

An Assessment of Continuous Streamflow Simulation at Imjin River Shared by South and North Korea

Moo-Kyeong LEE^{1#}, Hyo-Sang LEE²⁺, Suk-Hwan JANG³, Jae-Kyoung LEE⁴

¹ Gyeonggi Provincial Government, Hyowon-ro, Paldal-gu, Suwon-city, Gyeonggi-do, Korea

² School of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1, Choda-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk, Korea

³ School of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do, Korea

⁴ Innovation Center of Engineering Education, Daejin University, Hoguk-ro 1007, Pocheon-si, Gyeonggi-do, Korea

Abstract

Imjin River is shared by North and South Korea. As Imjin river flows from North Korea to South Korea, reliable estimates on the observational flow of the North Korean catchment are essential for water resource management in South Korea. Since such hydrological information is not shared with South Korea, there is an increasing risk of failure in flood and drought prevention in South Korea. This study simulates a long-term continuous streamflow at Imjingyo catchment, one of the upstream catchments of Imjin river. It also estimates the effect of Hwanggang dam in North Korea on the South Korean catchment in Imjin River. A Probability Distributed Model (PDM), which is a conceptual rainfall-runoff model, is applied to hydrological data from 1998-2015 at Imjingyo catchment. The model estimates 8% reduction in streamflow in 2011-2015, which may result from the changes in runoff characteristics after the construction of Hwanggang dam. Further study should focus on validating the results of this study and obtaining the reliability of its runoff estimation using additional data on the North Korean catchment.

Key words: long-term rainfall-runoff, conceptual rainfall-runoff, Probability Distributed Model (PDM)

1. 서론

최근 급증하는 이상기후의 영향으로 한반도 하천 유역에 대한 수자원 관리는 많은 어려움에 직면하고 있다. 특히 남·북한 공유하천인 임진강의 경우 남·북한 간의 정치적, 군사적 대치 상황이라는 특수한 여건으로 인해 신뢰할 수 있는 수자원 관리가 더욱 더 어려운 실

정이다. 임진강은 북한에서 남한으로 흐르는 강으로, 북한 유역의 신뢰할 수 있는 관측 유량이 남한 지역의 수자원 관리에 필수적이다. 그러나 이러한 수문 자료는 남한과 공유되지 않고 있어 홍수 및 가뭄 관리에 많은 어려움이 증대되고 있다.

임진강과 같은 공유하천은 국제적으로 하천 유역에 대한 물 분쟁(예, 1953년 요르단 강 도수 계획, 1992년

[#] The 1st author: Moo Kyeong Lee, Tel. +82-31-8008-3533, Fax. +82-31-8008-4539, e-mail. steelcivil@gg.go.kr

⁺ Corresponding author: Hyo Sang Lee, Tel. +82-43-261-2379, Fax. +82-43-275-2377, e-mail. hyosanglee@chungbuk.ac.kr

슬로바키아와 헝가리의 댐 개발 문제 등)이 빈번하게 발생되고 있으며, 이를 극복하기 위한 다양한 협의체(예, 다뉴브 강 위원회, 엘베강 위원회 등)가 운영되고 있다(Lee, *et. al.*, 2008). 임진강 유역의 북한 지역에서는 1998년 이후 대규모 개발 사업(5개의 댐 등)이 이루어졌으나, 남북 관계의 경색으로 인하여 이에 대한 충분한 자료 교류 및 분석이 이루어지지 못하고 있어 많은 문제점을 야기하고 있다. 2009년에 발생한 북한 유역의 댐 무단방류로 인한 인명피해와 2015년 봄에 발생한 임진강 유역의 가뭄 사태 등이 대표적인 사례이다. 남·북한도 공유하천의 효율적인 관리를 위해 협의체 운영이 필요하나, 정치적인 영향 등으로 실질적인 운영이 어려운 실정이다.

2000년대 이후 공유하천 임진강에 대한 관심이 증대되면서, 다양한 연구가 활발히 수행되고 있다. 홍수량 증가에 관한 연구로는 Choi, *et. al.*(2007) 및 Kim, *et. al.*(2008)이 대표적이다. Choi, *et. al.*(2007)은 기구 축된 임진강 홍수예보시스템의 현황과 문제점을 파악하고 수문 및 수리학적 모형을 개선하여 새로운 홍수예보시스템을 구축하였다. 2006년 7월 사상을 적용하여 개선된 모형을 검증한 결과 만족스러운 정확도를 확보할 수 있었고, 향후 개선된 홍수예보시스템을 적용하여 보다 정밀한 홍수예보가 가능할 것으로 판단하였다. Kim, *et. al.*(2008)은 강우 자료의 미계측 지역인 북한 유역을 포함한 임진강 전 유역에 대한 홍수유출을 분석하기 위하여 2006년 7월 사상의 레이다 강우자료를 이용하였으며, 물리적 기반의 VfloTM 모형과 개념적 기반의 ModClark 모형을 적용하여 강우-유출을 비교·분석하였다. 적용 결과, 수문자료가 충분하지 않을 경우에는 물리적 기반의 분포형 모형보다 유역의 물리적 특성에 대한 보정이 가능한 매개변수로 표현되는 개념적 기반의 모형이 현실적이라는 것을 보여 주었다.

