

상류 댐 방류량 및 하천수 사용량이 팔당댐 유입량에 미치는 영향 평가 Assessing the Effect of Upstream Dam Outflows and River Water Uses on the Inflows to the Paldang Dam

김철겸* / 김남원** / 이정은***

Kim, Chul Gyum / Kim, Nam Won / Lee, Jeong Eun

Abstract

To investigate the effect of upstream dam operation and river water use on the downstream flows, SWAT-K watershed model was applied to the Paldang Dam watershed of the Han River basin. Analysis results from 2001 to 2009 showed that outflows from the multi-purpose dams such as the Soyonggang Dam and Chungju Dam much have a strong influence on the downstream flows during both the low- and high-flow seasons. This resulted an increase of low-flow at the Paldang Dam, the end of Pukhangang, and the Yangpyeong stage station by 100.57 m³/s, 33.01 m³/s, and 49.66 m³/s, respectively. Whereas, the impact of river water use was hardly found in the Pukhangang, and also was not significant in the (Nam)hangang. Therefore, the effect of small dam such as the Hoengseong Dam or river water use would be able be excluded for long-term runoff analysis. But, in the case of the areas with a large amount of water use, a sufficient information such water-intake and water movement also must be taken into account like this study.

keywords : Paldang Dam, Multi-purpose Dam, river water, SWAT-K, Watershed model

요 지

본 연구에서는 한강수계의 팔당댐 상류를 대상으로, 상류 댐들의 운영 및 하천수 사용이 하류구간의 유출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. SWAT-K 유역모형을 적용하여, 2001~2009년에 대해 상류댐 운영 및 하천 취수량 적용 유무에 따른 조건별 모의결과를 분석한 결과, 소양강댐과 충주댐 등 다목적댐 운영에 따른 방류량이 갈수기와 홍수기의 하류구간 유출에 가장 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 이로 인해 갈수량이 팔당댐 지점에서 100.57 m³/s, 북한강 종점 33.01 m³/s, 양평수위표 지점 49.66 m³/s만큼 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 하천수 사용에 따른 영향은 북한강 지역은 거의 나타나지 않았으며, 남한강 지역도 양평수위표 지점에서 0.98 m³/s의 갈수량 감소가 나타나 팔당댐 유입량에는 큰 영향이 없었다. 따라서, 장기간의 유출 및 유황분석에서는 황성댐과 같이 규모가 작은 댐 운영이나 하천수 취수 영향은 제외시켜도 무방할 것으로 생각된다. 그러나 물이용이 집중되는 특정기간의 정교한 수문해석이나 취수량이 많은 하천구간을 대상으로 하는 유출 분석에서는, 취수량은 물론 유역내 물이동량에 대한 정보가 필수적으로 고려되어야 할 것이다.

핵심용어 : 팔당댐, 다목적댐, 하천수, SWAT-K, 유역모형

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원 (e-mail: cgkim@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0545)

Corresponding Author; Research Fellow, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)

Senior Research Fellow, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구위원 (e-mail: jeus22@kict.re.kr)

Senior Researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

1. 서 론

댐은 홍수시에 하류하천의 침투홍수량을 감소시키고, 갈수시에는 지속적인 하천의 유지유량 공급 및 수력발전이나 관개 등에 이용되는 유용한 역할을 한다(Park et al., 2008). 하류측에 대해 단기적으로는 유출 특성의 변화, 장기적으로는 저류량 증가에 따른 건기 유량의 증가, 유황 및 유출 특성의 변화 등의 영향을 주게 된다.

기존 국내에서 수행되었던 댐에 의한 영향평가 연구를 살펴보면, 댐 건설 전후의 관측자료 및 모의자료를 기반으로 한 하류측의 유황변동 분석이 주를 이루어 왔다. Lee et al. (1993)은 5대강 수계의 분류 주요 지점에 대해 관측자료를 기반으로 상류댐 건설 전후 기간의 유황변동을 분석한 바 있으며, Kim et al. (2002)은 금강유역 대청댐 건설 전후의 인공위성 자료를 분석하여, 홍수조절 및 안정적인 수자원 관리와 이용 측면에서의 댐의 긍정적 효과를 확인하였다. Kang et al. (2010)은 금강수계 분류구간 및 주요 저류하천에 대해 관측자료와 일부 모의자료를 기반으로 용담댐 및 대청댐 건설 전후의 유출 변화를 분석한 바 있다.

이러한 연구들의 대부분은 댐 건설 전과 후의 자료기간을 구분해서 비교를 수행하였기 때문에, 실질적으로 댐에 의한 저류 및 방류의 영향은 물론, 댐 상류 및 하류 유역의 유출에 절대적인 영향을 주는 강우 조건의 기간에 따른 차이에 의해서도 많은 영향을 받게 된다. 따라서 댐과 같은 저류시설물에 의한 영향을 정성적·정량적으로 평가하기 위해서는 저류지 형태, 운영방법 및 유역내 용수 이용 현황까지 모두 고려할 수 있는 물수지 분석모형이 필요하며, 이를 이용하여 다양한 저수지 운영에 따른 하류하천의 유출 영향을 분석할 수 있다(KICT, 2004).

모형을 통한 댐 영향 평가 연구로서, Yoon et al. (1998)이 NWS-PC 모형을 이용하여 대청댐 건설에 따른 규암지점에서의 장기유출 변화를 평균유량을 중심으로 파악한 바 있다. Kim et al. (2007b)은 SWAT-K 모형을 적용하여 소양강댐과 충주댐의 운영에 따른 팔당댐에서의 유황변동 특성을 분석하였는데, 이는 모의자료를 이용하여 유황변동 특성을 평가한 국내 첫 번째 시도였다. 이외 Kim et al. (2009)은 안성천 농업용 저수지 유역에 SLURP 모형을 적용하여 저수지 유무에 따른 하류지점의 유황분석을 수행하였으며, Kim and Kim (2013)은 충주댐 유역에 대해 수리학적 홍수추적모형을 구축하여 댐 유무에 따른 홍수조절효과를 검토하기도 하였다.

