

Evaluation of Instream Flow in the Imjingang River according to the Operation of Hwanggang Dam in North Korea

Suk Hwan Jang^{1#}, Jae-Kyoung Lee^{2*}, Joon Won Jo¹

¹ Department of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon, Korea

² Innovation Center for Engineering Education, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon, Korea

Abstract

This study evaluated the instream flow of the existing dams and major water-level stations in the Imjingang river basin by the operation of Hwanggang Dam in North Korea and proposed a solution for securing instream flows. First, stream flow, basin inflow, and dam releases were reasonably estimated by water balance analysis using daily averaged data in the Imjingang river basin. Second, streamflows at major water-level stations in the Imjingang river basin decreased significantly after the Hwanggang dam operation, which confirmed that the Hwanggang Dam in North Korea had a significant effect on the streamflows of the Imjingang river basin in South Korea. Third, the instream flow analysis for the Imjingang river basin confirmed that instream flows were not consistently satisfied in all water-level stations. Finally, the Hwanggang Dam operation was one of the main reasons for the lack of instream flow, since the total amount and period of shortage increased up to 14,156% and 16,800%, respectively after the Hwanggang dam operation. We then suggested how to utilize the existing dams and shared river basins to secure instream flow. In the future, various long-term and well-planned strategies would be needed.

Key words: instream flow, shared river, Imjingang river, Hwanggang dam

1. 서론

우리나라는 지리와 기후적 특징으로 물 관리 효율성이 매우 중요하므로 물 관리를 위한 댐 등의 적극적 수자원시설의 활용을 통해, 지리와 기후 조건을 고려한 홍수 방재 및 수자원 확보 등의 물 관리를 하고 있다. 그러나 물 관리 기관이 홍수방재, 농업용수 관리, 생·공용수 관리, 수질관리 등 목적에 따라 다원화되

어 있어 수계 내 통합적인 물관리가 어려워 물 관리 효율성이 저하되고 있다. 사례로 동일 수계 내에서 수력 댐과 다목적 댐이 존재하나 그 목적에 따라 달리 운영되어 최적 운영이 다소 아쉬운 상황이다. 2016년 정부는 이와 같은 문제점을 충분히 인식하고, 이를 개선하고자 공공기관 기능 조정하는 방안을 발표하였다. 즉, 동일 수계 내 댐 관리 일원화로 관리 기관의 유사·중복 기능을 조정하여, 홍수 관리, 용수 확보 등

The 1st author: Suk Hwan Jang, Tel. +82-31-539-2357, Fax. +82-31-539-2352, e-mail. drjang@daejin.ac.kr

* Corresponding author: Jae-Kyoung Lee, Tel. +82-31-539-2357, e-mail. myroom1@daejin.ac.kr

물 관리의 효율성 제고 및 기관별 핵심 역량 강화를 도모하고자 수력댐 관리 일원화 정책을 제시하였다.

특히, 한강 유역은 북한강수계와 임진강 수계는 남·북 군사분계선과 연결되어 북한 하천에서 남한으로 흐르는 공유하천이므로 한강 유역 물 관리에 매우 어려움이 발생한다. 북한 임남댐 운영으로 북한강 수계로 유입되는 유량이 17억 ton/year 감소하였으며, 임진강 수계에는 황강댐의 운영으로 남한 유입유량 조절을 위해 군남댐과 한탄강홍수조절댐이 운영되고 있다. 따라서 한강 유역의 물 관리는 북한 댐운영에 따라 매우 큰 영향을 받기 때문에, 물 관리에 있어서 중요한 요인 중 하나이다. 기존 북한 수자원관리와 댐운영에 따른 영향에 대한 연구들을 살펴보면, Kim, et. al.(2002)은 임진강 유역의 수자원 현황을 살펴보고 남북협력을 통한 남한과 북한 모두 효율적인 수자원 활용이 가능한 방안을 제시하였다. Myung & Kim(2010)은 북한 과거 강수특성과 미래 강수전망을 분석해 북한 수자원 변동을 살펴보았으며, KEI(2009)과 Ahn, et. al.(2011)은 북한 임남댐 운영에 따른 북한강 수계에 미치는 수량 및 수질 영향을 분석하여 물 부족 상황을 제시하였다.