본 연구에서는 남한에 위치한 임진강 유역의 임진교(군남) 수위 관측소의 유량자료를 바탕으로 개념적 강우-유출 모형인 PDM(Probability Distributed Model)을 적용하여 임진강유역의 장기유출 모의를 실시한다. 이

를 통하여 임진강유역의 유출 특성을 분석하고, 북한지역의 황강댐 개발에 따른 남한지역의 임진강 유량에 미치는 영향을 평가한다.

II. 연구유역 및 유출특성 분석

1. 임진강 임진교 연구유역

임진강은 한반도 중부지역에서 북한의 강원도 법동군 두류산에서 발원하여 경기도 파주시 탄현면 부근에서 한강과 합류하여 서해로 유출되는 하천으로 유역 면적은 8,138.9km²(남한유역 3,185.6km², 북한유역 4,953.3km²)이며, 유로 연장은 273.5km(남한 91.1km, 북한 182.4km)이다. 임진강 유역의 상류는 산지 지역이고, 하류는 파주 및 문산 등의 평야 지대이며, 서해의 높은 조수간만의 영향으로 홍수에 취약하다. 임진강 유역의 대부분은 남·북한이 군사적으로 대립하고 있는 휴전선에 위치하고 있어, 수문 자료의 확보 및 연구가 용이하지 못하다. 다음 <Figure 1>은 임진강 유역도이다.

북한 지역의 임진강 상류에는 총 5개의 댐이 건설되어 운용되고 있으며, 2001~2002년도에 건설된 4월5일 댐(총 4기)이 발전용으로, 2007년 12월에 완공된 황강 댐이 다목적댐으로 운용되고 있다. 그리고 북한은 유로변경을 통하여 황강댐의 담수된 일부 용수를 예성강으로 이동시켜 전력생산과 개성공단의 공업용수 및 생활용수 등의 용수에 활용하고 있으며, 이는 임진강 하류에 미치는 영향이 매우 클 것으로 판단된다(Kim, *et. al.*, 2011). 또한, 북한 지역 댐들의 무단 담수와 방류로 인하여 임진강 하류에 위치한 남한 지역에는 갈수기 용수부족과 집중 호우 시 홍수피해 등 직접적인 피해가 발생하고 있다. 2014년과 2015년에 발생한 가뭄피해는 임진강 유역 수자원 관리의 어려움을 단적으로 보여주고 있다(Jang, 2014). 이러한 문제점들의 해결 및 장기적인 수자원 관리를 위해서는 유역의 대부분이 북한에 위치하여 가장 많은 불확실성을 가지고 있는 임진강 임진교 유역의 분석이 필요하다.

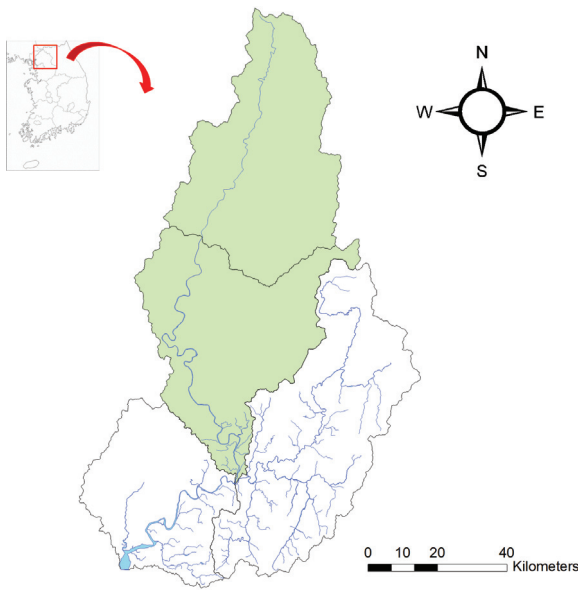


Figure 1. Imjingyo study catchment of Imjin River, Korea

남한에 위치한 임진강 유역의 임진교(군남) 수위관측소는 1998년부터 운영되어 상류 유역에 대한 유량 자료가 확보되어 있다. 임진강 임진교 유역의 장기유출 특성을 분석하기 위하여, 연도별 유출비(총 유량/총 강우량)와 기저유출비(기저 유출량/총 유출량)를 산정하여 분석하였다. 2007년 12월에 완공된 황강댐은 담수된 용수의 일부를 유로 변경을 통하여 예성강으로 이동시켜 북한이 전력 생산 및 용수 공급에 활용하고 있으며, 이는 유역 하류의 유출량을 저감시키는 요인으로

지목되고 있다. 임진강 임진교 지점의 장기 강우-유량 곡선을 도시하여 유역의 유출 특성을 분석하였다. <Figure 2>는 각각 2001~2015년까지의 군남 지점 관측 강우 수문곡선 및 임진교 수위 관측소의 관측 일 유량 수문곡선이다.

