로 모의하는 것으로 분석되었다.

<표 1> Result of error analysis for calibration period

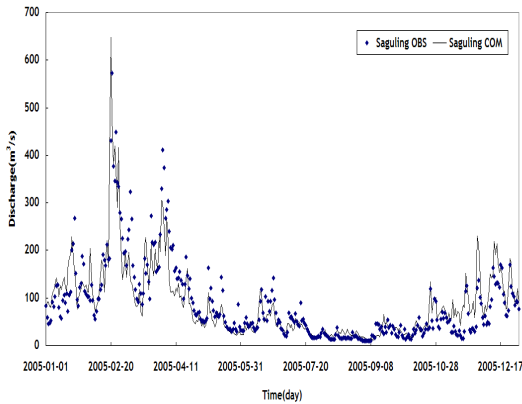
Dam	Year	Low Flow				High Flow			
		Observed (m3/s)	Simulated (m3/s)	RB	RRMSE	Observed (m3/s)	Simulated (m3/s)	RB	RRMSE
Saguling	1997	29.04	39.71	0.37	1.52	104.72	108.82	0.04	0.43
	1998	102.98	88.25	-0.14	0.35	177.90	188.31	0.06	0.47
	1999	66.22	71.70	0.08	0.54	135.63	119.18	-0.12	0.36
	2000	63.71	60.22	-0.05	0.63	111.63	117.56	0.05	0.30
	2001	92.31	70.96	-0.23	0.56	144.98	138.58	-0.04	0.36
	2002	37.33	49.25	0.32	1.30	157.59	178.25	0.13	0.40
	2003	24.42	62.92	1.58	2.76	98.73	127.00	0.29	0.84
Cirata	1997	99.36	75.66	-0.24	1.52	236.83	172.24	-0.27	0.90
	1998	248.04	177.83	-0.28	1.31	412.44	282.38	-0.32	0.98
	1999	208.52	145.05	-0.30	1.39	322.68	223.30	-0.31	1.20
	2000	190.63	135.65	-0.29	1.49	263.85	172.87	-0.34	1.02
	2001	275.43	161.95	-0.41	2.35	346.14	249.48	-0.28	1.02
	2002	141.10	92.85	-0.34	1.68	419.39	297.58	-0.29	1.04
	2003	79.02	84.36	0.07	1.22	178.95	151.17	-0.16	0.85
Juanda	1997	88.44	92.51	0.05	0.19	167.92	167.93	0.00	0.11
	1998	203.64	225.34	0.11	0.18	229.06	246.37	0.08	0.09
	1999	142.15	179.04	0.26	0.32	206.22	197.97	-0.04	0.26
	2000	162.21	173.18	0.07	0.15	159.28	171.48	0.08	0.14
	2001	223.53	231.60	0.04	0.29	188.63	210.36	0.12	0.14
	2002	133.56	139.34	0.04	0.24	281.49	271.48	-0.04	0.14
	2003	122.49	83.66	-0.32	1.16	140.07	131.03	-0.06	0.33

<표 2> RRMSE 및 RB (2004, 2005)

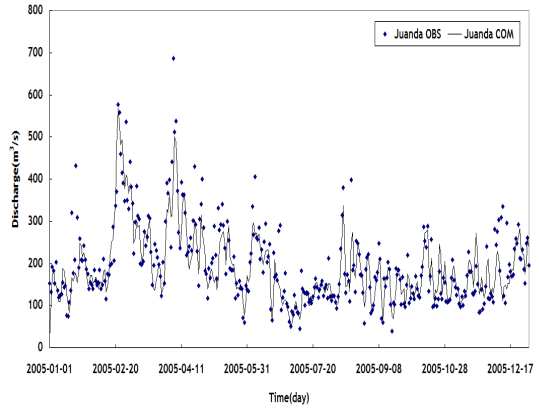
Dam	Year	Low Flow				High Flow			
		Observed (m3/s)	Simulated (m3/s)	RB	RRMSE	Observed (m3/s)	Simulated (m3/s)	RB	RRMSE
Saguling	2004	36.33	51.50	0.42	1.28	125.58	138.76	0.10	0.44
	2005	49.79	55.84	0.12	0.52	164.36	154.55	-0.06	0.36
Cirata	2004	138.09	96.40	-0.30	2.08	320.22	195.39	-0.39	1.25
	2005	173.61	120.37	-0.31	1.77	373.82	261.80	-0.30	1.02
Juanda	2004	132.43	137.39	0.04	0.46	183.49	208.59	0.14	0.16
	2005	168.91	164.32	-0.03	0.26	256.87	240.24	-0.06	0.16