특히 공유하천인 임진강 유역의 효율적인 수자원 관리를 위해서는 북한 댐운영에 따른 남한댐의 연계 운영 분석이 반드시 필요하다. 최근 들어 이수관리·하천환경관리·생태계보전·농업활동 등을 위한 수자원의 중요성이 부각되면서, 각 하천별 하천유지용수(Instream flow) 확보여부가 매우 중요하게 고려되고 있으며, 유럽을 중심으로 하천유지유량보다 더 적극적인 유량확보를 위한 환경유량(Environmental flow)으로 개념이 전환되고 있다. 하천유지유량에 대한 국내 연구사례를 살펴보면, Jang(2004)는 여러나라 하천유지유량 산정방법에 따른 장·단점을 비교·분석하여, 도심하천의 하천유지유량 산정에 반영되어야 할 항목들을 도출하고 이를 기반으로 도심하천의 하천유지유량 산정기준을 제안하였다. KEI(2015)는 물수요 변화에 따라 변화하는 환경생태유량, 친수용수 등에 대해 살펴보고 효율적인 환경생태유량 및 친수용수

등을 제시하였다. Kang, et. al.(2015)은 우리나라에서의 하천유지유량의 개념을 살펴보고 하천유지유량과 하천수 사용과의 상관성을 통해 효율적인 물 관리를 위한 개선방안을 제시하였다. Woo, et. al.(2019)는 SWAT를 이용하여 한강 유역의 주요 다목적댐군의 고지된 하천유지유량 만족을 위한 댐 추가방류를 통해 유역 수질 및 수생태계 변화를 평가하였다. 기존 여러 연구결과들을 정리하면, 하천유지유량과 공유하천으로서 한강 유역 효율적 물 관리를 중점으로 검토하였으나, 북한 댐운영에 따른 한강수계에 위치한 댐 운영이나 하천유지유량의 영향 정도에 대한 검토는 미비하였다.

따라서 본 연구에서는 공유하천인 임진강 유역을 대상으로 북한 황강댐 운영에 따른 임진강 수계에 위치한 댐군의 영향과 하천유지유량 만족여부에 대해 다음과 같이 평가하고자 한다. 첫 번째로 임진강 댐군의 유입량, 방류량, 유역유입량을 대상으로 댐운영에 대하여 간략히 물수지 분석하고자 한다. 두 번째로 북한 황강댐 운영 전·후에 따른 임진강 수계 댐군의 영향을 분석하고자 한다. 세 번째로 북한 황강댐 운영에 따른 임진강 수계 댐군의 하천유지유량 만족여부를 검토하고자 한다. 마지막으로 하천유지유량을 만족하지 못하는 경우 이를 확보할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

II. 임진강 수계 댐운영 기본사항

1. 기본사항

1) 임진강 하천현황

임진강 수계는 한강 하구를 기준으로 제1지류이며, 북한 함경남도 덕원군에서 발원하며 북한강과 유역 경계를 이루고 있다. 임진강의 대표적인 하천은 고미단천, 역곡천, 한탄강, 평안천 등이다. 임진강 전체 면적은 8,117.5km²(북한지역: 5,108.8km²(62.9%)), 유로연장은 254.6km(북한지역: 162.2km(64%))이다. 임진강 유역의 남동부에 위치한 한탄강 유역면적은 2,436.4km²

(임진강 유역의 약 30%), 유로연장은 133.4km이고 전 곡읍에서 임진강 본류와 합류한다. 임진강 유역의 북동부에 위치한 고미탄천은 유역면적이 1,055.1km², 유로연장이 113.7km로 강원도 법등군에서 발원하여 남향하다가 후평에서 동향한 후 이천 부근에서 임진강 본류와 합류한다(KEI, 2010). 임진강 상류는 하상경사가 급하고, 중·하류지역에는 넓은 평야가 분포하나 하상경사가 완만하여 홍수 시 하류의 피해가 심각한 편이다. 임진강 수계는 한강 하구 지역의 수자원 이용이나 하천관리 측면에서 광역적으로 수도권 북부지역의 용수공급원 역할을 한다.