III. 개념적 유역 강우-유출 모형을 적용한 장기유출 모의 적용

1. 개념적 강우-유출 모형

개념적 강우-유출 모형은 유역의 복잡한 수문 작용을 강우-유출의 간략한 개념화에 바탕을 두고 있으며, 일반적으로 유효강우량을 산정하는 부분인 토양저류모형(Soil Moisture Accounting)과 유출을 산정하는 부분인 유역추적모형(Routing)으로 구성되어 있다. PDM 모형은 Moore(2007)가 유역에 걸쳐 다르게 분포하고 있는 토양저류를 개념화 한 토양 저류함수 모형과 병렬 2선형 저류지 유출 모형이 유출 모형으로 적용된다. Moore(2007)는 유역에서 공간적 토양저류(soil moisture storage) 분포를 파레토 확률분포로 개념화하여 유역 내 저류용량의 편차를 고려하였으며, 토양 수분함유량의 공간적 다양성에 대한 함수식은 식 (1)과 같다. 모형의 변수는 유역의 저장용량을 나타내는

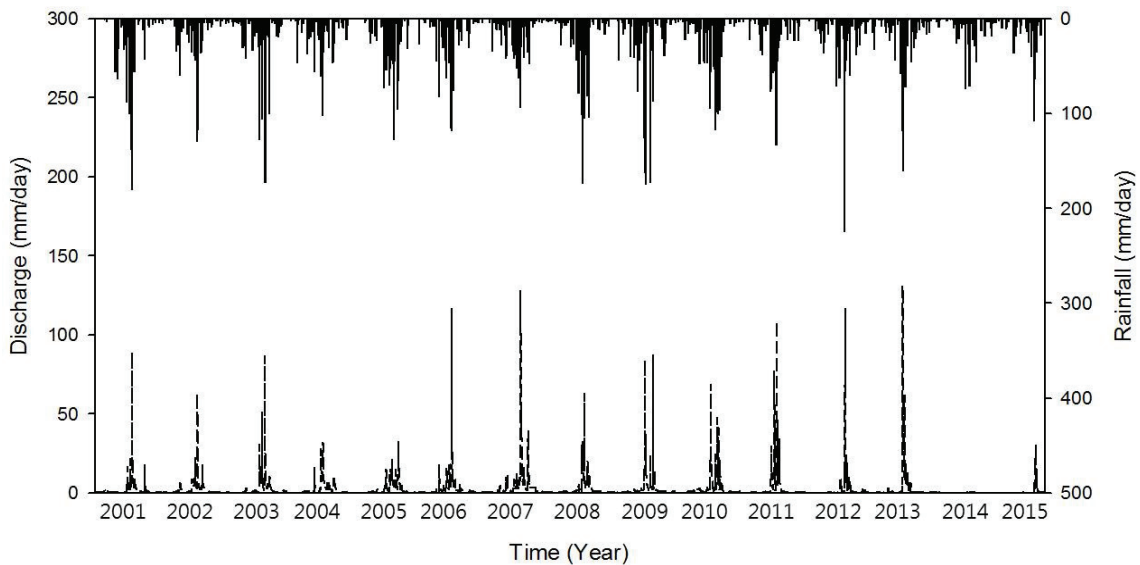


Figure 2. Hydrograph of observed daily discharge and rainfall at Imjingyo catchment of Imjin River(2001.1.1.~2015.9.22.)

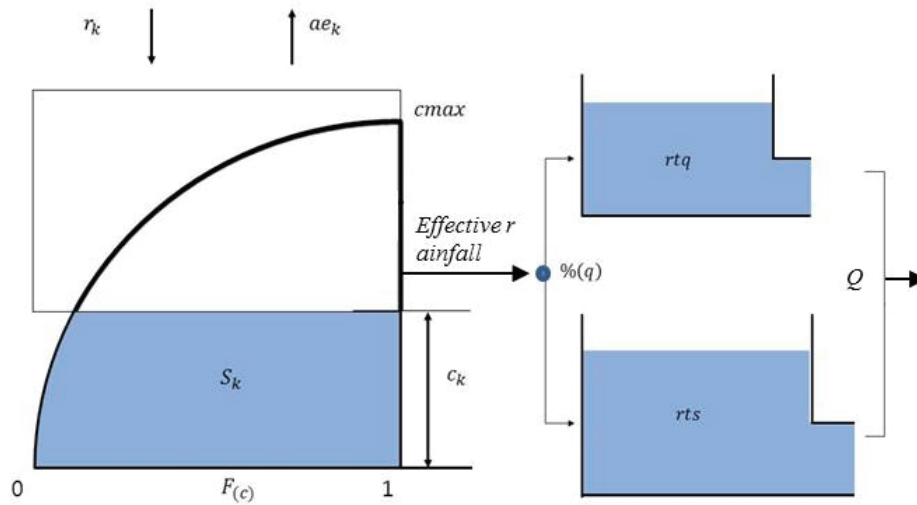


Figure 3. Schematic description of the PDM

C_{max} , 유역의 토양수분저류 용량의 공간적 변화를 나타내는 b 로 구성되어 있다. 여기에서, C 는 유역의 토양수분저류 용량이고, C_{max} 는 최대 토양수분저류 용량을 의미한다. 또한 b 는 토양수분저류 용량에 대한 공간적 변화를 나타낸다. 이 때 b 가 1이면 토양수분저류 용량이 유역에 걸쳐 동일하게 분포하고, b 가 0이면 토양수분저류 용량은 일정한 값을 갖게 된다.

$$F(c) = 1 - \left(1 - \frac{c}{c_{max}}\right)^b, 0 \leq c \leq c_{max} \quad (1)$$