<그림 4> Modeling Calibration Results (Cirata Dam Station, 2002)



(a) Saguling Dam Station



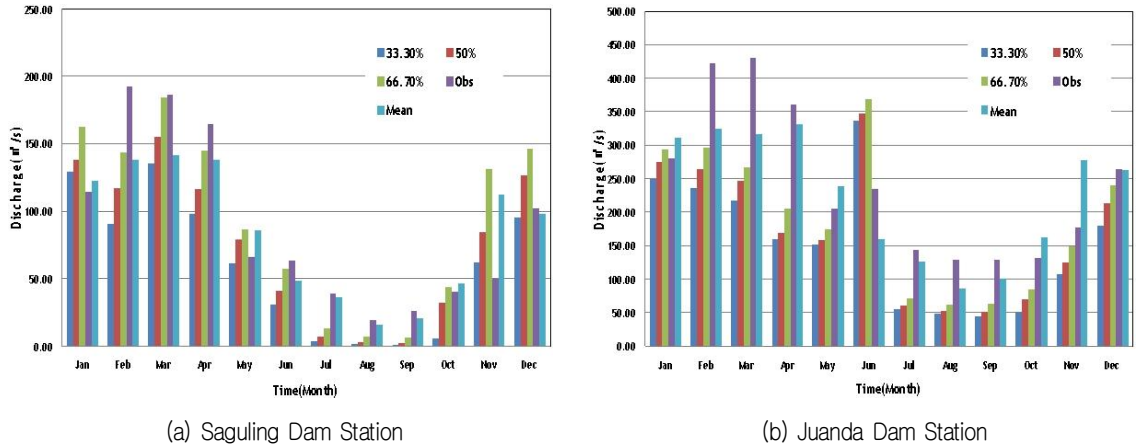
(b) Juanda Dam Station

<그림 5> Modeling Verification (2005.1~12)

2. 확률 유출 예측 및 GUI

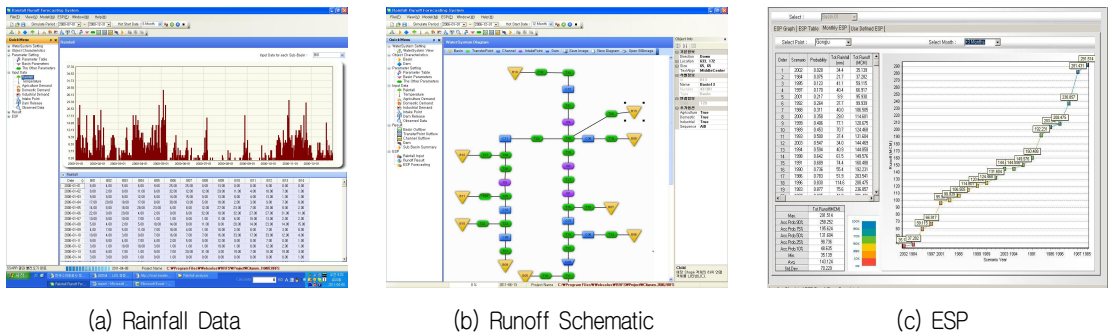
ESP(Ensemble Streamflow Prediction) 기법은 예측시점의 적설량, 토양함수, 하천의 수위, 습도 등 유역의 상태를 나타내는 초기 조건에 확률적 대표성을 갖는 장래에 재현 가능한 과거 기상자료를 결합하여 확률론적 예측을 수행하는 기법이다. 1983년부터 2005년까지 25년간 강우자료를 활용하여 강우 시나리오를 작성하고 도출된 결과를 토대로 연도별(2001~2007년)로 주요지점에 30개의 유출모의 시나리오를 생성하였다. 생성된 유출시나리오를 바탕으로 각 예측유량에 각각 33.3%, 50%, 66.6%의 ESP 확률을 부여하고 관측유량과 과거평균값과 예측유량을 비교하였다. 이 때 ESP확률은 크기순으로 정렬된 유출시나리오에서 누적확률분포곡선을 작성한 후 선형회귀 분석을 통한 보간법으로 각 관측유

량에 해당하는 확률치로 산정하게 된다. <그림 6>은 2006년도를 대상으로 월단위로 ESP 확률을 부여하여 모의한 결과와 과거 평균치, 그리고 관측치와 비교한 것이다. ESP에 의한 방법이 관측치 및 과거평균치와 비교할 때 월별로 다소 편차가 있지만 향후 검증기간을 확장하고 예측점수를 고려하여 검증하는 방법 등을 모색하여 다양한 분석을 도모할 필요가 있다.