본 연구에서는 댐의 홍수조절효과보다는 갈수기 수자원 확보에 초점을 맞추어, 한강유역과 같이 상류에 여러

댐이 존재하는 경우 상류 댐들의 방류량에 의한 영향은 물론, 하천구간에서의 하천수 사용량 등 유역내 인위적 물이용이 하류구간에 어떻게 영향을 주는 지를 유역모델링에 의한 모의자료를 활용하여 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 SWAT-K 모형 구축

본 연구에서는 정량적 분석을 위해 SWAT-K 유역모형을 적용하였다. SWAT-K는 미국 USDA-ARS에서 개발한 유역모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993)을 기반으로, 복잡하고 다양한 국내 유역조건에 대한 적용성을 개선하고 모의 신뢰성을 제고시킨 모형이다(KICT, 2007).

2.1.1 대상유역 및 소유역 구분

대상유역인 팔당댐 상류의 유역면적은 북한지역을 포함하여 총 23,800 km²로서, 소양강댐, 충주댐, 황성댐 등 3개의 다목적댐과 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 괴산댐, 도암댐, 팔당댐 등 7개의 발전용댐이 위치하고 있다. 또한 용수전용댐으로서 광동댐과 홍수조절용으로 평화의댐이 있으며, 그 밖에 크고 작은 저수지가 산재해 있다.

SWAT-K 모형 적용을 위해 대상유역을 수자원단위 지도상의 중권역을 기준으로 주요 댐 및 합류점을 고려하여 Fig. 1과 같이 총 49개 소유역으로 분할하였다. 면적이 가장 큰 소유역은 북한강 최상류에 위치한 금강산댐 상류지역(17번)으로서, 북한지역을 포함하고 있으며 유역면적은 2,383 km²이다. 가장 작은 소유역은 최하류에 위치하여 경안천, 남한강, 북한강이 합류된 후 대상유역 최하류인 팔당댐 지점까지의 유역(9번)으로서 44 km²이며, 하천이라기보다는 호소에 가까운 소유역이라 볼 수 있다.

2.1.2 기상자료

유출량에 가장 큰 영향을 주는 강수량은 수자원장기종합계획(KOWACO, 1990)을 통해 티센법(Thiessen method)을 이용하여 중권역별로 산정된 면적평균강수량을 적용하였다. 또한 모형에서 Penman-Monteith법(Allen et al., 1998)에 의한 잠재증발산량 산정을 위해 필요한 최고/최저온도, 평균습도, 평균상대습도, 태양복사량 등은 유역 내 위치한 기상청 관할의 10개 관측소(대관령, 춘천, 원주, 영월, 충주, 양평, 이천, 인제, 홍천, 제천)에 대한 지점별 일 관측자료를 적용하였다.

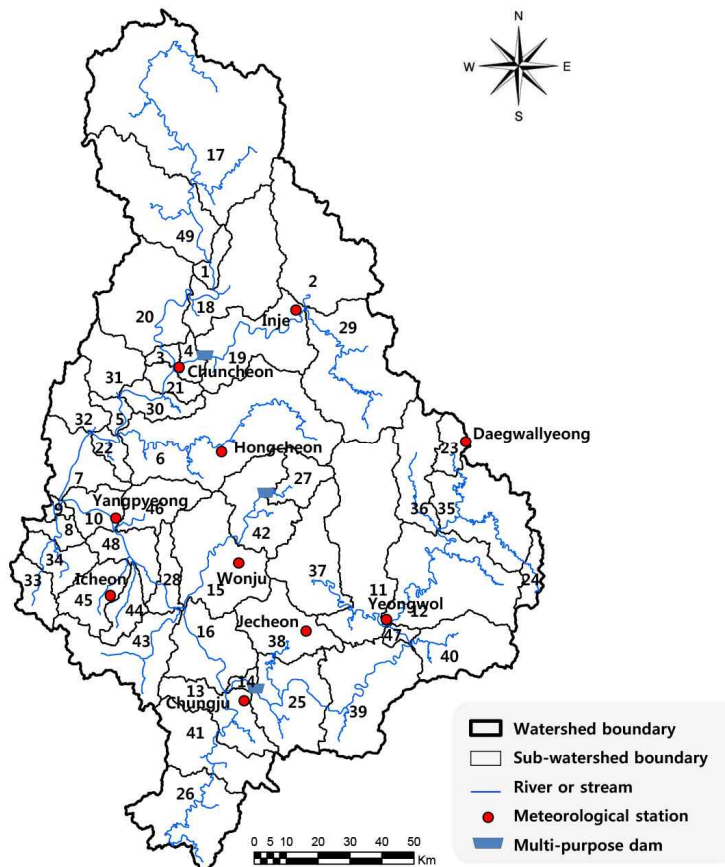


Fig. 1. Sub-watersheds of the Paldang Dam Watershed for SWAT-K Modeling

2.1.3 GIS자료

DEM은 환경부 NGIS 수치지도(1/50,000)를 통해 30m 격자크기로 구축하였으며, 토양도는 국립농업과학원의 정밀토양도(1/25,000)와 토양속성자료를 이용하였다. 이때 평화의댐 상류 및 소양강댐 최상류는 북한지역으로서 국내에서 제작된 토양자료가 없기 때문에 FAO/UNESCO (2003)에서 제공하는 토양도(10km 해상도) 및 각 토양의 속성정보를 활용하였다. 토지이용도는 환경부에서 IRS-1C와 Landsat TM 영상을 이용하여 1999~2001년을 중심으로 작성한 중분류 토지피복도(1/25,000)를 이용하였으며, 모형내 토지피복 및 식생 DB와의 연동을 위해 물을 포함하여 총 15가지 형태로 구분하였다. 혼합림이 15.8%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 유역 내 전체 산림비율은 78.2%, 논 7.2%, 밭은 7.4%를 차지하는 것으로 분석되었다.