앞서 검토된 토양저류모형에서 산정한 유효강우량은 다양한 경로를 통해서 유역의 유출구로 이동하며, 이를 표현하기 위해서 1개 이상의 유출 경로가 고려된다. Jakeman & Hornberger(1993)은 토양저류모형에서 강우 유출 간의 비선형적인 관계가 반영됨으로써 유

출경로에서는 선형적인 저류지(linear conceptual reservoir)를 사용할 수 있는 것을 보여 주었다. 이러한 선형저류지가 일반적으로 개념적 강우 유출 모형에서 사용되며, 유출 경로가 다양한 형태로 조합하여 적용된다(Jakeman, *et. al.*, 1990; Wagner, *et. al.*, 2004). 일반적으로 많이 적용되는 병렬의 2선형 저류지 유출 모형으로 2개 저류지는 유역의 빠른 반응과 느린 반응으로 형상화한 것이다. 모든 유효강우량은 빠른 반응의 저류지로 가는 양을 나타내는 매개변수 $\%(q)$ 를 통해서 2개 저류지로 나누어지며, 각 저류지에서 체류시간 매개변수 rtq 와 rts 를 통하여 유출량으로 연결된다. PDM 모형에 대한 개념도는 <Figure 3>과 같으며, <Table 1> 및 <Table 2>는 PDM 모형의 매개변수이다.

Table 1. Description of probability distributed soil moisture model parameters

Parameters	C_{max}	b
Description	Maximum storage capacity of the catchment	Degree of spatial variability of storage capacity in the catchment
Range	1~1000 [mm]	0~2 [-]

Table 2. Schematic description of the two linear reservoir routing model parameters

Parameters	rtq	rts	$\%(q)$
Description	Residence time quick flow reservoir	Residence time slow flow reservoir	Percentage flow through quick flow
Range	1~15 [dt]	15~300 [dt]	0~1 [-]

2. 모형의 보정 및 검증 (RRMT/MCAT)

본 연구의 보정 방법으로 적용한 Monte Carlo 방법은 입력변수에 대한 반복적인 통계적 샘플링을 통하여 다양한 수학적 문제에 대한 근사값을 얻어내는 방법이다. Monte Carlo 방법은 이론적으로 타당하고 개념적으로 단순하여 많은 연구자에 의해 수치모형에 적용되고 있으며, 복잡한 수자원시스템의 확률적 거동을 연구하거나 이미 알고 있는 확률분포로부터 많은 양의 자료를 생성하는데 많이 이용되고 있다(Ahn, 2010). Monte Carlo 방법은 실제의 가정과 이에 대한 모형의 일련 조합을 기초로 하여 실제의 상황을 반복적으로 수행하여 모의하는 발생 과정으로 공학적 목적을 위해 시스템의 실행이나 반응을 예측·조사하는데 적용될 수 있다. 모의수행 과정은 매개변수로 정해진 일련의 값들을 사용하여 모형의 실행 또는 반응에 대한 정량적이고 구체적인 결과를 얻게 된다. 많은 연구자들에 의해 Monte Carlo 모의 결과가 확정론적 결과에 비해 안정된 값을 보여주는 것으로 나타났다(Choi & Han, 2004).

모형의 정확도를 평가하기 위한 기준을 설정하는 문제는 모형의 모의과정에서 과정변수를 조정하는 기준과 동일하므로 모형의 보정에 있어서 대단히 중요하다(Yoon, 2007). 본 연구에서는 Nash-Sutcliffe Efficiency(NSE, Nash & Sutcliffe, 1970)와 고유량 부분 및 저유량 부분의 Root Mean Square Error(RMSE)를 적용하였다. 목적함수 NSE는 무차원의 목적함수로 $-\infty$ 에서 1까지의 최적값을 가지며, 다른 유역들의 모의 결과를 비교·검토하는데 적합하다. 저유량 부분의 차이보다 고유량 부분 근처에서 차이가 크게 나타남에 따라 일반적으로 고유량 부분의 성능에 초점이 맞춰지게 된다. 목적함수 NSE는 다음과 같은 식 (2)로 사용되며, $1 - NSE$ 를 NSE^* 로 적용한다. Moriasi, et al.(2007)은 유역 유출 모형의 적용에 있어, 0.5 (NSE^*) 이하의 결과를 적합(satisfactory)으로 평가 하고 있다.

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - C_i(\theta))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q)^2} \quad (2)$$

여기서, i 는 시간 단위이며, 시간 i 에 관측된 유량을 Q_i , 모형의 매개변수로 모의된 유량을 $C_i(\theta)$ 라 한다.

IV. 장기유출 모의 결과

본 연구에서는 임진강 유역의 활용 가능한 임진교 지점의 장기 수문자료(2001~2015)를 바탕으로 유역 유출 특성 모의 및 분석을 통하여 이를 보정하였다. 또한 2008년 전·후 기간의 각각의 보정 모형을 통하여 2011~2015년의 유출 특성을 모의하였다. 이를 위하여 다음과 같이 분석을 수행하였다.