<그림 6> ESP Modeling Results (2007)

<그림 7>은 구축된 모형의 GUI(Graphic User Interface)를 나타낸 것이다. 일례로 (a)는 수문 Data, (b)는 유출 모식도, (c)는 ESP 모의결과를 나타낸 것이다. 그리고 결과출력 메뉴들로 이루어지는 각 인터페이스와 서버버튼의 조작으로 사용자 모의가 용이하도록 설계되어 있다.



<그림 7> Example of RFRS GUI

3. 분석 결과

본 연구에서는 인도네시아 찌타룸 유역을 대상으로 장기 유출모형을 구축하고 기본적인 확률 유량 예측 모의를 수행하여 그 적용성을 검토하였다. 우선 주요 3개댐이 연계되어 있는 찌타룸강 유역

(6,641km²)을 대상으로 14개의 소유역으로 분할하고, 3개의 댐과 용수수요량(농업, 공업 및 생활용수)을 고려하여 유역 유출모식도를 작성하였다. Citarum 유역의 토지이용도와 토양도를 이용하여 주요 매개변수 중 하나인 토양습윤상태별 유출율(SMI-ROP), 침투량별 지하수 유입율(BII-BFP), 지표수와 복류수 분리(S-SS) 도표를 유역별로 산정하였다. 이를 통해 3개 댐 지점 유입량의 고수유출(홍수기)과 저수유출(평·갈수기)에 대한 상대편의와 상대평균제곱근오차를 분석하였다. 이를 토대로 2004년 및 2005년에 대하여 검증모의를 수행한 결과 관측치가 합리적으로 모의하는 것으로 분석되었다. 또한 1983년부터 2005년까지 25년간 강우자료를 활용하여 강우 시나리오를 작성하여 ESP 분석을 수행하였다. 생성된 유출시나리오를 바탕으로 각 예측유량에 각각 33.3%, 50%, 66.6%의 ESP 확률을 부여하고 관측유량과 과거평균값과 예측유량을 비교하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 ESP 기법을 중심으로 유출 예측의 적정성을 검토하였다. 과거 강우 시나리오 분석에 의한 장래 유출량 예측뿐만 아니라, 기상청에서 제공되는 정성적 기상예보와 연계한 ESP를 활용하여 찌타룸유역을 대상으로 기법별의 비교 분석을 통해 유출예측의 개선효과를 평가하였다. 우선 SSARR모형을 기반으로 한 장기 유역유출모형을 찌타룸유역에 구축하여 2001년~2006년을 대상으로 모형을 검증한 결과 연중 유출량을 양호하게 모의하는 것으로 분석되었다.

유역의 유출전망을 평가하기 위하여 과거의 전형적인 방법에 의한 평균유출량, ESP 기법, 그리고 기상전망을 고려한 ESP 기법을 적용하여 방법별 예측 결과를 비교 분석하였다. ESP 확률 적용을 위하여 연도별(1983년~2007년)로 유출모의 시나리오를 구축하고 월단위로 누가된 유출 총량을 이용하여 ESP 분석을 수행하였다. 전반적으로 월별 ESP 확률을 이수기·홍수기로 평균한 확률을 적용한 경우가 가장 양호한 적중률을 나타내었다. 예측 모의결과로써 과거 월평균 유출량으로 산정된 연간 절대오차 평균은 60.86MCM으로 ESP 기법(44.12MCM)과 기상전망을 ESP 기법(44.83MCM)과 비교할 때 오차가 가장 큰 것으로 분석되었으며, 기상전망을 고려한 ESP 기법이 가장 양호한 것으로 분석되었다. 통상적인 과거 관측 월유출량 자료를 이용한 유출량 예측 기법에 비해 약 18.3% 정도 정확도가 개선된 것으로 나타났다. 홍수기 및 이수기의 경우 기상전망을 고려한 ESP 기법을 통한 유출예측은 통상적인 방법보다 각각 약 10.3%와 약 8%정도 적중률이 향상되었다. 따라서 본 결과로부터 ESP 기법을 통하여 유역의 월간 유출을 전망하는 것이 적정하다고 판단되며, 향후 유역의 확장 및 추가적인 수문분석에 의하여 ESP기법의 적용성을 확인하는 연구가 지속될 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