2.1.4 인위적 물이용 자료

실제 유역에서의 유출량은 상류에 댐이 위치하는 경우, 댐으로부터의 방류에 의해 크게 영향을 받게 되며, 하천

으로부터의 취수나 유역간 물이동 등에 의해서도 영향을 받게 된다. 따라서 정확한 유역에서의 유출 현상을 규명하기 위해, 유역내 각 댐에서의 관측방류량과 취수장 및 양수장 등으로부터의 실제 취수량 등을 조사하여 모델링에 반영하였다.

댐의 관측유입량 자료를 활용하여 모형의 보정 및 검정을 수행하였으며, 관측방류량 자료의 적용 유무를 통해 댐 운영에 따른 하류측 유출 영향을 평가하였다. Fig. 2(a)~(e)는 유역 내 주요 댐에서의 유입량과 방류량을 나타낸 것으로서, 다목적댐(소양강댐, 충주댐, 횡성댐)과 발전용댐(괴산댐, 팔당댐)의 월별 운영현황 차이를 알 수 있다.

실제 취수량은 하천법 제52조(하천수의 사용 및 관리)의 제3항에 따른 하천수 보고대상 시설물들로부터 보고된 자료를 활용하였다. 팔당댐 상류를 대상으로 2010년 7월 기준, 보고대상 시설물의 수는 104개소로서 전체 허가 시설물(204개소)의 51%이지만, 취수 허가량은 전체 시설물의 허가량 대비 생활·공업용수가 99% 이상, 농업용수가 95% 이상이기 때문에 유역내의 취수량을 충분히 고려할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 3은 한강홍수통제소에서

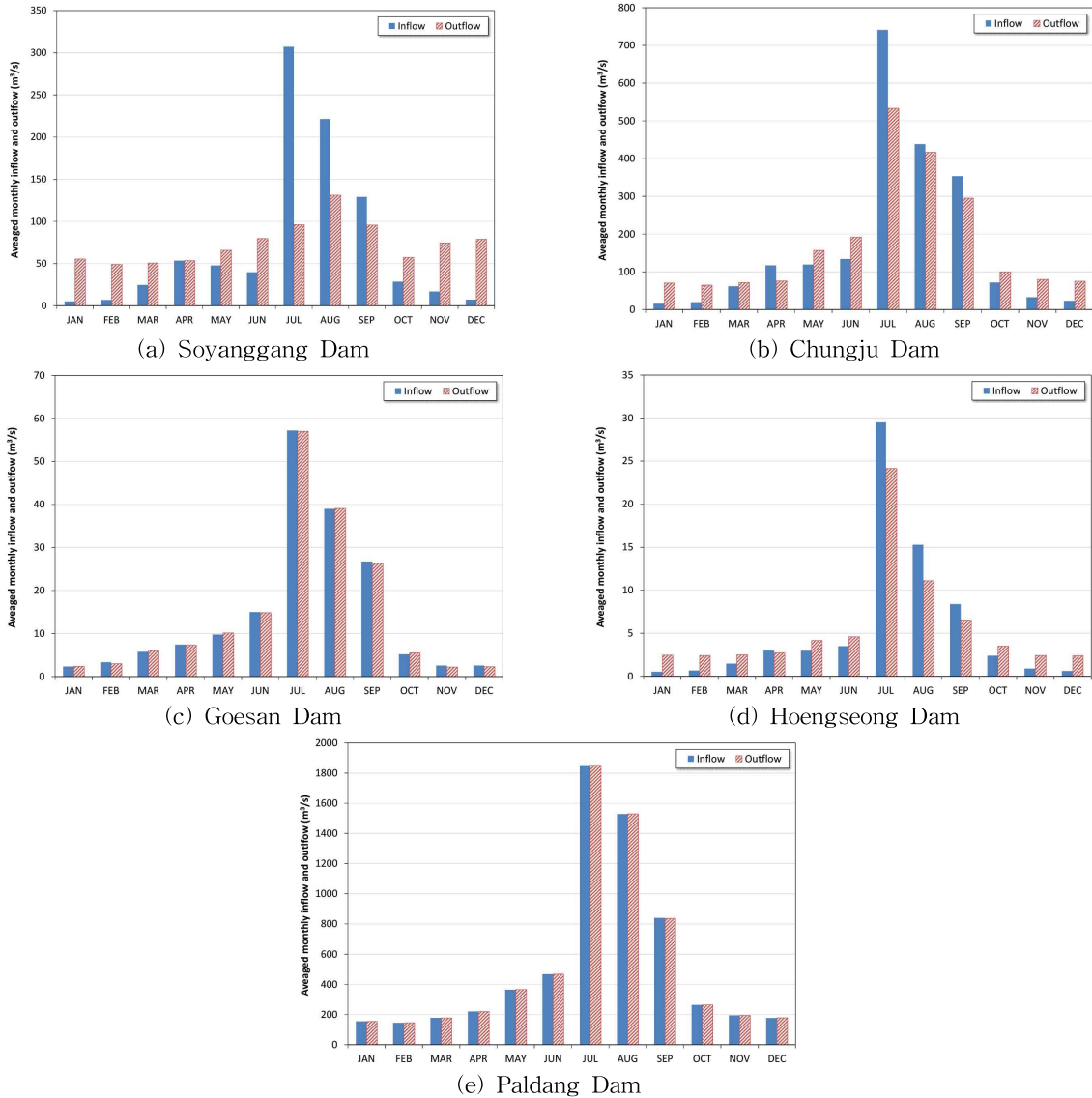


Fig. 2. Monthly Inflows and Outflows of the Dams

수집·관리하고 있는 2002~2009년의 취수량 자료를 분석하여 일평균 취수량으로 나타낸 것이다. 관측된 실제 취수량 중 87%는 북한강과 남한강, 경안천 합류 이후 팔당댐 지점 사이구간(9번 소유역)에서 취수되고 있으며, 충주댐 하류 남한강 본류구간에서 취수되는 양은 전체의 약 8%로 분석되었다.