- 황강댐 설치(2008) 이전 기간의 모형 보정 (2001~2004) 및 모형 검증(2005~2007)
- 황강댐 설치(2008) 이후 기간의 모형 보정 (2008~2010) 및 모형 검증(2011~2012)
- 황강댐 설치 이전 및 이후 보정 모형의 2011~2015년 기간의 예측 모의

1. 황강댐 설치(2008) 이전 기간의 모형 보정 (2001~2004) 및 모형 검증(2005~2007)

모형의 보정 기간은 2001년~2004년 기간을 선정하였으며, 자료의 초기 20% 구간은 초기보정구간으로 적용하여, 목적함수의 산정에 반영되지 않는다. 그 결과 PDM 모형은 유량 전체 구간에 대하여 적합한 보정 성능(0.25: NSE^*)을 보이고 있으며, 첨두홍수량 부분은 과소하게 평가하고 있다. 또한, 2001~2004년 기간의 수문자료로 보정한 모형을 검증 구간(2005~2007년)에 적용한 검증 성능은 0.52 (NSE^*)로 산정되었다. <Table 3>는 목적함수의 매개변수 및 목적함수를 활용한 보정·검증 값을 보여주며, <Figure 4>는 보정 기간의 모의 수문곡선을 나타낸다.

Table 3. Results of runoff simulation at Imjingyo catchment of Imjin River

Before constructing Hwanggang dam	Calibration (2001~2004)					Validation (2005~2007)	
Description	Cmax	b	rt(q)	rt(s)	%(q)	Results	Results
NSE*	216.8	1.5	2.4	279.2	0.68	0.25	0.52

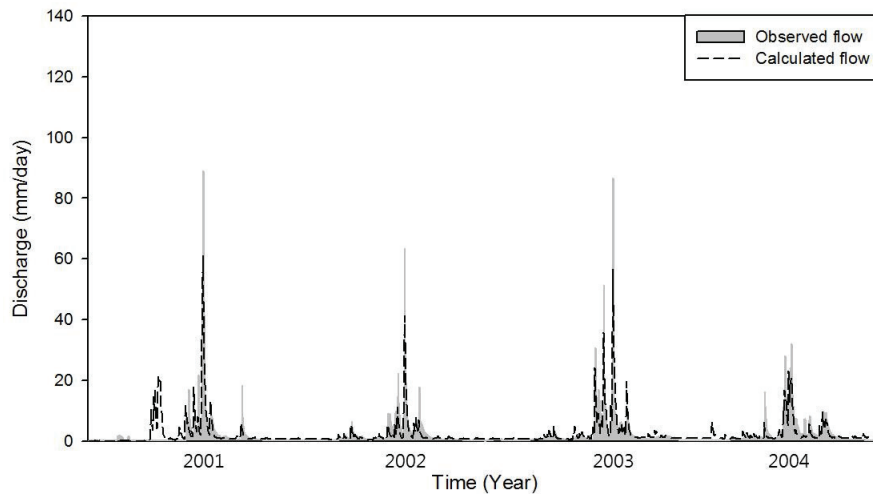


Figure 4. Hydrograph of calibration at Imjingyo catchment of Imjin River (2001~2004)

2. 황강댐 설치(2008) 이후 기간의 모형 보정 (2008~2010) 및 모형 검증(2011~2012) 모형의 보정 기간은 2008~2010년 기간을 선정하였으며, 이 기간의 수문 자료를 바탕으로 모형을 보정한

결과는 <Table 4> 및 <Figure 5>와 같다. 강우-유출 모형의 보정 결과는 0.43 (NSE*)이며, 검증 결과는 0.48 (NSE*)이다. <Figure 5>의 NSE 목적함수의 결과는 0.5 이하로, 전체적인 수문곡선의 경향을 잘 반영

Table 4. Results of runoff simulation at Imjingyo catchment of Imjin River

After constructing Hwanggang Dam	Calibration (2008~2010)					Validation (2011~2012)	
Description	Cmax	b	rt(q)	rt(s)	%(q)	Results	Results
NSE	253.76	0.15	3.50	338.28	0.74	0.43	0.48

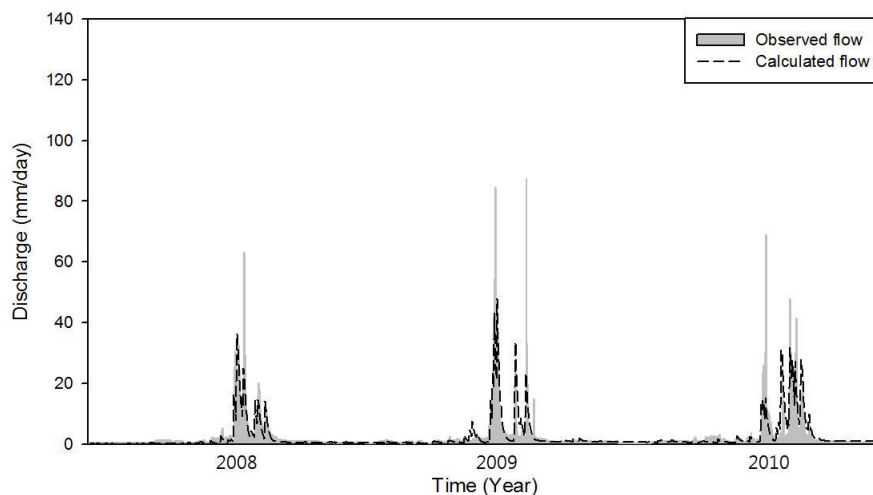


Figure 5. Hydrograph of calibration(2008-2010) at Imjingyo catchment of Imjin River

하고 있으나, 2009년 및 2010년의 침투 홍수사상을 과소하게 평가하고 있다.

