

ORIGINAL ARTICLE

## 금강-보령댐 도수터널 운영에 따른 금강 본류 내 수위 영향 분석 연구

장석환 · 오경두<sup>1)\*</sup> · 오지환<sup>2)</sup>

대전대학교 건설시스템공학과, <sup>1)</sup>육군사관학교 토목환경학과, <sup>2)</sup>대전대학교 토목환경공학과

### Impacts on Water Surface Level of the Geum River with the Diversion Tunnel Operation for Low Flow Augmentation of the Boryong Dam

Suk-Hwan Jang, Kyoung-Doo Oh<sup>1)\*</sup>, Ji-Hwan Oh<sup>2)</sup>

*Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon 11159, Korea*

<sup>1)</sup>*Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Military Academy, Seoul 01815, Korea*

<sup>2)</sup>*Department of Civil and Environmental Engineering, Daejin University, Pocheon 11159, Korea*

#### Abstract

Recently severe drought caused the water shortage around the western parts of Chungcheongnamdo province, South Korea. A Diversion tunnel from the Geum river to the Boryong dam, which is the water supply dam for these areas has been proposed to solve this problem. This study examined hydraulic impacts on the Geum river associated with the diversion plan assuming the severe drought condition of 2015 would persist for the simulation period of 2016. The hydraulic simulation model was verified using hydrologic and hydraulic data including hourly discharges of the Geum river and its 8 tributaries, fluctuation of tidal level at the mouth of the river, withdrawals and return flows and operation records of the Geum river barrage since Feb. 1, 2015 through May 31, 2015. For the upstream boundary condition of the Geum river predicted inflow series using the nonlinear regression equation for 2015 discharge data was used. In order to estimate the effects of uncertainty in inflow prediction to the results total four inflow series consisting of upper limit flow, expected flow, lower limit flow and instream flow were used to examine hydraulic impacts of the diversion plan. The simulation showed that in cases of upper limit and expected flows there would be no problem in taking water from the Geum river mouth with a minimum water surface level of EL(+) 1.44 m. Meanwhile, the simulation also showed that in cases of lower limit flow and instream flow there would be some problems not only in taking water for water supply from the mouth of the Geum river but also operating the diversion facility itself with minimum water surface levels of EL(+) 0.94, 0.72, 0.43, and 0.14 m for the lower limit flow without/with diversion and the instream flow without/with diversion, respectively.

**Key words** : Drought, Geum river, Diversion, Water supply, Intake facilities

Received 16 June, 2017; Revised 26 July, 2017;

Accepted 27 July, 2017

\*Corresponding author: Kyoung-Doo Oh, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Military Academy, Seoul 01815, Korea

Phone : +82-2-2197-2857

E-mail : okd0629@hanmail.net

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

본 연구의 대상인 금강은 수자원 확보를 위하여 중상류부의 대청댐과 용담댐, 하류부에는 금강하굿둑이 있으며 최근 4대강 살리기 사업의 일환으로 세종보, 공주보, 백제보를 설치하여 운영하고 있다. 그러나 최근 2014년부터 2015년까지 전국적으로 가뭄에 의한 농업용수 부족 등 사회, 경제적 피해가 크게 발생하였고(Jang, 2016), 특히 충청남도 서·북부권 8개 지자체의 용수 공급을 담당하는 보령댐은 전국적인 가뭄을 피해갈 수 없어 홍수기 경우는 1/3수준, 2015년 11월의 댐 저수율은 역대 최저인 18.9%까지 도달하였다(Lee, 2016). 이에 따라 용수 공급의 안정성을 확보하고자 금강 본류의 중·하류부에 해당하는 백제보 하류 6.7 km 지점에서 보령댐까지 21.9 km의 도수터널을 신설하고, 금강 본류에서 보령댐으로 121,000 m<sup>3</sup>/day를 통수하여 연계 운영하는 계획이 수립되었다. 먼저 국내외 도수터널 사례를 살펴보면, 1991년 05월 주암댐과 주암조절지댐 간 연장 11.49 km의 도수터널을 설치하여 상호 연계 운영할 수 있도록 계획되었으나, 터널 자체의 안정성 문제로 2015년 01월 시설안정화 사업이 추진되어 신규 도수터널이 시공 중에 있고, 1997년 12월 준공된 연장 21.90 km의 용담댐에서 고산정수장으로 통수하는 용담댐 도수터널이 있다. 그리고 2001년 05월의 금호강의 수질개선과 경북 동남부지역의 용수공급을 위하여 임하댐과 영천댐을 연결하는 연장 33.0 km의 영천댐 도수로 터널과 2015년 05월 설치된 연장 1.93 km 안동댐과 임하댐 간 연결 터널이 운영되고 있다. 일본의 경우는 키누강 유역의 이카리댐과 카와지댐을 연결하는 연장 1.09 km의 도수터널과 오키나와 군도의 후쿠치댐, 베노키댐, 혼가와댐, 아하댐, 신가와 댐 등 5개 댐을 통합 운영된 사례가 있고(Park and Chung, 2014), 미국의 Trinity 강의 Lewiston댐에서 Sacramento 강의 지류인 Whiskeytown 댐을 Clear Creek 터널로 연결한 사례가 있다(Douglas and Taylor, 1999). 궁극적으로 도수터널은 저수지와 저수지 간의 유역 변경 방식으로 무효방류량을 줄여 용수를 효과적으로 운영하는 것으로 볼 수 있다.

이와 관련된 연구 동향으로는 Ham et al.(2001)은

도수터널 굴착 전후 주변 지하수공의 수위변동을 파악하여 지하수위 회복가능성을 분석하였다. 그리고 Park(2012)은 안동-임하호를 연결한 모델을 구축하여 탁수가 댐에 미치는 영향을 W2 모델을 활용하여 분석하였으며, 2014년에는 수온성층 변화를 분석하였다. Jeong and Kim(2014)은 안동호와 임하호의 과거 수문자료를 통해 이수적 효과를 분석하고, 저수지 모의 운영을 수행하여 효율적인 운영 방안을 마련하였다. 또한 Jang and Ji(2014)는 금강을 횡단하는 안정성이 확보된 도수관로의 매설구간 선정에 2차원 수치 모형인 CCHE2D를 활용하여 흐름해석 및 하상변동 분석을 수행하여 도수관로 횡단경로의 최적구간을 선정할 연구가 있다. 본 연구 주제인 보령댐 도수터널은 댐과 댐 간의 운영이 아닌 하천과 댐의 연계 운영으로서, 2014-2015년과 같은 가뭄이 발생하여 본류의 유량이 감소됨과 동시에 보령댐 유역의 용수 공급을 위한 도수를 실시할 경우, 금강의 하굿둑과 보 운영을 포함하여 농·공용수 취수시설 운영의 문제 등 악영향이 발생할 가능성이 존재한다.