- 김주철 · 이상진. 2010. 기후학적 물수지에 의한 금강유역의 습윤/건조 상태 분석. *한국물환경학회지*. 26(2): 243-251.
- 맹승진 · 이상진 · 황만하 · 류경식 · 김형산. 2010. 금강유역 논산지점 수위-유량곡선식과 RRFS에 의한 유출 분석. *한국위기관리논집*. 6(1): 51-63.
- Croley II, T. E. 1996. Mixing Probability Meteorology Outlooks in Operational Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*. 2(4): 161-168.
- Croley II, T. E. 2001. Climate-biased Storm-frequency Estimation. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*. 6(4): 275-283.
- Croley II, T. E. 2003. Weighted-climate Parametric Hydrologic Forecasting. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*. 8(4): 171-180.
- Eum, H. I., Kim, Y. O. and Ko, I. H. 2006. Value of Ensemble Streamflow Forecasts for Reservoir Operations during the Drawdown Period. *Korea Water Resources Association*. 39(3): 187-198.
- USACE. 1991. *SSARR User manual*. North Pacific Div., Portland.

金柱喆: 충남대학교에서 “선형계로 간주한 강우-유출수문계 대표순간단위도의 추정”으로 공학박사 학위를 취득하였으며(2004. 8), 현재는 한국수자원공사 K-water 연구원 위촉연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 지형기 후학적 강우-유출해석 분야이며, 현재 한국수자원학회 회원, 대한토목학회 회원 등으로 활동 중이다(kjoocheol@kwater.or.kr).

金征坤: 미국 Texas A&M대학에서 “Modeling dissolution and volatilization of LNAPL sources migrating on the groundwater table”로 공학박사학위를 취득하였으며(1998.5), 현재는 한국수자원공사 K-water 연구원 수석연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 지하수 해석, 하천수질해석 분야, 유역환경해석 이며, 현재 한국수자원학회 회원, 대한토목학회 회원, 한국환경공학회 회원 한국물환경학회 회원 등으로 활동 중이다(jkim@kwater.or.kr).

李相晉: 부산대학교에서 “홍수유출을 고려한 소하천 하구폐색 방지공법에 관한 연구”로 공학박사 학위를 취득하였으며(2004. 2), 현재는 한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 강우-유출 모형 개발, 유출예측 분야이며, 현재 한국수자원학회 회원 등으로 활동 중이다(sjlee@kwater.or.kr).

孟昇辰: 충북대학교에서 “LH-모멘트의 적정 차수 결정에 의한 설계홍수량 추정”으로 농학박사 학위를 취득하였으며(2002. 2), 현재는 충북대학교 지역건설공학과 부교수로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 수문통계, 강우-유출 모형 개발, 수문자료 측정 분야이며, 현재 한국농공학회 이사, 한국수자원학회 평의원, 한국산학기술학회 편집위원 등으로 활동 중이다(maeng@cbnu.ac.kr).

투 고 일: 2011년 08월 12일

수 정 일: 2011년 09월 01일

게재확정일: 2011년 09월 08일

The Simulation and Probabilistic Prediction of Rainfall–Runoff for Citarum River Basin

Joo Cheol Kim, Jeong Kon Kim, Sang Jin Lee, Seung Jin Maeng

The main purposes of rainfall–runoff simulation and prediction are to provide the reliable stream flow discharges with DSS(the decision support system) for performing the integrated watershed management considering water quantity, water quality and aquatic environment and ecology. In this study the long–term hydrological rainfall–runoff model, so called RRFS which is able to continuously simulate the daily runoff, is set to the Citarum river basin in Indonesia taking into account the water uses, especially irrigation, and the three reservoirs operation. The probabilistic runoff prediction is also performed by ESP(the ensemble stream–flow prediction) within the framework of RRFS and the results are validated.

Key words: citarum river basin, water use, rainfall–runoff, ESP(ensemble stream–flow prediction)