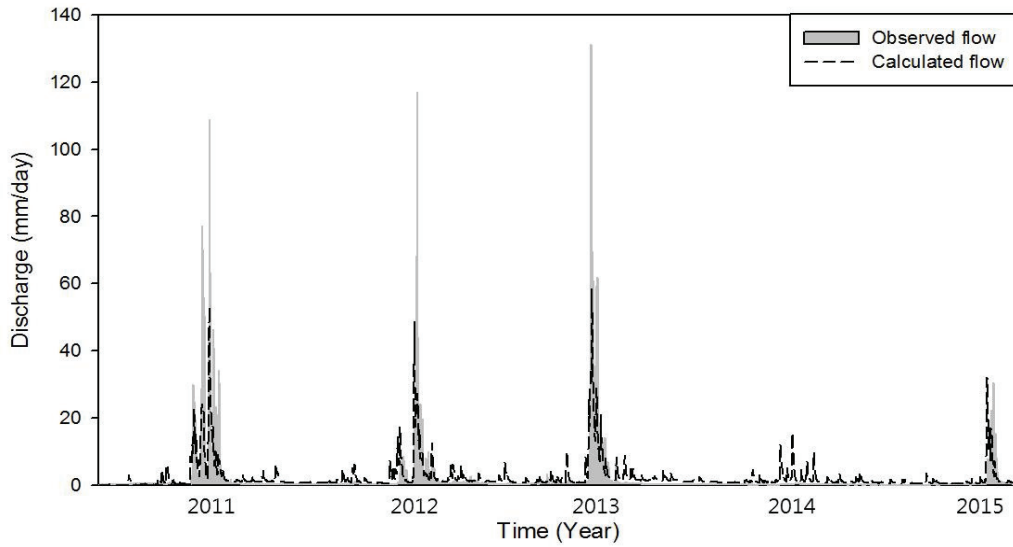
3. 황강댐 설치(2008) 이전 및 이후 보정 모형의 2011~2015년 기간의 예측 모의

유역의 유출 특성 분석은 목적에 부합된 모형의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 상류에 위치한 댐의 저류에 의한 저유량 부분의 유출특성 분석을 위하여, 유량 전 구간을 활용한 NSE 목적함수로 보정한 모형을 바탕

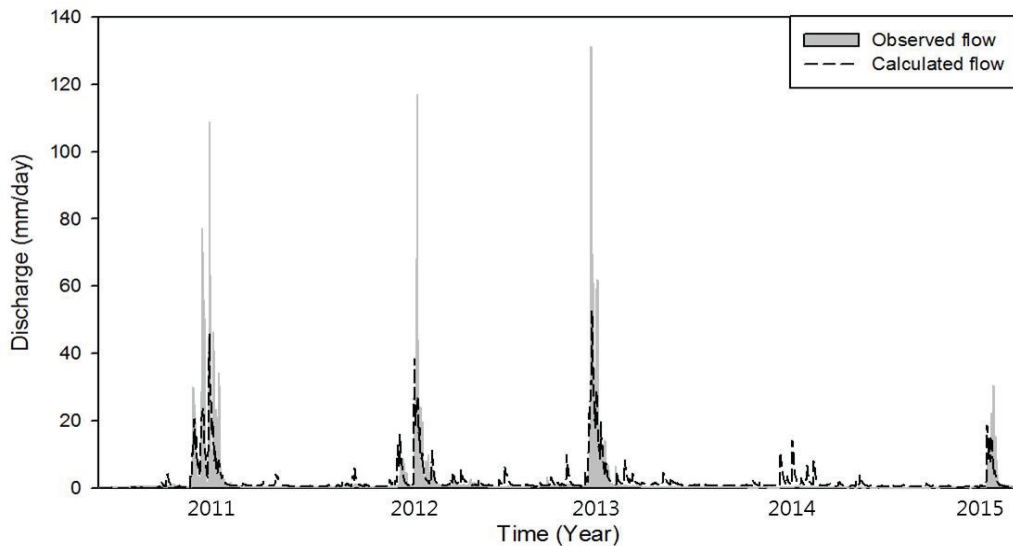
으로 일 유출량을 모의한다.

대상 유역의 황강댐 설치 이전기간(2001~2004)과 이후기간(2008~2010)의 보정 모형을 2011년 1월1일~2015년 8월 31일 기간에 대하여 각각 적용하며, 모의한 결과는 <Figure 6> (a) 및 (b)와 같다.

임진강 임진교 유역의 2008년 전후의 보정 모형으로 2011~2015년 기간의 수문곡선을 모의 한 결과는 다음과 같다. 본 연구에서 모의한 수문곡선은 2011~2013년의 침투홍수량을 과소하게 평가하고 있다. 이는 집중형



(a) Hydrograph of simulation from 2011~2015 using parameter set of NSE* calibration from 2001~2004 (NSE*=0.51)



(b) Hydrograph of simulation from 2011~2015 using parameter set of NSE* calibration from 2008~2010 (NSE*=0.47)

Figure 6. Hydrograph from 2011~2015 using calibration model

모형의 한계로 판단할 수 있으며, 또한 유역 내에 위치한 북한 댐의 홍수시 조절된 방류의 영향으로도 추정된다. 2014년 기간의 모의 수문곡선은 관측 유량에 비하여 과다 산정됨을 나타내고 있다. 이는 관측 유량이 극심한 저유량 상황이며, 북한 지역 상류 댐들의 저류로 인한 유량의 저하로 분석된다. 2011~2015년 기간의 관측 총 유출고는 3,337mm이며, 모의 총 유출고는 4,068mm (2001~2004년 기간의 보정 모형에 대한 모의)와 3,702mm(2008~2010년 기간의 보정 모형에 대한 모의)이다.