2) 수문자료 개요

본 연구에서는 공유하천인 임진강 수계에 위치한 댐군에 초점을 맞추었으며, 북한 황강댐과 남한 군남댐과 한탄강댐을 살펴보았다. <Figure 1>, (a)는 임진강 수계 댐군의 목적과 기본 제원을 나타낸 그림이다. 임진강 유역에는 군남댐과 한탄강댐이 위치하고 있으며, 군남댐의 유역면적은 4,191km², 총저수용량은 71.6백만 ton이고 한탄강댐의 유역면적은 1,279km², 총저수용량은 270백만 ton이다. 두 댐 운영목적 모두 북한 수공(Water attack)의 방어목적으로 평화의댐과 동일하며, 한국수자원공사에서 관리하고 있다. <Figure 1>,

(b)는 임진강 수계의 물수지 분석을 위하여 댐군의 유입량, 총방류량, 유역유입량에 대한 모식도와 댐군의 상·하류하천에 위치한 수위 및 유량관측소들을 나타내고 있다. 특히, 군남댐과 한탄강댐의 유입량과 유출량에 대한 정확한 수문자료를 취득하기에 한계가 있어 본 연구에서는 황강댐과 군남댐 사이의 필승교 관측소, 군남댐 하류에 위치한 임진교 관측소, 한탄강댐 하류에 위치한 사랑교 관측소, 군남댐 하류 하천과 한탄강댐 하류 하천이 합류되는 지점인 비룡대교 관측소 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 <Figure 1>, (b)에서 사용된 총방류량, 댐유입량, 유량관측소의 위치와 지역적 특성을 고려하여 물수지과약을 위해 다음과 같이 정의하여 적용하였다.

- 총방류량, 댐유입량, 해당댐 상류유역 유입량의 산정 가정은 북한강 수계와 동일하다.
- 황강댐 총방류량은 필승교 관측소 수위 및 유량과 같거나 필승교 관측소 유량이 유역 유입량으로 인해 더 크다.
(황강댐 총방류량 ≤ 필승교 관측소 유량(수위) 측정값 + 유역 유입량)
- 군남댐의 총방류량은 임진교 관측소 수위 및 유량과 같거나 임진교 관측소 유량이 유역 유입량

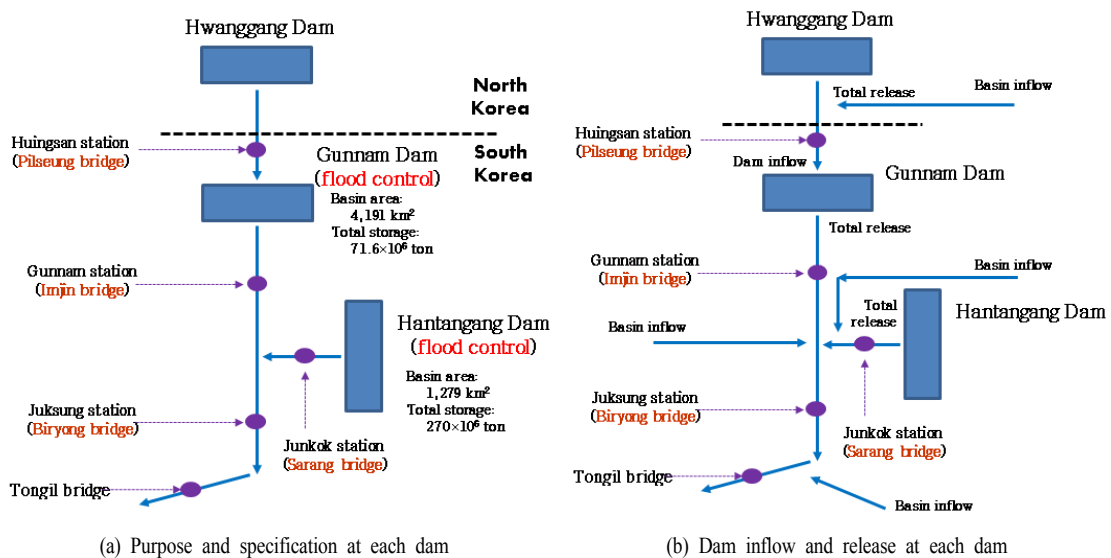


Figure 1. Description of dams in the Imjingang river basin

으로 인해 더 크다.

(군남댐 총방류량 ≤ 임진교 관측소 유량(수위)측정값 + 유역 유입량)

- 한탄강댐의 총방류량은 사랑교 관측소 수위 및 유량과 같거나 사랑교 관측소 유량이 유역 유입량으로 인해 더 크다.

(한탄강댐 총방류량 ≤ 사랑교 관측소 유량(수위)측정값 + 유역 유입량)

- 비룡대교 관측소의 유량은 임진교 관측소와 사랑교 관측소의 유량과 같거나 유역 유입량으로 인해 더 크다.