본 연구에서 활용할 수치 모형의 경계조건을 고려하기 위하여 금강 중·하류부의 수리특성과 관련된 연구동향을 추가적으로 살펴보았다. 주요 구간의 수리특성에 관한 연구는 금강하굿둑의 건설에 따른 수리특성, 하상변동 및 퇴적토사량 예측, 댐 운영을 고려한 생태 수문학적 평가, 조도계수 검토 등 많은 연구가 이루어졌다. Sur(1998)는 실제 관측을 통하여 고찰한 금강 하구에서 공사로 인한 발생된 수리동역학적 변화 연구를 수행하고자 2차원 수심적분의 유한요소모형을 선정하여 금강하굿둑의 수문개폐 여부에 따른 유동장의 변화와 퇴적환경의 변화를 분석하였다. Park and Kim(1999)은 금강하굿둑의 설치 전후 홍수사상을 바탕으로 홍수 시 수리특성과 통수단면적 변화를 조사하여 하굿둑이 금강하류부의 홍수위 도달시간 검토 등 홍수흐름특성에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 Lee et al.(2005)은 하굿둑의 수문 개폐에 따른 수리특성을 분석하기 위하여 금강 하구의 3개의 사주를 중심으로 주변의 유량, 유속 등을 측정하여, 수문 개폐에 따라 유속 차이로 인한 총 유량차가 최소 1.9 배~최고 24.2배의 차이가 있는 것으로 분석하였다. Ko et al.(2009)은 상류 용담댐과 대청댐의 건설 및

운영에 따라 예측되는 유황변화를 분석하고자 유역물수지 모델인 KModSim과 하천생태분석 모델인 RAP를 이용하여 분석하였는데, 고유량은 20.5%, 8.0% 감소한 반면 저유량은 156.3%, 340.8%가 증가하여 댐 운영이 유황변동율을 감소시켜 하천에 영향을 미치는 것으로 분석하였다. Jeong et al.(2009)은 수위유지시설 설치로 인한 하천의 홍수위험을 검토하고자 세종시 금강구간을 중심으로 200년 빈도 홍수량에 대하여 1차원 HEC-RAS와 2차원 FESWMS 모델을 이용하여 수위유지시설 설치 높이에 따른 홍수위 변화를 비교, 분석한 바 있으며, Kim et al.(2015)은 금강 중·하류부에 건설된 세종보 상류를 중심으로 2차원 수치모형인 SED-2D모형을 활용하여 흐름 및 하상변동 특성을 분석한 바 있다.

앞서 수행된 선행 연구를 바탕으로 본 연구에서는 금강 중·하류부 구간에 대하여 가뭄 발생에 따라 감소되는 본류 유입량 예측과, 도수터널의 취수량을 모의에 반영하여 취수량이 본류 수위에 미치는 영향을 비정상류 해석(unsteady flow analysis)이 가능한 1차원 모형인 HEC-RAS 모형으로 검토하였다. 본 논문은 도수터널 운영이 금강에 미치는 수리-수질적인 영향을 검토한 연구 중 수위와 관련된 내용을 중점적으로 정리한 것이며, 본 연구의 결과로 얻어지는 수위와 유속, 유량 등 수리적인 모의 결과를 이용하여 염도와 용존산소, 수온, 영양염류, 조류 등 수질에 미치는 영향을 분석한 내용은 별도의 논문으로 작성하였다.

## 2. 수리 모형의 구축 및 검증

### 2.1. 수리 모형의 구축 및 경계조건 설정

연구 대상 주요 구간은 금강 중하류부로서, 총 연장은 85.0 km를 적용하였다. 아래 Fig. 1은 주요 시설물과 모의 검정을 위한 금강홍수통제소에서 운영하는 수위표의 위치를 보여주고 있다.

금강 하류부는 서해안의 조위 변화 영향이 직접적으로 미치는 구간으로, 1990년 11월 대단위 농업종합개발사업에 따라 금강하굿둑이 준공되어 금강, 동진강, 만경강 연안 농경지의 용수 공급과 충남 및 전북 인근의 생활, 공업용수를 공급하도록 계획되었다



Fig. 1. Study area of the Geum river.

(MOLIT, 2011). 하굿둑은 운영자의 수문조작에 따라 기점수위의 역할을 담당하여 직접적인 배수위 영향을 받고, 하굿둑으로부터 57.57 km 지점에 백제보가 2012년 06월 준공되어 운영자에 의해 인위적인 운영이 이루어지는 수리적 특성을 보이고 있다. 모의를 위하여 금강수계 하천기본계획보고서(MOLIT, 2011)의 하천 횡단 측량 자료를 사용하였고, 하굿둑부터 연안에 해당하는 구간은 전자해도와 위성지도를 사용하여 지형을 구축하였다. 연안 구간까지 추가적으로 지형 구축을 실시한 이유는 향후 염도를 포함한 수질 모의 시에 하굿둑 운영에 따른 해수 역류 조건을 모의하기 위함이다. 모형 내 주요 매개변수인 Manning의 조도계수는 금강수계 하천기본계획보고서(MOLIT, 2011)에서 활용한 No.0~34+490까지 0.025, No.34+ 490~57+330까지 0.026, No.57+330 상류쪽으로는 0.027을 동일하게 적용하였고, 모의 영역 확장 구간은 인접구간과 동일하게 0.025를 적용하였다. 상류단 경계조건은 갈수기 유황에 해당하는 2015년 2월 1일부터 5월 31일까지를 대상으로 금강홍수통제소의 진두수위표의 시간별 유량을 수집하였으며, 하류단 경계조건은