하천구간에서의 취수량 중 소모되지 않은 일부는 다시 하천으로 들어가게 되는데, 취수량(공급량)에 대한 하천으로의 재유입량을 ‘회귀율’이라 정의하고 있다. 실제 회귀율은 동일 용도의 용수라도 시설물별로 편차가 심하고, 계절별·연도별로도 변화가 크기 때문에 일률적으로 동일한 회귀율을 적용하기가 어려운 상황이다. 기존의 한강수계를 대상으로 한 하천유지 가능 유하량 해석 연구(NIER

Han River Environment Research Center, 2007)에서는 과거 연구들에서 적용된 각 용수별 회귀율과 1980년부터 2000년까지 실측에 의해 조사된 회귀율 등을 검토하여, 최종적으로 공업용수 및 생활용수는 70%, 농업용수는 35%의 회귀율을 결정하여 사용한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 이 값들을 각 시설물에 대한 회귀율로 적용하여 분석하였으며, 발전용수에 대해서는 모두 하류 하천지점으로 재유입되기 때문에 100%의 회귀율을 적용하였다.

2.2 모형 보정과 검증

총괄형(lumped) 모형은 유역 출구에서의 관측자료만을 대상으로 보정과 검정을 수행하는 것이 일반적이나, SWAT-K와 같은 준분포형(semi-distributed) 모형의 경

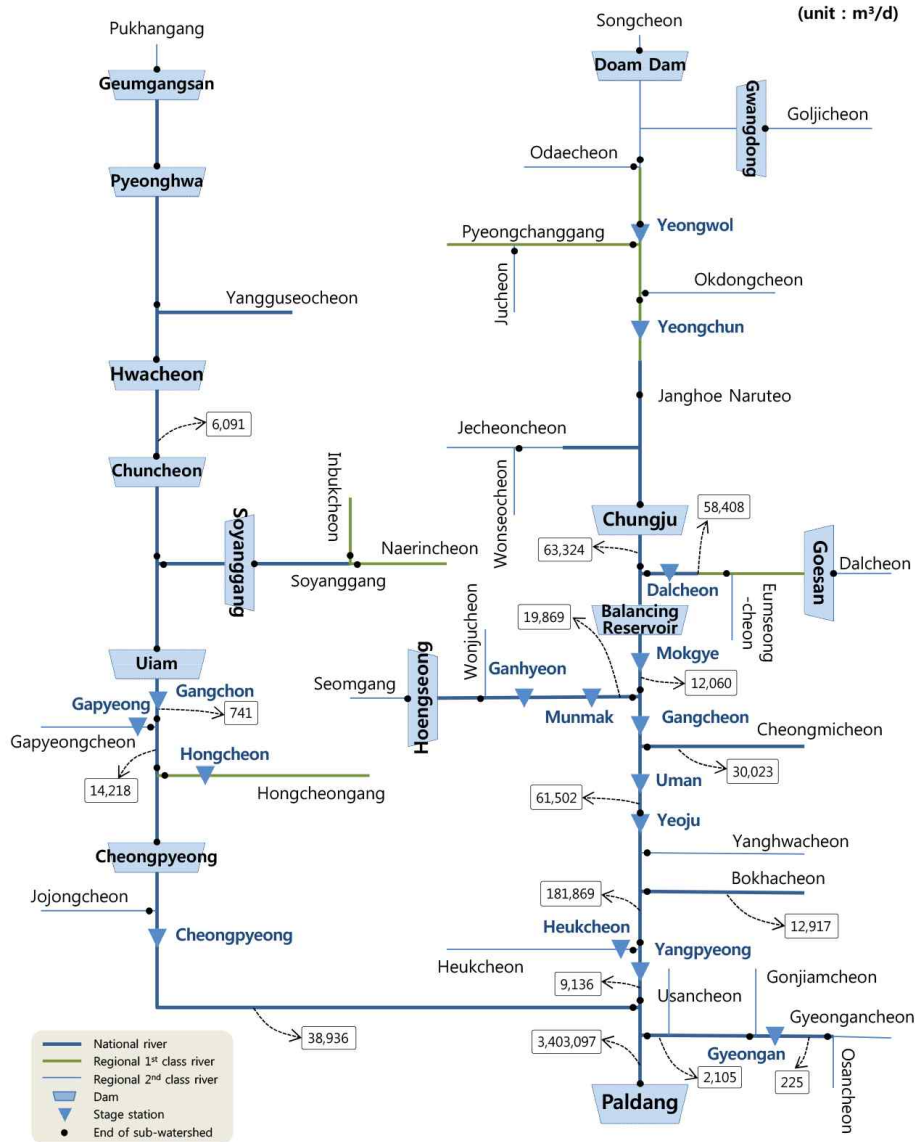


Fig. 3. River Water Uses for each Sub-watershed

우는 유역내 여러 지점들에 대한 모의 정확성이 전제되어야 하므로, 다지점에 대한 보정 및 검정이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 비교적 양질의 자료가 장기간 수집되고 있는 북한강 유역의 소양강댐, 남한강 유역의 충주댐, 괴산댐, 황성댐, 한강 본류의 팔당댐 지점의 관측유입량을 이용하여 매개변수 보정 및 모형의 모의능력을 평가하였다.

보정 및 검정 결과의 평가를 위해 결정계수(coefficient of determination, R^2), 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 상대평균절대오차(relative mean absolute error, RMAE), Nash-Sutcliffe 모형효율지수(model efficiency, NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) 등의 통계치를 검토하였다.

유출량 보정에 이용한 모형 매개변수는 Table 1과 같다.

보정 및 검정기간에 대해서는 비교적 유역 내 인위적인 물이용에 대한 자료가 잘 정리되어 있는 기간을 대상으로 선정하여, 2002~2005년에 대해 보정을 수행하고, 2006~2009년에 대해 검정을 수행하였다.