(비룡대교 관측소 유량 ≥ 임진교 관측소 유량측정값 + 사랑교 관측소 유량측정값 + 유역 유입량)

임진강 수계의 댐운영·유량(수위)관측소 현황과 물수지를 파악하기 위해 본 연구에서는 <Table 1>과 같이 댐 운영 자료를 WAMIS(국가수자원관리종합정보시스템)에서 취득하여, 임진강 유역에 위치한 댐과 관측소들의 운영을 분석하였다. 관측소 운영 자료의 시간적 범위는 2000년 이전의 자료들도 존재하나 댐과 관측소들 간의 비교를 위해 검토 대상의 관측소 운영 자료가 가용하고 품질이 우수한 구간을 선택하여, 최대 2001년 3월에서 2018년 12월까지의 자료를 선별하였다.

댐운영 및 유량(수위)관측소 현황은 자료 취득의 한

계로 인해 일평균(Daily average)자료만 분석하였으며, 검토자료는 유입량, 총방류량, 관측소 유량, 관측소 수위, 하천유지유량 등이다. <Table 2>는 임진강 수계 주요지점의 하천유지유량 고시현황이다.

2. 임진강 수계 댐군의 물수지 검토

II 장 1절에서 설명한 자료들에서 ‘총방류량’, ‘댐유입량’, ‘유역유입량’, ‘관측소 유량(수위)’간의 관계를 중점적으로 분석하였으며, 결과는 <Figure 2>와 같다.

<Figure 2>의 일평균 자료를 이용한 임진강 수계의

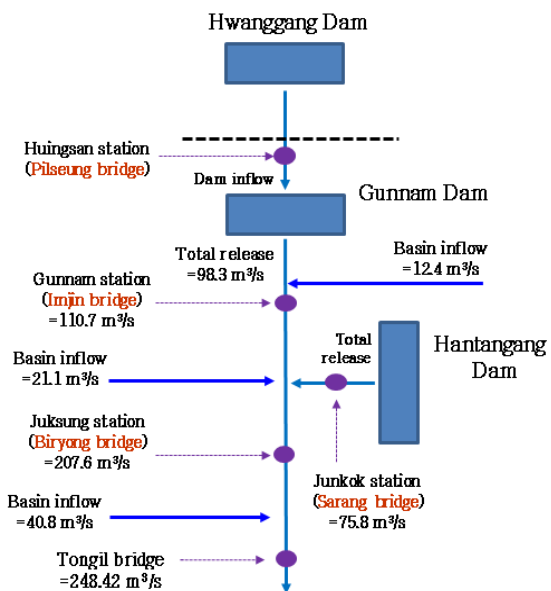


Figure 2. Water balance analysis using daily dam and station data in the Imjingang river basin

Table 1. Description of dam data in the Imjingang river

Item	Pilsung bridge (Huingsan station)	Imjingang bridge (Gunnam station)	Biryong bridge (Juksung station)	Sarang bridge (Junkok station)	Tongil bridge
Data length	2002.01~2018.12	2001.01~2018.12	2001.01~2018.12	2004.01~2018.12	2005.01~2018.12
Unit	Daily average				
Used data	Inflow, total release, instream flow, water-level, streamflow				
Note	Tongil bridge: no data 2010.01~2012.12				

Table 2. Notification of instream flow in the Imjingang river basin

River	Station	River grade	Instream flow (m³/s)	Classification criteria
Imjingang river	Imjingang bridge	Local	7.32	Water quality
	Biryong bridge	National	11.84	Ecological flow
Hantan river	Sarang bridge	Local	6.04	Ecological flow

물수지 분석결과를 살펴보면, 임진교 관측소의 하천 유량은 평균 $110.7\text{m}^3/\text{s}$ 로 관측되었으며, 군남댐 총방류량은 $98.3\text{m}^3/\text{s}$ 이므로 군남댐과 임진교 관측소 사이 유역 유입량은 $12.4\text{m}^3/\text{s}$ 로 추정된다. 군남댐 총방류량 자료는 K-water(2016)의 ‘한탄강댐 갈수기 대응 방안 수립 보고서’의 자료를 인용하였으며, 자료 길이는 2009년 9월부터 2015년 12월까지 일평균 총방류량 자료이다. 비룡대교 관측소의 일평균 하천유량은 $207.6\text{m}^3/\text{s}$ 로 산정되었으며, 임진교 관측소와 사랑교 관측소의 일평균 하천유량의 합이 $186.5\text{m}^3/\text{s}$ 이므로 군남댐과 한탄강댐 하류 합류지점의 유역 유입량은 $21.1\text{m}^3/\text{s}$ 로 추정된다. 마지막으로 통일대교의 일평균 하천유량은 $248.4\text{m}^3/\text{s}$ 로 관측되어 비룡대교 관측소와 통일대교 사이 유역 유입량은 $40.8\text{m}^3/\text{s}$ 로 추정된다.