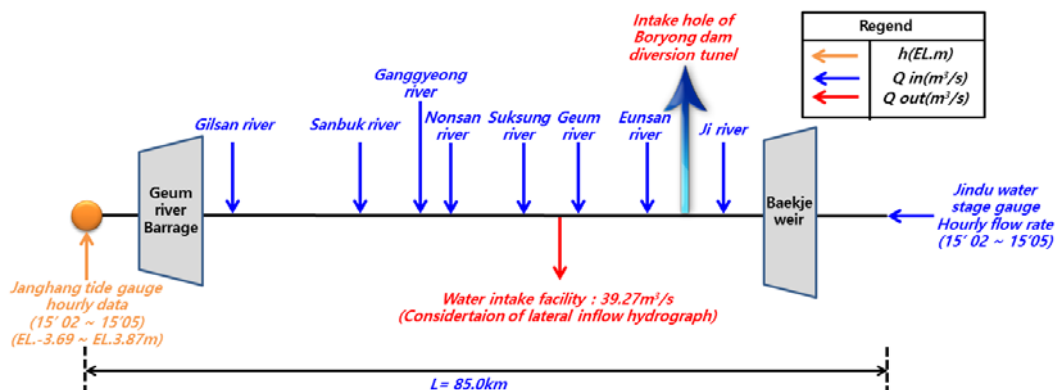
**Table 1.** Area ratio for estimation the inflow of tributary

River name	Distance from Geum river barrage(km)	Area(km <sup>2</sup> )	Area ratio(%)
Gilsan	0.720	115.8	1.50
Sanbuk	24.050	43.8	0.57
Ganggyeong	33.270	162.2	2.10
Nonsan	33.830	497.6	6.44
Suksung	38.220	145.6	1.88
Geum	49.400	182.8	2.37
Eunsan	52.540	49.2	0.64
Ji	57.330	246.2	3.19
Jindu water stage gauge	71.110	7,727.7	100

국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr>)의 장항검조소의 분 자료를 60분 단위로 필터링 처리한 시간별 조위를 사용하였다. 구간 내 주요 지류는 8개 하천으로 실측자료가 없기 때문에 Table 1과 같이 진두수위표와 유역 면적비를 적용하여 시간별 유량을 입력하였다. 또한 용수 공급을 위한 취·양수장 등을 고려하기 위하여 금강홍수통제소로부터 하천수 사용허가를 받은 취수시설물을 문헌조사와 현장조사를 통하여 작성하고, 백제보 소수력을 포함하여 24개소에 대하여 측방유출(lateral inflow hydrograph)로 처리하여 유량 유입과 손실을 모의에 반영하였다. 또한 도수터널 운영 계획에 따라 백제보 하류 6.7 km 지점의 1.4 m<sup>3</sup>/sec 가 유출되는 것으로 적용하였다. 다음 Fig. 2는 모형의 모식도를 보여주고 있다.

**2.2. 하굿둑 운영 실적 분석을 통한 운영률 입력**

금강하굿둑은 현재 한국농어촌공사 관할로 자체 운영하고 있으며 운영 방식을 고려하기 위하여 현장조사를 실시하였다. 조사 결과, 관리수위는 계절별로 달리 운영되는데, 최대용수가 필요한 시기인 3월~6월은 EL.(+)2.0 m로 유지하고, 홍수기와 용수이용이 상대적으로 줄어드는 7월~2월에는 EL.(+)1.0 m로 유지한다. 또한 평수기 운영은 외조위와 내수위의 수위 차에 따라 운영되는데 외조위가 내수위보다 30 cm 이상 높을 경우에는 수문을 폐쇄하여 해수의 역류를 방지하고, 내수위가 외조위보다 30 cm 이상 높을 경우에는 수문을 개도하여 하천수를 방류한다. 아래 Table 2는 2015년 2월 1일~2015년 5월 31일까지의 금강하굿둑의 갈수기 수위 변동을 분석한 것이다. 전체적인 경향은 4월과 5월로 갈수록 하굿둑의 수위는 증가하는



**Fig. 2.** Schematic diagram of the Geum river and boundary conditions.

**Table 2.** Statistical characteristics of water stage data in Geum river barrage (2015.2.1~5.31)

Classification (EL.m)	Unit : EL.m			
	February	March	April	May
Min.	0.0900	0.2000	0.4400	0.0000
1st Qu.	1.1100	1.1200	1.3500	1.4200
Mean	1.2485	1.2632	1.4709	1.5364
Median	1.2900	1.2800	1.5900	1.5600
3rd Qu.	1.4300	1.4500	1.6700	1.6700
Max.	1.7300	1.7200	1.8700	1.9700
Total N	673	744	720	744
Std Dev.	0.2668	0.2453	0.2815	0.1924

추세를 보이는데, 이는 본격적인 농업용수 공급시기에 맞춰 답수를 위한 운영을 실시하기 때문이다. 하한 수위에 해당하는 누적백분율 25%인 1분위 값(1st Qu.)은 2월과 3월은 EL.(+)1.1 m 정도를 유지하지만 4월과 5월에는 각각 EL.(+)1.35 m, EL.(+)1.42 m로 수위를 상승시키는 것을 알 수 있다. 평균수위(mean)와 중앙값(median)은 최소 EL.(+)1.25 ~EL.(+)1.56 m의 범위로 수위가 상승되고, 누적백분율 75%인 3분위 값(3st Qu.)은 EL.(+)1.43 ~EL.(+)1.67 m로 나타나 용수공급을 위한 수위 조절을 하는 것으로 나타났다. 최고수위의 경우는 2월과 3월에 EL.(+)1.70 m 정도를 유지하며 4월과 5월에 EL.(+)1.87 m와 EL.(+)1.97 m로 다소 상승하며 최고수위를 포함하여 모두 EL.(+)2.0 m 이하로 유지된다. 이는 EL.(+)2.0 m가 초과될 경우 배수위 영향으로 인해 상류 45.0 km 지점에 해당하는 강경 비닐하우스 단지 등 인근 저지대의 내수배제가 불량하여 침수피해를 입을 수 있기 때문인 것으로 조사되었다. 현장조사 결과와 수위 변동 결과를 토대로 하굿둑을 모형 내에서 Inline structure로 지정하고, 시행착오법에 의해 실제 운영 실적과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 입력하였다.