2.2.1 모형 보정결과

Fig. 4는 보정기간(2002~2005년)에 대해 소양강댐 지점에서의 모의유량을 관측유입량과 비교한 것으로서, 2002년, 2004년, 2005년의 갈수기간 동안의 유량에 다소 차이를 보이고 있으나, 그 외 홍수기 등에서는 잘 일치하는 것으로 나타났다. 갈수기의 유량 차이는 소양강댐 유역의 인북천 최상류부가 북한지역에 속해 있어 해당지역의 토

양도 및 토양 특성에 대한 자료 구축이 정확히 이루어지지 못해 나타나는 이유이기도 하며, 일부 갈수기의 관측자료가 “0”으로 기록되거나 Fig. 4에 나타난 것처럼 “0”에 가깝게 급격하게 떨어지는 문제도 있다.

Fig. 5는 충주댐 지점에서의 모의유량을 관측유입량과 비교한 것으로서, 일부 갈수기간 동안의 유량에 다소 차이를 보이고 있으며, 그 외 홍수기 등에서는 잘 일치하는 것으로 나타났다. 기존의 타 연구(Kim et al., 2007a) 결과에서도 2000년을 전후하여 관측되고 있는 최저유입량이 급격하게 변화를 보이고 있는데, 이는 관측치의 이상일

가능성이 높은 것으로 추정된다.

Table 2는 소양강댐과 충주댐을 비롯하여 괴산댐, 횡성댐, 팔당댐 지점에서의 연간 강수량 및 유출량과 일 유입량에 대한 보정결과를 통계치로 나타낸 것이다.

2.2.2 모형 검정결과

Figs. 6 and 7은 각각 소양강댐과 충주댐 지점에서의 검정결과로서, 일부 갈수기에 관측치가 급격하게 변동하는 것에 비해 모의치의 변동폭이 작고 관측치보다 높게 나타나고 있다. 그 외 기간에 대해서는 관측치의 경향을

Table 1. Input Parameters Used in Calibration for Flows

Variable	Description	Value	
		Initial [†]	Range [‡]
CN2	Moisture condition II curve number	-	0~96
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	31	-
ALPHA_BF	Alpha factor for groundwater recession curve (days)	0.048	0~1
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow (m)	-	-
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.95	0~1

[†]Default values applied in the model

[‡]Typical range suggested in the SWAT theoretical documentation (Neitsch et al., 2005)

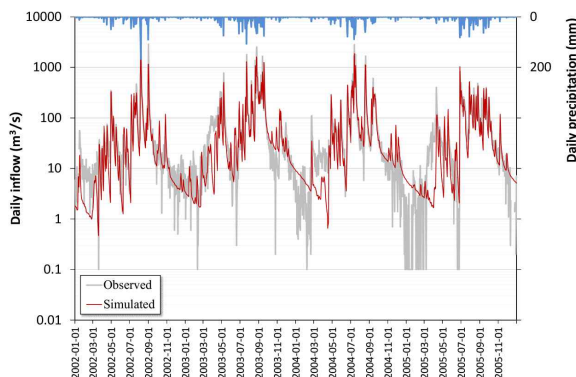


Fig. 4. Observed and Simulated Daily Inflows at the Soyonggang Dam (2002~2005)

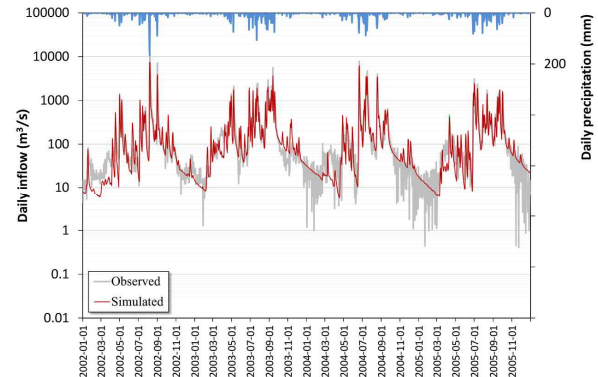


Fig. 5. Observed and Simulated Daily Inflows at the Chungju Dam (2002~2005)

Table 2. Calibration Results (2002~2005)

Site	Averaged annual precipitation (mm)	Averaged annual runoff (mm)		Coefficient of determination, R ²	Model efficiency, NSE	Mean absolute error, MAE (mm/d)	Relative mean absolute error, RMAE
		Observed	Simulated				
Soyonggang Dam	1,414	940	839	0.84	0.83	0.93	0.35
Chungju Dam	1,496	1,016	967	0.84	0.83	1.06	0.38
Goesan Dam	1,473	878	860	0.78	0.78	0.97	0.40
Hoengseong Dam	1,518	972	940	0.74	0.74	1.33	0.48
Paldang Dam	1,445	814	823	0.95	0.94	0.40	0.18

잘 모의하는 것으로 나타났다.

Table 3은 검정기간(2006~2009년)에 대한 연간 강수량과 유입량, 그리고 일 유입량에 대한 통계치 분석결과를 나타낸 것이다.

통계치를 통한 모의능력 분석결과, 결정계수(R^2)와 모형효율(NSE) 모두 0.78~0.97 범위로서 양호한 것으로 나타났다.

3. 연구결과

보정과 검정을 통해 충분히 신뢰성이 검증된 모형 모의 자료를 기반으로 댐 운영 및 인위적 물이용 상태에 따른 유량변화 영향을 분석하였다. 분석을 위해 유역내 모든 댐 운영이 이루어지는 2001~2009년의 동일 기간에 대해서 다음과 같은 조건에서의 유출량 모의 결과를 비교하였다.