이와 같이 자료의 한계는 존재하나 취득가능한 자료로 검토한 결과, 임진강 수계에서 물수지는 군남댐 총방류량, 임진교 관측소 유량, 사랑교 관측소 유량, 비룡대교 관측소 유량, 통일대교 유량, 각 댐과 관측소 간의 유역 유입량이 어느 정도 타당하게 산정 및 추정되었다고 판단된다. 하지만 본 보고서에서는 WAMIS에서 대외적으로 제공되는 한정된 자료만을 이용하였고 제공된 자료에 대한 품질검증은 따로 수행하지 않았으며, 증발산량, 지하수유입 등의 다양한 수문학적 환경을 반영하지 않았다. 따라서 향후 여러 시간 간격(시평균, 일평균, 월평균) 자료, 관측된 자료의 품질관리, 다양한 수문변수의 자료 취득이 가능하여 이를 최대한 반영할 수 있다면 보다 정확한 물수지 분석이 가능할 것으로 판단된다.

III. 북한 황강댐 운영에 따른 임진강 하천유지유량 검토

1. 황강댐 운영에 따른 임진강 수계 댐군의 영향 검토
본 연구에서는 공유하천에 위치한 북한 황강댐 건설에 의해 남한 임진강 유역에 위치한 댐군의 유량 등 수자원 환경에 어떤 영향을 주었는지에 대해 ‘북한 황

강댐 운영으로 인한 황강댐 방류량의 변화에 따라 남한 임진강 수계에 위치한 댐군의 유입량에 어떤 영향을 줄 것인가’를 기준으로 검토하였다. 이와 관련하여 북한 황강댐 운영의 영향을 받을 수 있는 남한 임진강 유역에서의 군남댐과 연계되는 한탄강댐을 선정하였으며, 두 댐의 유입량에 어떤 영향이 있는지를 검토하였다.

자료 취득의 한계상 황강댐 방류량 자료를 직접 취득할 수 없기 때문에 황강댐 하류와 군남댐 상류에 위치한 임진교(군남) 관측소 자료를 이용하였으며, 임진교 관측소의 유량변화가 곧 군남댐 유입량에 큰 영향을 미치기 때문에 관측소의 유량이 황강댐의 방류량이자 군남댐 유입량으로 가정하였다. 또한 임진강 수계 하류에 위치한 비룡대교 관측소의 유량 변화를 분석하여 황강댐 운영에 따른 군남댐과 한탄강댐 운영이 임진강 수계에 미친 영향을 같이 분석하였다. 임진교 관측소 자료는 2001년 1월 1일부터 2018년 12월 31일까지, 비룡대교 관측소 자료는 2003년 1월 1일부터 2018년 12월 31일까지 일평균 유량자료와 수위자료를 월평균 유량자료로 환산하여 분석하였다. <Figure 3>은 임진교의 월평균 유량과 강수량 시계열을 나타내고 있으며, <Table 3>은 전체 기간(홍수기+갈수기)과 황강댐 담수 전후(2008)를 기준으로 하여, 전체기간과 갈수기의 임진강 유역의 월평균 면적평균 강수량과 임진교 관측소와 비룡대교의 월평균 유량을 비교한 표이다.

<Figure 3>과 <Table 3>에서 우선 임진교 관측소 분석 결과를 살펴보면, 전체기간에서는 강수량은 115.5mm , 유량은 $113.7\text{m}^3/\text{s}$ 를 나타내고 있다. 특히 황강댐 운영을 기준으로 이전과 이후 월평균 강수량은 115.5mm 와 113.9mm 로 그 차이가 크지 않지만 황강댐 담수 이전 월평균 유량은 $138.7\text{m}^3/\text{s}$ 에서 담수 이후 월평균 $98.3\text{m}^3/\text{s}$ 로 -29%로 매우 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 갈수기(10월부터 이듬해 5월)를 살펴보면, 황강댐 담수 기준으로 전체 기간과 마찬가지로 월평균 강수량은 변화가 거의 없으나(각각 월평균