**2.3. 모형의 검증**

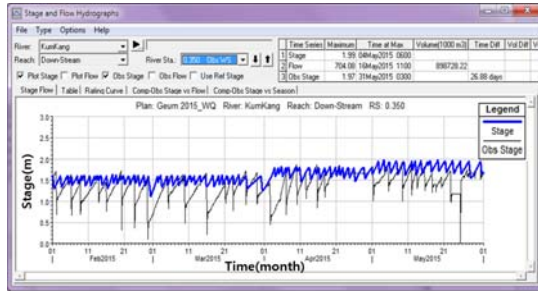
모의 결과가 실제 현상에 부합되어 나타나는지 재현성 검토를 위하여 모의 수위와 실측수위의 비교, 분석을 실시하였다. 금강홍수통제소에서 제공하는 금강 하굿둑, 입포, 강경, 규암, 백제보, 진두수위표 등 6개

의 수위표의 자료를 수집하여 모형의 검정을 시도하였다. 모의치와 실측치의 비교 분석 결과는 아래 Fig. 3과 같으며, 여기에서 굵은 실선이 모의치(stage)이고, 가는 실선이 실측치(obs stage)로서 시계열 자료로 도시하였다.

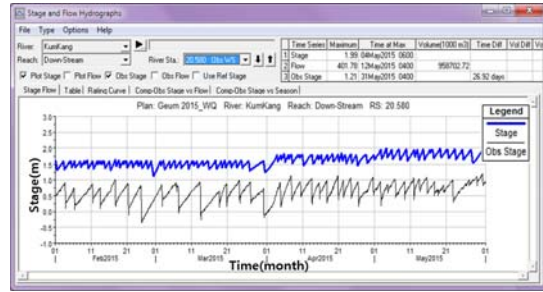
모형의 성능 평가를 위하여 본 연구에서는 PBIAS (Percent bias), PEP(Percent Error of Peak stage)를 활용하였다. PBIAS는 평균적으로 모의치가 실측치 보다 크거나 작은 경향을 나타내는 지수로서 식(1)과 같다. 모의치와 실측치가 정확하게 일치할 경우 0의 값을 갖게 되며 크기가 작을수록 모형의 정확도가 높은 것으로 평가할 수 있다. 양의 값을 가질 경우 모형은 실측치 보다 과대평가하는 경향을 나타내는 것이며 반대로 음의 값을 가질 경우 과소평가하는 경향을 나타내는 것이다(Moriasi et al., 2006).

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \times 100 \quad (1)$$

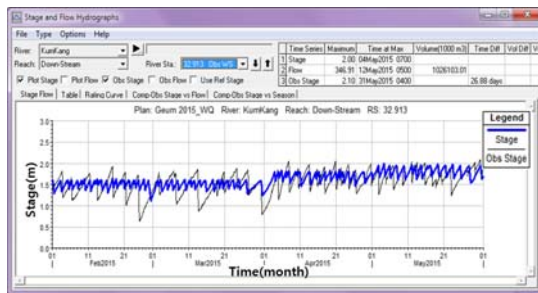
PEP는 최고 수위의 상대적인 오차를 나타내는 지수로서 다음 식(2)와 같다(Moriasi et al., 2006). 최고 수위는 하천의 범람을 결정하는 홍수위 모의뿐만 아니라 본 연구와 같이 관리수위의 상한을 유지해야 하는 경우 매우 중요한 요소이다.



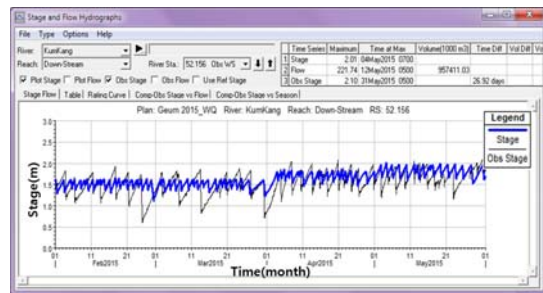
(a) Geum river estuary dam



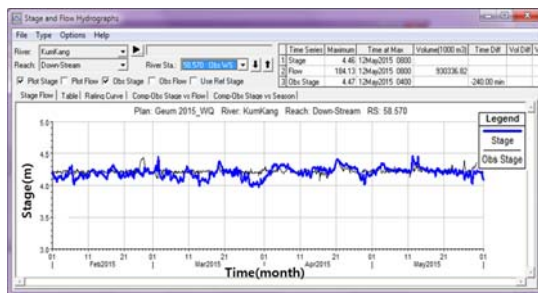
(b) Ibpo water stage gauge



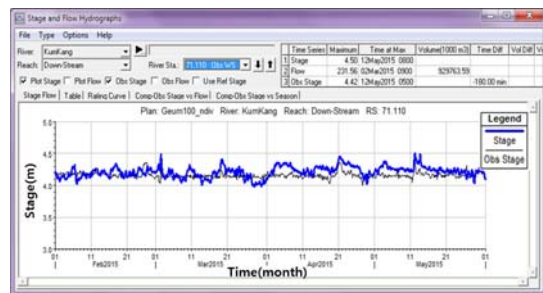
(c) Ganggyeong water stage gauge



(d) Gyuam water stage gauge



(e) Baekje weir



(f) Jindu water stage gauge

Fig. 3. Comparison of simulated and observed data.

$$PEP = \left( \frac{Y_i^{sim} - Y_i^{obs}}{Y_i^{obs}} \right) \times 100 \quad (2)$$

모형의 성능평가 결과는 절대적인 기준이 없기 때문에 Moriasi et al.(2006)이 제시한 수문 모의에 대한 모형 성능 평가 가이드라인을 참고하였으며, 아래 Table 3과 같이 구분하고, 본 모형의 성능을 평가하여 Table 4에 제시하였다.

강경, 규암, 백제보, 진두 지점은 모두 만족할 만한

결과가 도출되었으나 금강하굿둑과 입포수위표에서 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 이에 대한 원인 분석 결과, 금강하굿둑은 조위가 하강할 경우, 조위가 어느 시점까지 하강할 것인지 운영자가 사전에 알고 있기 때문에 내수의 최대 방류를 위하여 관리수위에 구애받지 않고 내수위를 최대한 낮추는 반면, 모형 내에서는 외조위와 내수위의 차이만을 이용하여 운영하기 때문에 실질적인 운영을 반영하지 못하여 생기는 모형의 한계로 판단하였다. 또한 입포수위표의 성능

**Table 3.** Statistical criteria for performance of models (Moriassi et al., 2006)

Performance rating	PEP	PBIAS
Very good	$PEP \leq \pm 10$	$PBIAS \leq \pm 10$
Good	$\pm 10 < PEP \leq \pm 15$	$\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$
Satisfactory	$\pm 15 < PEP \leq \pm 25$	$\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$
Unsatisfactory	$PEP > \pm 25$	$PBIAS > \pm 25$