- 자연상태(Natural): 댐 방류량 및 하천 취수량 적용하지 않은 경우
- 인위상태-1(WU-1): 댐 방류량 및 하천 취수량 모두 적용한 경우
- 인위상태-2(WU-2): 댐 방류량만 적용하고, 하천 취

수량은 적용하지 않은 경우

- 인위상태-3(WU-3): 다목적댐(소양강댐, 충주댐, 횡성댐) 방류량을 적용하지 않은 경우

3.1 주요지점별 갈수량 변화

Fig. 8은 위와 같은 조건에 대해 모의된 갈수량을 주요 지점에 대해 비교한 결과이다. 상류측의 모든 댐 방류량과 하천 취수량의 영향을 받는 최하류 팔당댐 지점에서의 갈수량 차이가 가장 크게 나타나고 있으며, 달천 종점에서의 차이가 가장 작은 것으로 분석되었다. 다목적댐 운영에 따른 영향은 인위상태-1과 인위상태-3의 차이로 분석할 수 있으며, 팔당댐 지점에서 100.57 m³/s, 북한강 종점에서 33.01 m³/s, 양평수위표 지점에서 49.66 m³/s 등 대부분의 댐 하류에서 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면, 인위상태-1과 인위상태-2의 차이로 파악할 수 있는 하천수 취수의 영향은 북한강 지역은 거의 없으며, 남한강 지역을 중심으로 상류로부터 목계수위표 지점 0.38 m³/s, 여주수위표 지점 0.57 m³/s, 양평수위표 지점 0.98 m³/s, 팔당댐 지점 1.93 m³/s만큼 하천수 사용으로 인하여 갈수량이 일부 감소되는 것으로 분석되었다.

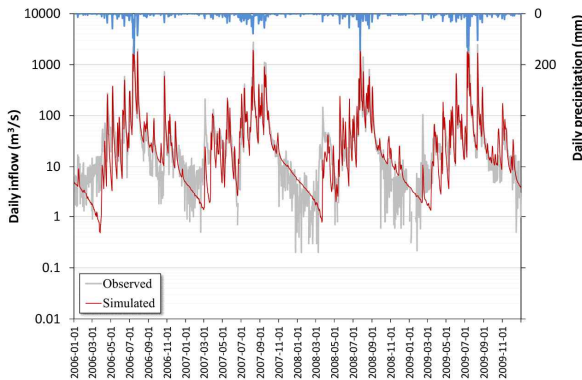


Fig. 6. Observed and Simulated Daily Inflows at the Soyonggang Dam (2006~2009)

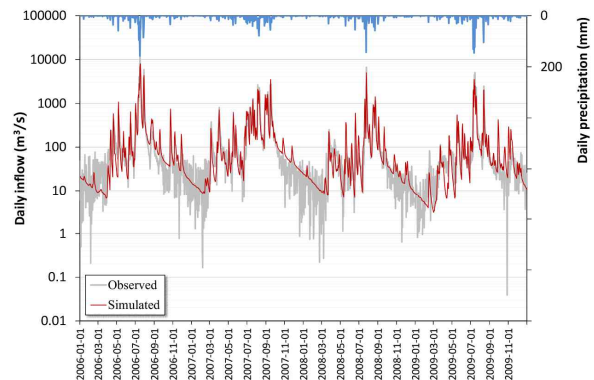


Fig. 7. Observed and Simulated Daily Inflows at the Chungju Dam (2006~2009)

Table 3. Validation Results (2006~2009)

Site	Averaged annual precipitation (mm)	Averaged annual runoff (mm)		Coefficient of determination, R^2	Model efficiency, NSE	Mean absolute error, MAE (mm/d)	Relative mean absolute error, RMAE
		Observed	Simulated				
Soyonggang Dam	1,366	897	823	0.91	0.88	0.83	0.33
Chungju Dam	1,303	807	784	0.83	0.80	0.93	0.42
Goesan Dam	1,146	599	591	0.78	0.78	0.69	0.42
Hoengseong Dam	1,339	891	803	0.85	0.79	1.25	0.48
Paldang Dam	1,325	722	718	0.97	0.97	0.30	0.15

3.2 월별 유량 및 유황 변화

Fig. 9는 각 조건에 따른 유출량의 차이를 월별로 비교한 것으로, 다목적댐 중 가장 규모가 작은 횡성댐이 위치한 섬강 종점에서의 결과이다. 인위상태-1과 인위상태-2가 비슷한 것은 하천수 사용량이 크지 않음을 의미한다. 또한, 인위상태-1과 인위상태-3의 차이가 월별 $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$ (4월)~ $3.34 \text{ m}^3/\text{s}$ (7월)로 횡성댐에 의한 유출 영향도 크지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 남한강 하류에 위치한 양평 수위표에서의 결과로서, 인위상태-1과 인위상태-3의 차이가 1월 $55.78 \text{ m}^3/\text{s}$ 및 7월 $122.40 \text{ m}^3/\text{s}$ 로, 갈수기와 홍수기에 충주댐 운영에 의한 유량 차이가 확연히 나타나고 있다. 이에 비해 상대적으로 작긴 하지만 하천수 취수량에 의한 영향은 0.78 m^3/s (2월)~ $6.81 \text{ m}^3/\text{s}$ (5월)로 분석되었다. 특히 취수량 중 큰 비중을 차지하는 농업용수 사용 패턴에 따라 4월~9월에 유출에 영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 북한강 종점에서의 결과로서, 소양강댐으로 인

한 유량조절효과가 12월에 $61.09 \text{ m}^3/\text{s}$, 7월에 $136.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났으며, 6~11월에는 청평댐, 의암댐 등 다른 댐들에 의한 홍수조절효과도 함께 나타나고 있다. 반면, 북한강 구간의 실제 취수량이 많지 않은 관계로 하천수 사용에 의한 영향은 $0.10 \sim 0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 매우 작게 나타났다.