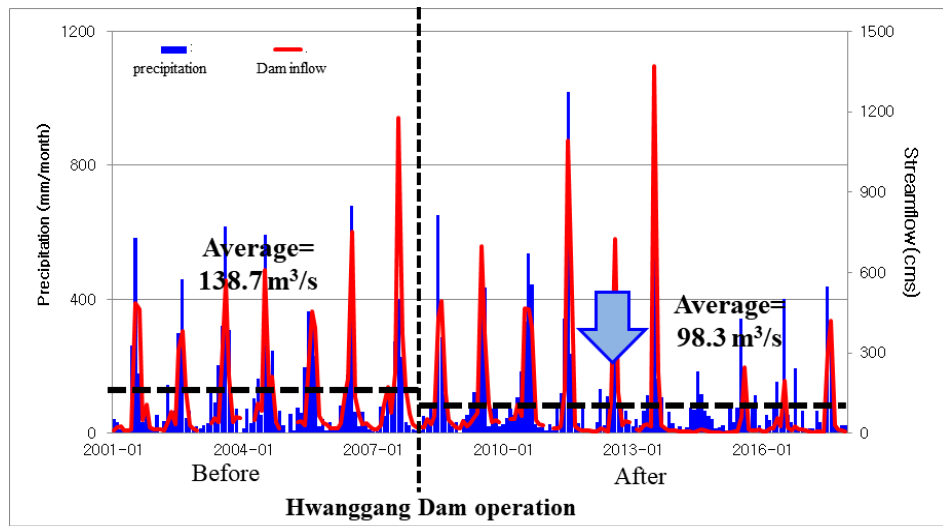


Figure 3. Comparison of daily average precipitation and streamflow of the Imjin station according to the Hwanggang Dam operation

Table 3. Difference of monthly average precipitation and streamflow of the Imjin station before and after the Hwanggang Dam operation

Seperation (operation of the Hwanggang Dam)		Total period (monthly)		Dry season (monthly)	
		Inflow (m³/s)	Precipitation (mm)	Inflow (m³/s)	Precipitation (mm)
Imjin bridge	Before (~2007)	138.7	115.5	45.7	45.3
	After (2008~)	98.3↓	113.9	21.5↓	46.3
	Total period (2001~2018)	113.7	115.5	30.7	45.9
Biryong bridge	Before (~2007)	259.7	122.5	105.9	48.0
	After (2008~)	200.7↓	117.36	52.4↓	44.6
	Total period (2001~2018)	223.0	119.4	71.9	46.0

45.5mm와 46.3mm) 유량은 담수 이전에는 월평균 유량이 45.7m³/s에서 담수 이후 21.5m³/s로 -53%나 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 북한 황강댐 담수 이전과 이후를 기준으로 강수량 변화는 없으나 남한 임진강 유역의 임진교 관측소 유량이 크게 감소하였다는 것은 북한으로부터 남한 임진강 유역으로 유입되는 하천유량이 큰 폭으로 감소하였다는 것을 나타내며, 북한 황강댐 운영이 주된 원인으로 판단할 수 있다.

다음으로 비룡대교 관측소의 분석 결과를 살펴보면, 홍수기와 갈수기를 합한 전체기간의 경우에는 월평균 강수량이 119.4mm, 월평균 유량이 223.0m³/s로 관측되었다. 황강댐 운영을 기준으로 비룡대교 관측소의 유역면적평균 강수량은 담수 전에는 122.5mm, 담수 후에는 117.4mm로 변화가 크지 않으나 비룡대교

관측소 유량은 259.7m³/s에서 200.7m³/s로 -22.7%로 매우 감소하였다. 마찬가지로 갈수기에도 황강댐 운영에 관계없이 면적평균강수량은 비슷하게 관측되었으나 황강댐 운영 이후 비룡대교 관측소 유입량은 105.9m³/s에서 52.4m³/s으로 -50.5%나 크게 감소하였다. 이러한 결과를 정리하면, 황강댐 운영 전후로 유량이 크게 감소하는 것은 황강댐 운영으로 군남댐 유입량과 방류량이 매우 감소하였음을 의미한다. 또한 한탄강댐이 건설되고 운영되어도 임진강 유역의 유량 확보에 큰 도움이 되지 않음을 의미하기도 한다.