**Table 4.** Performance of simulation results (2015.2.1~5.31)

Observation station	Maximum water level(EL.m)		PBIAS	PEP	Performance
	Simulated	Observed			
Geum river barrage	1.99	1.97	16.65	1.02	Satisfactory
Ippo	1.99	1.21	157.69	64.46	Unsatisfactory
Ganggyeong	2.00	2.10	4.53	-4.76	Very good
Gyuam	2.01	2.10	5.65	-4.29	Very good
Baekje weir	4.46	4.47	-0.62	-0.22	Very good
Jindu	4.50	4.42	1.36	1.81	Very good

평가의 불만족 원인 검토하기 위하여 Table 5와 같이 6개 수위 관측소의 실측 수위자료의 통계적 특성을 분석하고, Fig. 4와 같이 나타냈다. 규암과 강경수위표 구간은 19.24 km 이격되어 있음에도 불구하고, 수위 차이가 0.01~0.04 m로 수위차가 적은 반면, 강경과 입포 구간은 12.34 km 이격되어 상대적으로 가까운 구간임에도 불구하고 0.89~0.99 m의 차이가 발생하고 있으며, 하류부인 금강하굿둑에 비해 0.35~0.76 m 낮게 측정됨을 알 수 있다. Fig. 4(a)와 같이 홍수기를 제외하고 금강하굿둑의 수위는 기점수위 역할로서 백제보까지 호소와 같은 레벨 풀(level pool) 상태가 되며 수위가 거의 일정해야 하는데, Fig. 4(b)의 입포수

위표는 상하류 지점에 위치한 금강하굿둑과 강경에 비해 평균 0.76 m 낮게 분석되어 모형 보다는 실측 수위에 문제가 있는 것으로 보이며 이에 따라 불만족으로 판정된 것으로 분석되었다.

### 3. 유량 감소 및 하굿둑 운영 시나리오 설정

#### 3.1. 유량 감소 시나리오 설정

2014-2015년과 같이 가뭄이 발생하여 본류의 유량이 감소됨과 동시에 용수공급을 위한 도수 여부에 따른 수위에 미치는 영향을 모의하기 위하여, 상류단 경계조건인 진두수위표의 2014, 2015, 2016년도의 갈수기에 해당하는 9월~1월까지의 평균유량을 아래

**Table 5.** Statistical characteristics of observed water stage data (2015.2.1~5.31)

Observation station	Distance from Geum river barrage(km)	Water stage(EL.m)		
		Min	Mean	Max
Geum river barrage	0.00	0	1.38	1.97
Ippo	20.58	-0.35	0.62	1.21
Ganggyeong	32.92	0.64	1.55	2.1
Gyuam	52.16	0.60	1.54	2.1
Baeje weir	58.57	4.08	4.23	4.47
Jindu	71.11	4.01	4.16	4.42

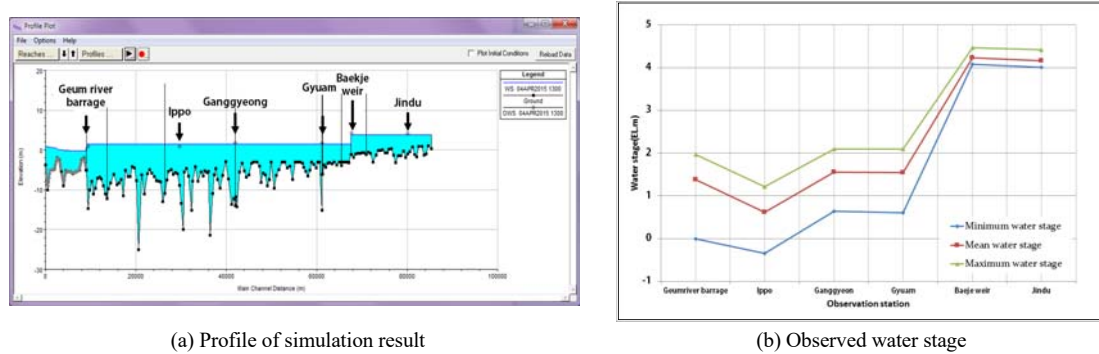


Fig. 4. Profile of observed water stage data.

Table 6. Monthly mean discharges and percentages of difference compared with previous year (unit: m<sup>3</sup>/s)

Year	January	September	October	November	December
2014	-	124.17	110.08	108.89	96.66
2015	74.69	51.56 (-58%)	52.65 (-52%)	64.74 (-41%)	57.50 (-41%)
2016	35.59 (-52%)	74.06 (+44%)	70.67 (+44%)	58.01 (-10%)	59.26 (+3%)

Table 6과 같이 분석하였으며, 팔호는 전년도 대비 감소 또는 증가율을 나타내고 있다.

2014년 대비 2015년의 유량은 가뭄 현상이 반영되어 최소 41%~최대 58% 감소하였으며, 가뭄의 영향이 2016년 1월까지 반영되어 나타난 것으로 추정된다. 반면에 2016년 유량은 2014년 유량 보다는 작았으나, 2015년 보다는 소폭 증가한 형태를 나타냈다. 이에 따라 본 연구에서는 2016년의 증가된 유량을 활용하지 않고, 2015년 12월부터 2016년 1월 28일까지의 10분 단위 유량자료를 활용하여 경과일수-감소유량에 따른 비선형 회귀분석식을 구하여 2015년과 같은 가뭄이 지속적으로 유지되어, 상황이 점차 악화될 경우를 재현하고자 하였다. 아래 Fig. 5는 회귀식 산정 결과를 나타내고 있다.

비선형 회귀식에서 예측된 유량의 평균을 ‘가정 유량’이라고 칭하였다. 2015년 2월 1일~5월 31일까지의 10분 단위로 측정된 실측 유량과 회귀식에 의한 가정 유량의 일유량 자료를 아래 Table 7과 같이 비교하였다. 최소유량을 제외하고 모든 통계치에서 유량감소가 반영되어 11%~21% 수준으로 나타났으며, 본

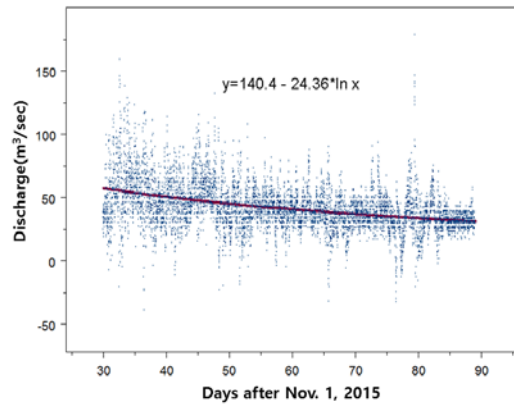


Fig. 5. Derivation of a discharge curve through the nonlinear regression method.