황강댐 설치 이전 유역 모형의 모의 결과와 비교하여 관측 유량이 731mm(18%)가 감소하였고, 댐 설치 이후의 유역 모형에 대비하여 365mm(10%)가 감소하였다. 이러한 결과는 댐 설치 및 운영에 따른 하류 유역의 유량 감소로 판단되며, 향후 북한 유역의 신뢰할 수 있는 수문자료를 바탕으로 이러한 결과를 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

북에서 남으로 흐르는 임진강은 유역면적의 약 60%가 북한에 위치하고 나머지는 남한에 위치한 공유하천으로 남한과 북한 간의 정치적, 군사적 대립이라는 특수한 여건으로 인해 신뢰할 수 있는 이수 및 치수 관리가 어려운 실정이다. 본 연구에서는 쉽게 취득할 수 있는 남한의 수문자료를 활용하여 남·북한 공유하천인 임진강 유역의 장기 유출 특성을 분석하였으며, 북한 댐(황강댐) 설치 전·후에 대한 장기 유출 특성의 변화를 분석하였다. 임진강 상류 임진교 유역의 2001~2012년 기간의 관측 수문 자료를 바탕으로 장기유출 특성을 분석한 주요 결론은 다음과 같다.

- 2008년 이후 황강댐 운영으로 인한 임진교 유역의 유출량 감소 및 유출 특성의 변화를 확인할 수 있고, 2014년 모의 결과, 관측 유량이 모의 유량보다 현저히 작게 관측되며, 이는 북한 지역 상류 댐들의 저류의 영향으로 판단된다.

- 2011~2015년 기간을 대상으로 황강댐 설치 이전 및 이후 유역 모형의 모의 결과를 비교한 결과 댐 설치 이전 모형 대비 이후의 유역 모형이 8%의 유출고 감소를 나타내고 있으며, 이러한 결과는 임진강 상류의 유역 변화(댐 설치 및 운영 등)에 따른 영향으로 판단된다.

본 연구 성과는 임진강 유역의 재난 및 위기관리를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 임진강 유역에 대한 북한 지역의 수문자료를 추가 확보하여 본 연구의 성과를 검증하는 한편, 유량 예측의 신뢰성을 제고하고자 한다.

References

- Ahn, Sang Eok. 2010. Analysis of Conceptual Rainfall-runoff Model PDM Using Multi-objective Function. Master's Thesis. Chungbuk National University.
- Choi, Hyuk Jun, Won Kim, and Min Ho Lee. 2007. Improvement of Flood Forecasting System for Imjin River. *Proceedings of the Korea Water Resources Association*. 712-716.
- Choi, Hyun Sang and Kun Yeun Han. 2004. Development of Distributed Rainfall-runoff Model by Using GIS and Uncertainty Analysis (I)- Theory and Development of Model. *Journal of Korea Water Resources Association*. 37(4): 329-339.
- European Drought Centre. http://www.gro.uio.no/edc/software/BFI/User_Guide_BFI.pdf.
- Institute of Hydrology. 1999. *Flood Estimation Handbook*. 3 Volumes and Associated Software. Institute of Hydrology.
- Jakeman, A. J. and G. M. Hornberger. 1993. How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-runoff Model? *Water Resources Research*. 8(29): 2637-2649.
- Jakeman, A. J., I. G. Littlewood, and P. G. Whitehead. 1990. Computation of the Instantaneous Unit Hydrograph and Identifiable Component Flows with Application to Two Small Upland Catchments. *Journal of Hydrology*. 117(1-4): 275-300.
- Jang, Suk Hwan. 2014. Current State and Win-win Plans of Imjin