2. 임진강 수계 댐운영에 따른 하천유지유량 검토
 댐은 고시된 하천유지유량을 지속적으로 만족시켜야 하므로 하천유지유량 이상을 방류를 해야 하며, 향

후 앞서 언급한 환경유량 개념으로 확장시킨다면 현재보다 더 많은 유량을 확보하여야 한다. 하지만 미래 뿐만 아니라 현재에도 정해진 하천유지유량을 만족하지 못한다면, 환경에 미치는 영향이 크므로 이에 관련하여 심각히 검토할 필요성이 있다.

이에 본 연구에서는 ‘현재 고시된 하천유지유량을 만족하면서 댐이 운영되고 있는가’를 기준으로 하여 임진강 수계에 위치한 댐군이 하천유지유량을 만족하도록 운영되는지 혹은 자연적인 유입량 부족, 특정한 목적을 위한 댐 운영 등이 하천유지유량을 만족시키는데 제한사항으로 고려되는지에 대해 검토하였다. 하천유지유량은 <Table 2>의 값을 적용하였다.

본 연구에서는 임진강 수계 하천유지유량 만족 정도를 분석하기 위해 군남댐, 한탄강댐, 임진교 관측소, 사랑교 관측소, 비룡대교 관측소의 일평균 총방류량, 하천유량, 각 지점의 하천유지유량을 비교하였다. 특히, 댐의 총방류량에 해당하는 각 관측소의 하천유량이 지점의 하천유지유량을 지속적으로 만족하는지에

초점을 맞추었다.

<Figure 4>는 임진교 관측소와 비룡대교 관측소에 대한 일평균 하천유량, 하천유지유량, 하천유지유량 부족량 시계열을 나타낸 그림이다. 임진교 일평균 자료를 살펴보면, <Figure 4>, (a)에 같이 표시하지 못하였으나 K-water(2016)의 ‘한탄강댐 갈수기 대응 방안 수립 보고서’의 군남댐 총방류량과 임진교 관측소의 관측유량과 매우 유사하였다. 특히, 전국적으로 강수량이 적었던 2014년부터 2015년까지는 하천유량이 다른 해에 비해 상대적으로 매우 적게 관측됨을 알 수 있다. <Figure 4>, (b)에서는 군남댐 하류에 위치한 임진교 관측소의 하천유지유량(7.32m³/s)을 만족하지 못하는 하천유지유량 부족량을 나타낸다. 자세히 살펴보면, 하천유지유량 부족량이 급격히 발생하는 시기가 2011년 이후에 집중되어 있음을 알 수 있으며, 앞서 언급한 2014년부터 2015년까지 강수량이 적었던 기간에 가장 하천유지유량이 부족했던 것으로 관측되었다. 다음으로 비룡대교 관측소 일평균 자료를 살펴보