Fig. 12는 유역 최하류 지점인 팔당댐 지점에서의 결과이다. 상류 다목적댐 및 여러 댐들의 영향으로 12~3월과 7~9월에 유량 차이가 크게 나타났다. 3개 다목적댐에 의한 영향은 12월에 $101.16 \text{ m}^3/\text{s}$, 7월에 $261.71 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 분석되었다. 하천 취수량에 따른 갈수량의 차이는 최소 $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$ (2월)에서 최대 $7.39 \text{ m}^3/\text{s}$ (5월)로 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

추가적으로 Fig. 13은 팔당댐 지점에 대해 자연상태와 인위상태-1, 인위상태-3에서의 유황곡선을 비교한 것이다. 자연상태와 인위상태-3의 유황곡선이 비슷하게 나타난 것은 다목적댐을 제외한 다른 댐들 및 하천수 사용량에 따른 영향이 상대적으로 크지 않음을 의미한다. 반면, 인위상태-1과 인위상태-3의 비교를 통해 알 수 있듯이 다

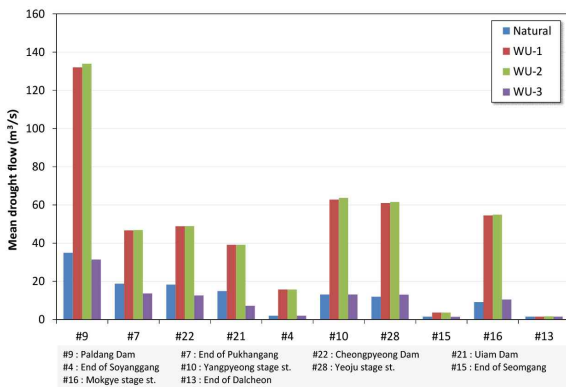


Fig. 8. Comparison of Mean Drought Flows with Water Use Scenarios

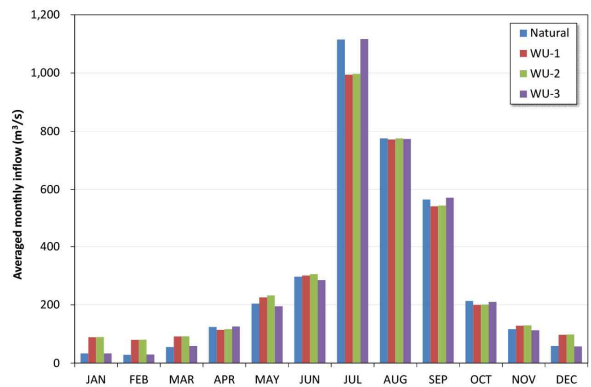


Fig. 10. Variation of Monthly Inflow with Water Use Scenarios at the Yangpyeong Stage Station

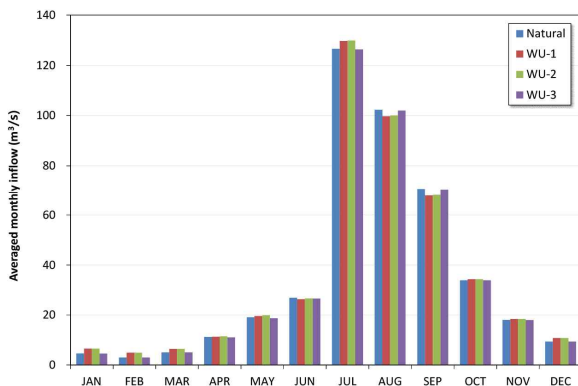


Fig. 9. Variation of Monthly Inflow with Water Use Scenarios at the End of Seomgang

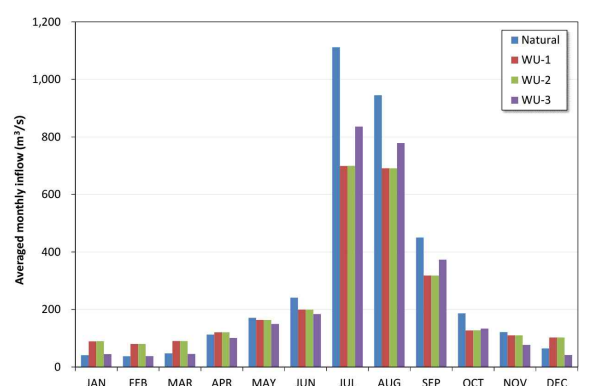


Fig. 11. Variation of Monthly Inflow with Water Use Scenarios at the End of Pukhangang

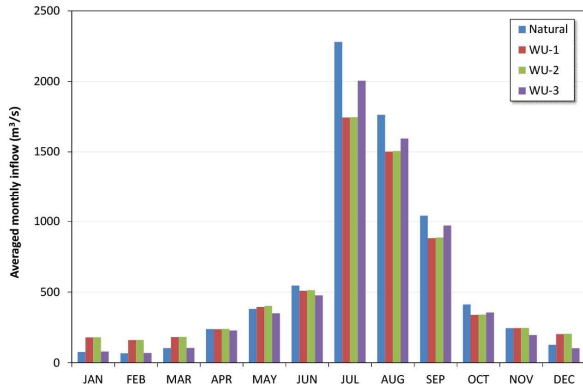


Fig. 12. Variation of Monthly Inflow with Water Use Scenarios at the Paldang Dam

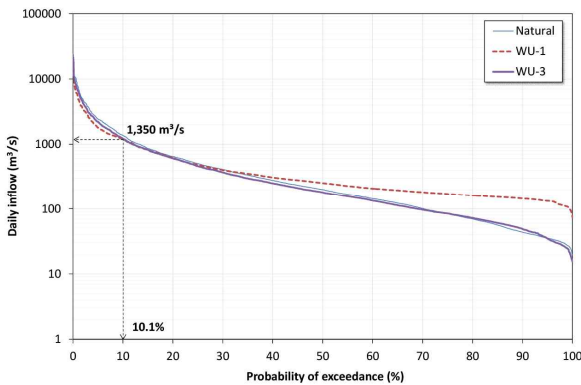


Fig. 13. Comparison of Flow Duration Curves for Inflows at the Paldang Dam

목적댐의 운영에 따른 유황 차이가 크게 나타나고 있으며, 초과확률 10.1% 이상의 유량(1,350 m³/s 이하의 유량)에 대해 다목적댐 운영에 따른 유황개선효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