연구에서 활용할 평균유량을 볼 때 과거 유량 89.70 m<sup>3</sup>/s 대비 18.53 m<sup>3</sup>/s로 나타났다. 또한 국토해양부(2011)(현 국토교통부)에서는 평균갈수량을 기준으로 본류 내 공주, 규암, 강경 지점의 하천유지유량을 제시하였으며, 각각 15.1 m<sup>3</sup>/s, 17.5 m<sup>3</sup>/s, 19.9 m<sup>3</sup>/s로 본 연구에서 추정된 가정 유량과 비슷한 범위를 보였다.



**Table 7.** Comparison of statistical characteristics between the year 2015 observed discharges and the year 2016 expected discharges

Classification	Observed discharge (2015.2.1~5.31)	Expected discharge (2016.2.1~5.31)	Percentage of expected discharge over observed discharge (%)
Min.	1.80	9.80	544
1st Qu.	70.30	13.50	19
Mean	89.70	18.53	21
Median	89.20	17.86	20
3rd Qu.	108.40	23.18	21
Max.	278.40	29.99	11
Total N	2,881	121	-
Std Dev.	29.43	5.80	20

**Table 8.** Simulation scenarios with different upstream inflows

Classification	Upstream boundary condition (m <sup>3</sup> /s)	Criteria
Upper limit flow	24.33	Expected flow + Standard deviation
Expected flow	18.53	Expected flow from nonlinear regression
Instream flow	15.10	Instream flow at Gongju
Lower limit flow	12.73	Expected flow - Standard deviation

이에 따라 본 연구에서는 하천유지유량과 더불어 2016년 2월 1일부터 5월 31일까지 가정 유량 18.53 m<sup>3</sup>/s를 기준으로 유량 산정과정의 불확실성 등을 감안하여 표준편차인  $\pm 5.80$  m<sup>3</sup>/s 범위의 상한 유량과 하한 유량 등 4가지 조건을 선정하였다.

### 3.2. 하굿둑 운영 시나리오 검토

모형의 구축과 검증에 사용한 하굿둑의 조작 모의를 위한 운영률은 2015년 2월 1일~5월 31일까지의 진두수위표의 평균 유량 89.70 m<sup>3</sup>/s를 대상으로 실제 운영 실적과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 입력한 결과이나 가정 유량은 2015년 유량의 21%수준으로 기존의 작성했던 운영률을 그대로 적용하는 것은 맞지 않을 것으로 판단하였다. 기존 운영률을 적용하여 모의한 결과는 Fig. 6과 같으며, 3월 하순경부터 농업용수 공급이 본격화되면서 금강하굿둑 내수위가 점차 하강하여 5월말에는 EL.(+)1.26 m까지 하강하는 것으로 분석되어 상류 유량 감소에 따라 금강하굿둑 내수위의 과대한 하강이 발생하여 농업용수 취수에 영향

을 받을 수 있을 것으로 분석되었다. 특히 금강하굿둑 내수위가 지속적으로 하강하는 경향을 보이고 있는데 유입 유량이 가정 유량 보다 더 감소할 경우 심각한 용수 부족을 초래할 수도 있을 것으로 추정된다.

이에 따라 가정유량에 대한 하굿둑의 운영률에 대하여 월별로 유지하고자 하는 목표 최저 수위의 하한치를 상향시키는데 중점을 두고, 상류 유량 감소에 따른 방류량을 최소화하는 방법으로 결정하고, 시행착오법에 의해 2015년 최저 목표 수위에 0.60 m를 더한 값을 채택하였다.

최저수위 상향을 위한 운영방식을 적용할 때, 4~5월 최저 수위가 EL.(+)1.51 m이며 평균 수위는 EL.(+)1.63 m로 2015년 운영방식을 적용한 경우 보다 평균 수위는 물론 최저 수위도 높게 유지되어 농업용수를 비롯한 제반 용수공급이 원활할 것으로 판단된다. 운영 시나리오 검토가 시사하는 바는 농업용수 취수가 본격화되는 금년 3월 중순 이후부터는 심각한 가뭄의 영향으로 하굿둑으로 유입하는 유량이 크게

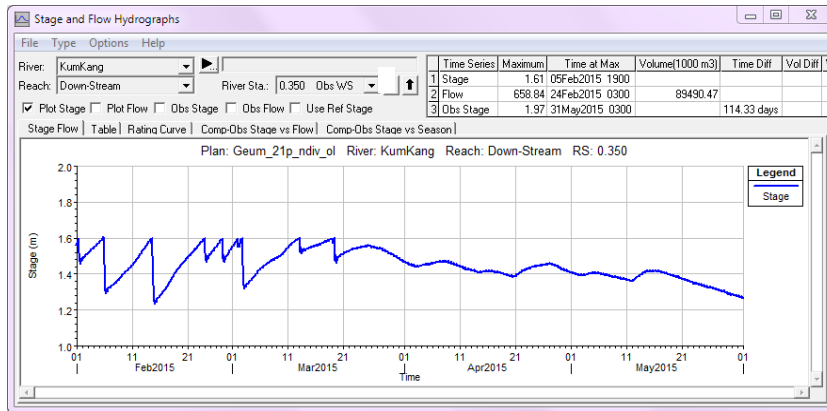


Fig. 6. Simulated water stage variation at the Geum river barrage using the current operation rules.

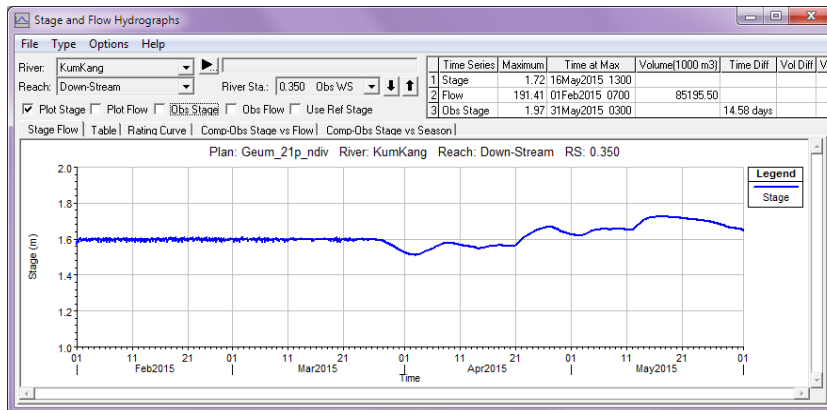


Fig. 7. Simulated water stage variation at the Geum river barrage using the new operation rules.