- River as South-North Korean Transboundary Rivers. *Water Policy Vision*. 2(2): 29-40.
- Kim, Byung Sik, Young Hye Bae, Jung Sool Park, and Kyung Tak Kim. 2008. Flood Runoff Simulation Using Radar Rainfall and Distributed Hydrologic Model in Un-gauged Basin; Imjin River Basin. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 11(3): 52-67.
- Kim, Dong Pil, Kyoung Ho Kim, and Joo Hun Kim. 2011. Runoff Estimation of Imjin River Basin through April 5th Dam and Hwanggang Dam Construction of North Korea. *Journal of the Environmental Sciences*. 20(12): 1635-1646.
- Kim, Dong Pil, Sung Won Jung, Seok Ho Lee, and Sang Cheol Lee. 2006. Runoff Characteristics Analysis in the Imjin-River Basin. *Proceedings of the Korea Water Resources Association*. 39(5): 1756-1761.
- K-water. 2015. *Report on the Adaptive Management for the Dry Season in Hantangang Dam*.
- Lee, Gwang Man, Boo Sik Kang, and Il Pyo Hong. 2008. Cooperative Framework for Conflict Mitigation and Shared Use of South-North Korean Transboundary Rivers. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*. 28(5B): 505-514.
- Moore, R. J. 2007. The PDM Rainfall-runoff Model. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11(1): 483-499.
- Moriassi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Qualification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.
- Park, Jin Hyeong and Young Taek Hur. 2009. Flood Runoff Simulation Using Physical Based Distributed Model for Imjin-River Basin. *Journal of Korea Water Resources Association*. 42(1): 51-60.
- Wagener, T., H. Wheeler, and H. Gupta. 2004. Rainfall-runoff Modeling in Gauged and Ungauged Catchments. *Imperial College Press*. London, UK.
- Yoon, Yong Nam. 2007. *Hydrology*. 1st ed. Cheongmoongak.
- Korean References Translated from the English*
- 김동필, 김경호, 김주훈. 2011. 북한의 4월 5일 댐과 황강댐 건설에 따른 임진강 유역의 유출량 평가. *한국환경과학회지*. 20(12): 1635-1646.
- 김동필, 정성원, 이석호, 이상철. 2006. 2005년 임진강 유역의 유출특성 분석. *한국수자원학회 학술발표회 논문집*. 1756-1761.
- 김병식, 배영혜, 박정슬, 김경탁. 2008. 레이더 강우와 분포형 수문모형을 이용한 미계측 유역의 홍수 유출모의: 임진강 유역. *한국지리정보학회지*. 11(3): 52-67.
- 박진혁, 허영택. 2009. 물리적기반의 분포형모형을 활용한 임진강유역 홍수유출모의. *한국수자원학회 논문집*. 42(1): 51-60.
- 안상익. 2010. 다목적함수를 이용한 개념적 강우-유출 모형 PDM의 적용성 분석. *충북대학교 석사학위논문*.
- 윤용남. 2007. 수문학. 청문각.
- 이광만, 강부식, 홍일표. 2008. 남북한 공유하천의 갈등해소와 공동이용을 위한 협력체계. *대한토목학회 논문집*. 28(5B): 505-514.
- 장석환. 2014. 남북 공유하천으로서의 임진강의 현황과 상생 방안. *수자원정책 비전*. 2(2): 29-40.
- 최현상, 한건연. 2004. GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발(I): 이론 및 모형의 개발. *한국수자원학회 논문집*. 37(4): 329-339.
- 최혁준, 김원, 이민호. 2007. 임진강 홍수예보시스템 개선. *한국수자원학회 학술발표회 논문집*. 712-716.
- 한국수자원공사. 2015. 한탄강댐 갈수기 대응 방안 수립 보고서.

남북 공유하천-임진강의 장기유출 분석

국문초록 임진강은 북한과 남한이 공유하고 있는 하천으로 북에서 남으로 흐르는 하천이다. 상류유인인 북한의 신뢰할 수 있는 관측 유량은 남한 지역의 수자원관리에 필수적이다. 그러나 이러한 수문자료는 정치적인상황 등으로 공유되지 않고 있으며, 남한지역의 홍수 및 가뭄관리에 어려움이 증대되고 있다. 본 연구는 개념적 강우-유출 모형인 Probability Distributed Model (PDM)을 임진강 유역에 적용, 대상 유역의 장기 유출량(2001~2015년)을 모의하며, 황강댐 개발에 따른 대상 유역의 영향을 평가한다. 대상 유역은 2007년 말 임진강 상류 북한 지역의 황강댐 건설 이후 유출량 감소 및 유출 특성의 변화를 보이고 있다. 또한 2011~2015년의 유역 유출 모의 결과, 관측 유량이 모의 유량보다 8% 작게 관측되며, 이는 상류에 위치한 댐의 저류에 의한 영향으로 판단할 수 있다. 향후 북한 지역 유역의 자료를 추가 확보하여, 본 연구의 성과를 검증하며, 유량 산정의 신뢰성을 확보하고자 한다.

주제어 : 장기 강우-유출, 개념적 강우-유출 모형, 확률분포모형

Profiles Moo-Kyeong LEE : He obtained a master's degree in graduate school of Chungbuk National University(Thesis: Runoff analysis of basin using WMS model, 2004). And He completed doctoral course in graduate school of Chungbuk National University. Now he works at gyeonggi provincial government(steelcivil@gg.go.kr).

Hyo-Sang LEE : He is an associate professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea. He received Ph.D degree from Imperial College, London, the UK in 2006. The main study field is application of rainfall-runoff models at gauged and ungauged catchments. Also, he writes "Application of Rainfall Runoff Model with Rainfall Uncertainty(2009)", "Assessment of Conceptual Rainfall Runoff Models for Regionalisation at Miho Catchment(2012)" and so on(hyosanglee@chungbuk.ac.kr).

Suk-Hwan JANG : He received his Ph.D. from University of Seoul, Korea in 1994. He is a professor of department of Civil engineering at Daejin University since 1998. His interesting subject and area of research are hydraulics, hydrology, water resources management and water problem of between Korea and North Korea(drjang@daejin.ac.kr).

Jae-Kyoung LEE : He received his Ph.D. from Seoul National University, Korea in 2013. He is an assistant professor of the Innovation Center for Engineering Education at Daejin University, in which he has taught since 2015. His interesting subject and area of research are climate change, water resources management, rainfall estimates with weather radar, and creative problem solving methodology(myroom1@daejin.ac.kr).