유사한 연구로서, Kim et al. (2007b, 2012)은 1987~2000년 기간에 대해 횡성댐 및 하천수 사용량을 고려하지 않고 충주댐과 소양강댐 운영에 의한 팔당댐 지점의 유량조절효과를 분석한 결과, 초과확률 14.7% 이상의 유량에 대한 유황개선효과가 있다고 제시한 바 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 팔당 상류지역을 대상으로 SWAT-K 유역모형을 이용한 정교한 수문해석을 통해, 댐 운영 및 하천으로부터의 취수 등 인위적 물이용에 따른 영향을 정량적으로 분석하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

인위적 물이용에 따른 하류측 하천구간에서의 유황 변화 영향을 검토한 결과, 북한강 및 남한강 본류구간에 대

해 유역내 하천 취수량이 갈수량에 미치는 영향은 매우 작게 나타났으며, 반면 다목적댐 운영에 의한 갈수량의 증가는 팔당댐 지점 100.57 m³/s (320%), 북한강 종점 33.01 m³/s (241%), 양평수위표 지점 49.66 m³/s (379%) 등으로 크게 나타났다.

다목적댐을 중심으로 한 하류지역의 유출 변화를 검토한 결과, 가장 규모가 작은 횡성댐 하류에 위치한 섬강유역은 댐 운영 및 하천수 사용에 따른 유출 영향이 크지 않은 것으로 나타났으나, 북한강 종점과 양평수위표 지점은 각각 상류의 소양강댐 및 충주댐의 영향으로 인해 갈수기와 홍수기 유량 차이가 크게 나타났다. 특히 남한강 하류에 위치한 양평수위표 지점은, 댐 운영 영향에 비해 매우 작긴 하지만 본류구간의 하천수 취수에 의한 유량 차이가 타 지점보다 크게 나타났으며, 4~9월의 농업용수 사용 패턴에 따른 유출 영향을 확인할 수 있었다.

유역 최하류 지점인 팔당댐에서는 상류 3개 다목적댐을 포함한 모든 댐과 하천수 사용량의 영향을 모두 받기 때문에 그 차이가 더 크게 나타났으며, 약 1,350 m³/s 이하의 유량에 대해 다목적댐 운영에 따른 유황개선효과가 있는 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 팔당댐 유입량 측면에서는 횡성댐이나 하천수 사용량의 영향은 상대적으로 크지 않음을 알 수 있으며, 기존의 타 연구에서와 같이 장기간의 유황분석에서는 제외시켜도 무방할 것으로 판단된다. 그러나 본류 또는 지천구간에서의 정교한 유출분석을 요하는 경우에는 본 연구에서와 같이 해당 구간의 취수량, 방류량, 물 이동량 등에 대한 정보가 필수적으로 고려되어야 할 것이다. 다목적댐 운영 및 하천 취수 등을 고려한 장기간에 걸친 유출 변화 분석을 통해, 현재의 가용수자원에 대한 정확한 산정은 물론, 국가적 차원에서의 수자원 계획 및 합리적인 배분과 효율적 관리방안의 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage

- Paper No. 56, FAO, Rome.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- FAO/UNESCO (2003). *Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties (Version 3.6)*. CD-ROM, Information Division, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/dsmw.stm>
- Kang, S.K, Lee, D.R., Moon, J.W., and Choi, S.J. (2010). "Effects of dams and water use on flow regime alteration of the Geum River Basin." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 43, No. 4, pp. 325-336.
- KICT (2004). *Analysis and modeling for surface water hydrological components*. 21st Century Frontier R&D Program: Sustainable Water Resources Research Project, MEST.
- KICT (2007). *Development of analyzing system for surface water hydrological components*. 21st Century Frontier R&D Program: Sustainable Water Resources Research Project, MEST.
- Kim, B.K, Kim, B.S, and Kwon, H.H. (2009). "Impact assessment of agricultural reservoir on streamflow simulation using semi-distributed hydrologic model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 1B, pp. 11-22.
- Kim, N.W., Lee, B.J., and Lee, J.E. (2007a). "Analysis of the characteristics of low-flow behavior based on spatical simulated flows." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 4B, pp. 431-440.
- Kim, N.W., Lee, J.E., and Kim, J.T. (2012). "Assessment of Flow Regulation Effects by Dams in the Han River, Korea on the Downstream Flow Regimes Using SWAT." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 138, No. 1, pp. 24-35.
- Kim, N.W., Lee, J.E., and Lee, B.J. (2007b). "Characteristics of flow duration curve according to the operation of multi-purpos dams in the Han-river basin." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 27, No. 1B, pp. 53-63.
- Kim, S.H., and Kim, J.S. (2013). "Effect of Chungju Dam operation for flood control in the upper Han River." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 33, No. 2, pp. 537-548.
- Kim, T.G., Yoon, Y.N., and Ahn, J.H. (2002). "An analysis on the changes of flow duration characteristics due to dam construction." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 807-816.
- KOWACO (1990). *Comprehensive long-term Water Resources Plan (1991-2011)*.
- Lee, J.W., Kim, H.S., and Woo, H.S. (1993). "An analysis of the effect of damming on flow duration characteristics of five major rivers in Korea." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 79-91.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I-A: Discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 257-277.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool: The theoretical documentation (Version 2005)*. U.S. Agricultural Research Service.
- NIER Han River Environment Research Center (2007). *Analysis of discharge for maintaining the stream in the basin*. 2006 Han River Environment Survey Project, WMC of Han River.
- Park, B.J., Kim, H.S., Jung, K.S., and Ji, H.K. (2008). "A study on the impact range calculation at the downstream of dam." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 41, No. 10, pp. 1009-1021.
- Yoon, Y.N., Kang, B.S., Kim, U.T., Kim, J.H., and Ko, I.H. (1998). "An analysis on the variation of long-term runoff characteristics of basin before and after dam construction: II. An analysis on the variation of long-term runoff characteristics of basin using model parameters estimation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 18, No. II-5, pp. 461-468.

paper number : 14-083

Received : 29 August 2014

Revised : 25 September 2014 / 30 September 2014

Accepted : 30 September 2014