감소하는 반면에 공급해야 할 용수수요는 급증하기 때문에 하굿둑에서 방류를 최소화하여 최저 수위를 높이는 방향으로 운영하여 농업용수를 포함한 제반 용수공급에 차질이 생기지 않도록 해야 한다는 것이다.

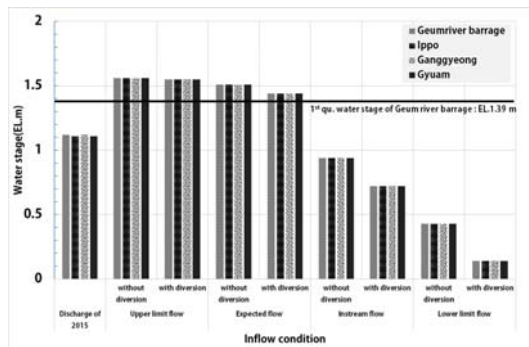
#### 4. 유량 감소 시나리오에 따른 본류 수위 영향 분석 결과

2015년 유량을 포함하여 3장에서 산정한 4가지 유량 조건과 도수 여부를 고려하여 본류의 수위 분석 결과를 분석하고자 총 9가지 조건에 대하여 분석하였다. 결과의 정리는 취수 문제 발생 여부의 중점사항인 최

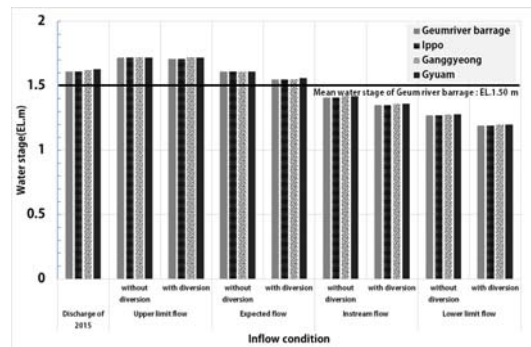
소 및 평균 수위 결과를 중점적으로 제시하였으며 Table 9와 같다. 2015년 유량과 4가지 조건 유량에 대한 수위차가 발생하는 이유는 앞서 분석한 금강하굿둑의 운영률 변경에 따른 영향이며, 금강하굿둑의 수위가 결정되면 상류의 입포, 강경, 규암수위표를 포함하여 57.58 km에 위치한 백제보까지의 수위차가 발생하지 않는 레벨 풀의 형태가 나타나 금강하굿둑~백제보 구간에 취수시설물의 취수문제 발생 여부는 하굿둑의 수위 결정이 가장 중점사항인 것으로 분석되었다. 위의 Table 2의 농업용수 공급시기인 2015년 4월과 5월의 하한 수위의 해당하는 EL.1.39 m를 기준으로 볼 경우, 상한 가정 유량이 유입되는 동시에 도수 터널 운영을 실시하더라도 금강 하굿둑의 최저 수위는

**Table 9.** Simulated discharges without/with diversion for different inflow conditions at 4 water stage gauges

Classification		Geum river barrage		Ibpo		Ganggyeong		Gyuam	
		Min	Mean	Min	Mean	Min	Mean	Min	Mean
Discharge of 2015		1.12	1.61	1.11	1.61	1.12	1.62	1.11	1.63
Upper limit flow	without diversion	1.56	1.72	1.56	1.72	1.56	1.72	1.56	1.72
	with diversion	1.55	1.71	1.55	1.71	1.55	1.72	1.55	1.72
Expected flow	without diversion	1.51	1.61	1.51	1.61	1.51	1.61	1.51	1.61
	with diversion	1.44	1.55	1.44	1.55	1.44	1.55	1.44	1.56
Instream flow	without diversion	0.94	1.41	0.94	1.41	0.94	1.42	0.94	1.42
	with diversion	0.72	1.35	0.72	1.35	0.72	1.36	0.72	1.36
Lower limit flow	without diversion	0.43	1.27	0.43	1.27	0.43	1.28	0.43	1.28
	with diversion	0.14	1.19	0.14	1.19	0.14	1.20	0.14	1.20



(a) Result of minimum water stage



(b) Result of mean water stage

**Fig. 8.** Simulated discharges without/with diversion for different inflow conditions at 4 water stage gauges.

EL.(+)1.55 m로 상류의 백제보까지 같은 수위를 유지하여 구간 내 취수시설의 취수에 문제가 없을 것으로 분석되었고, 마찬가지로 가정 유량이 유입되고, 도수를 실시하더라도 최저 수위는 EL.(+)1.44 m로 취수시설의 문제 발생은 생기지 않을 것으로 분석되었다. 그러나 하천유지유량인 15.10 m<sup>3</sup>/s와 하한 가정 유량과 작거나 같은 유량인 12.73 m<sup>3</sup>/s가 유입되는 경우, 금강 하굿둑의 최저 수위는 각각 EL.(+)0.72 m, EL.(+)0.43 m로 하강될 것으로 예측되어 도수터널 운영 여부에 관계없이 일시적으로 농업용수를 비롯한 제반 취수시설 운영에 어려움이 생길 수 있을 것으로 분석되었다. 평균 수위도 이와 마찬가지로 패턴을 보였는데, 2015년 4월과 5월의 평균 수위의 해당하는 EL.(+)1.50 m를 기준으로 볼 경우, 상한 가정 유량이 유입되는 동시에

도수터널 운영을 실시하더라도 금강 하굿둑의 최저 수위는 EL.(+)1.71 m로 상류의 백제보까지 EL.(+)1.72 m를 유지하여 구간 내 취수시설의 취수에 문제가 없을 것으로 분석되었다. 또한 가정 유량이 유입되고, 도수를 실시하더라도 최저 수위는 EL.(+)1.55 m로 취수시설의 문제 발생은 생기지 않을 것으로 분석되었다. 그러나 하천유지유량인 15.10 m<sup>3</sup>/s와 예측 하한 유량과 작거나 같은 유량인 12.73 m<sup>3</sup>/s가 유입되는 경우, 금강하굿둑의 최저 수위는 각각 EL.(+)1.35 m, EL.(+)1.19 m로 하강될 것으로 예측되어 도수터널 운영 여부에 관계없이 일시적으로 농업용수를 비롯한 제반 취수시설 운영에 어려움이 생길 수 있을 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 금강 본류 총 85.0 km에 이르는 구간에 대하여 유량, 조위, 취수량 및 회귀수, 금강 배수갑문 운영과 도수 여부를 고려한 1차원 부정류 수리 모형을 구축하고, 유황분석을 통하여 본류 유량 감소와 도수 여부에 따른 금강 본류의 수위에 미치는 영향을 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 2014년 대비 2015년의 유량은 가뭄 현상이 반영되어 최소 41%~최대 58% 감소하였으며, 가뭄의 영향이 2016년 1월까지 반영되어 나타났다. 반면에 2016년 유량은 2014년 유량 보다는 작았으나, 2015년 보다는 소폭 증가한 형태를 나타냈다. 2015년과 같은 가뭄이 지속적으로 유지되어, 상황이 점차 악화될 경우를 재현하고자 경과일수 감소유량에 따른 비선형 회귀분석식을 도출하여 분석한 결과 2016년의 가정 유량은 2015년의 평균 유량 89.70 m<sup>3</sup>/s 대비 21% 수준인 18.53 m<sup>3</sup>/s 분석되어 현저하게 감소한 형태가 나타났다.

2. 가정 유량은 2015년 유량의 21% 수준으로 기존 모형의 검토에 활용한 하굿둑 운영률을 적용한 결과, 3월 하순경부터 농업용수 공급이 본격화되면서 금강하굿둑 내수위가 점차 하강하여 5월말에는 EL(+).1.26 m 까지 하강하는 것으로 분석되어, 과도한 수위 하강이 발생하였다. 최저 수위 상향을 위한 운영률 적용시는 4~5월 최저 수위가 EL(+).1.51 m이며 평균 수위는 EL(+).1.63 m로 2015년 운영률을 적용할 경우 보다 평균 수위는 물론 최저 수위도 높게 유지되어 농업용수를 비롯한 제반 용수공급이 원활할 것으로 예측되어, 갈수기의 유량이 감소된다면, 하굿둑의 방류를 최소화하여 최저 수위를 높이는 방향으로 운영하여 농업용수를 포함한 제반 용수공급에 차질이 생기지 않도록 해야 할 것이다.

3. 금강하굿둑의 수위가 결정되면 상류의 입포, 강경, 규암수위표를 포함하여 57.58 km에 위치한 백제보까지의 수위차가 발생하지 않는 레벨 풀의 형태를 나타내어, 금강하굿둑~백제보 구간에 취수시설물의 취수문제 발생 여부는 하굿둑의 수위 결정이 가장 중점사항인 것으로 분석되었다. 상한 가정 유량과 가정 유량이 유입될 경우 보령댐으로 도수를 하는 경우에

도 금강 하굿둑의 최저 수위는 EL(+).1.44 m 이상으로 금강 하류부의 취수에는 큰 문제가 없을 것으로 분석되었다. 그러나, 하천유지유량(평균 15.1 m<sup>3</sup>/s)과 그 이하의 하한 가정 유량 유지되는 상태에서는 보령댐으로 미 도수시와 도수시 금강하굿둑의 최저 수위는 각각 EL(+).0.94 m와 EL(+).0.72 m, EL(+).0.43 m, EL(+).0.14 m로 모의되어 기존 취수시설 뿐만 아니라 보령댐 도수시설의 운영에도 어려움이 생길 것으로 예측되었다.

## REFERENCES

- Douglas, A. J., Taylor, J. G., 1999, The economic value of trinity river water, *Water Resources Development*, 15(3), 309-322.
- Geum River Flood Control Office, 2016, <http://www.geumriver.go.kr>
- Ham, S. Y., Byeon, D. L., Sung, I. H., 2001, Analysis of water level change related to Yeongcheon Dam diversion tunnel, *Proceedings of The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 27-29.
- Jang, E. K., Ji, U., 2014, Numerical analysis of flow and bed change for selecting optimized section of buried water pipeline crossing the river, *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 15(3), 1756-1763.
- Jeong, J. W., Kim, Y. O., 2014, Operation rule for Andong-Dam and Imha-Dam with connecting tunnel, *Proceedings of the Korea Water Resources Association (KWRA)*, 558-558.
- Jeong, S. M., Park, C. S., Lee, J. H., Shin, K. S., 2009, Flood water level changes analyses for the construction of a small dam -Focused on the Geum river reach in Sejong city-, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 9(2), 59-68.
- Kim, H. Y., Park, J. H., Park, W. C., Hong, I. P., Jeong, S. M., 2015, Application of numerical modelling for the prediction of sediment deposits after Sejong weir installation, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(4), 243-249.
- Ko, I. H., Kim, J. K., Park, S. Y., 2009, Evaluation of eco-hydrological changes in the Geum river considering dam operations: I. Flow regime change analysis, *Journal of Korea Water Resources*

- Association (KWRA), 42(1), 1-8.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA), 2016, <http://www.khoa.go.kr>
- K-water, 2016, <http://www.kwater.or.kr>
- Lee, S. C., 2016, Overcome drought in western Chungcheongnam-do region through construction of Boryong dam diversion tunnel, *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, 16(2), 33-37.
- Lee, S. D., Lee, G. Y., Park, J. K., 2005, A Study on the characteristics of hydraulic and water quality in the estuary of Geumgang (River), *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 11(3), 199-208.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2009, River master plan report of Geum river basin.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2011, Long-term water resources plan (2011-2020).
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2016, <http://www.wamis.go.kr/>
- Morias, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Park, H. S., 2012, Numerical simulations of hydraulics and turbidity flow in the Andong-Imha linked reservoir system, M. S. Dissertation, Chungbuk University, Korea.
- Park, H. S., Chung, S. W., 2014, Water transportation and stratification modification in the Andong-Imha linked reservoirs system, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(1), 31-43.
- Park, S. K., Kim, T. C., 1999, Change of hydraulic characteristics in the downstream Keum river after the construction of estuary dam, *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 41(5), 68-76.
- Suh, S. W., 1998, Hydrodynamic changes in the Keum river estuary (2) - By numerical model tests -, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 10(1), 18-26.
- US Army Corps of Engineers, 2010, HEC-RAS river analysis system user's manual.