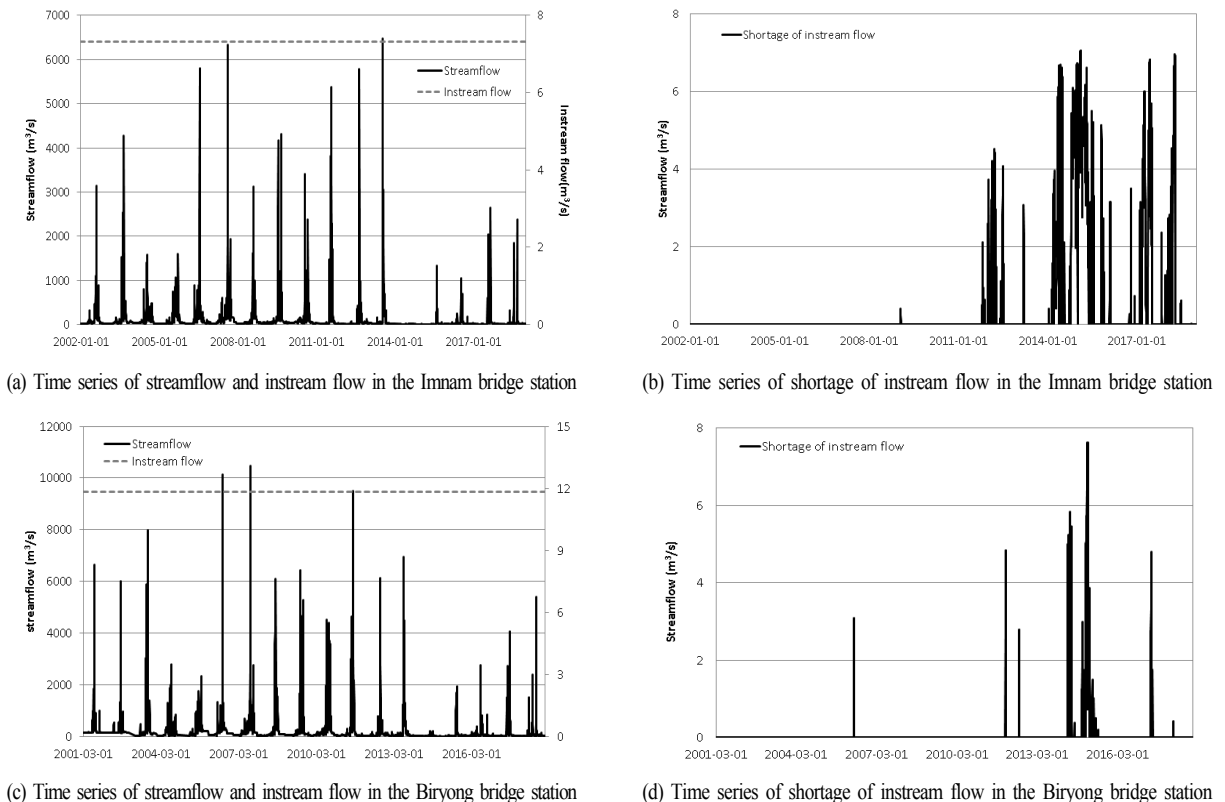


Figure 4. Comparison of streamflow, instream flow, and shortage of instream flow in the Innam bridge and Biryong bridge stations

면, <Figure 4>, (c)는 비룡대교 관측소의 일평균 하천 유량 시계열을 나타내고 있고 우리나라의 계절적 특징을 잘 보여준다. 전국적으로 강수량이 적었던 2014년부터 2015년까지는 하천유량이 다른 해에 비해 상대적으로 적게 관측되었다. <Figure 4>, (c)에서는 일 단위 별로 한탄강댐 하류인 사랑교 관측소의 하천유지유량인 11.84m³/s를 만족하지 못하는 하천유지유량 부족량을 나타내고 있다. 자세히 살펴보면, 하천유지유량 부족량이 급격히 발생하는 시기가 강수량이 적게 발생하여 갈수해인 2014년과 2015년에 집중되어 있음을 알 수 있다.

특히, 비룡대교 관측소에서 초점을 맞추어 살펴볼 사항은 <Figure 5>와 같다. <Figure 5>, (a)와 같이 단순히 비룡대교 관측소의 하천유지유량 부족량과 사랑교 관측소와 임진교 관측소의 하천유지유량 부족량을 비교하면, 사랑교 관측소와 임진교 관측소의 하천유지유량 부족량이 더 큰 것을 알 수 있다. 즉, 합류지점인 비룡대교 관측소의 하천유지유량이 상류 하천유지유량 부족량보다 적은 이유는 <Figure 2>의 유역유입량 때문으로 판단되었다. 이에 유역유입량을 산정하여 적용한 결과 <Figure 5>, (b)의 결과를 추정하였다. <Figure 5>, (b)를 살펴보면, 사랑교 관측소와 임진교 관측소 하천유지유량 부족량과 비룡대교 관측소 하천유량에 유역유입량을 합한 유량이 거의 비슷한 유량 값을 나타낸다. 즉, <Figure 5>, (a)의 상류 하천유지유

량 부족량을 유역 유입량이 어느 정도 만족시켜줌으로서 비룡대교 관측소의 하천유지유량 부족량이 상대적으로 적게 산정됨을 파악하였다.

분석결과를 정리하면 다음과 같다. 임진강 수계의 주요 관측소에서 하천유지유량이 부족한 것으로 분석되었으며, 특히 임진교 관측소와 비룡대교 관측소는 강수량이 적게 발생한 기간(2014년~2015년)에 집중된 것으로 나타났다. 즉, 군남댐과 한탄강댐 유역의 하천유지유량 만족도 여부는 강수량에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났으나, 하천유지유량 확보를 위한 댐군의 탄력적 운영이 부족한 것으로 분석되었다. 다시 말해, 강수량이 적은 기간에는 군남댐과 한탄강댐의 담수 역할이 미비하여 하천유지유량을 만족시키지 못하는 상태가 오래 지속될 것이고, 하천유량이 충분하지 못한 하천의 수환경과 생태계는 매우 열악한 상황이 될 것이다. 이에 따라 하천유지유량의 만족도를 높일 수 있는 적절한 방안이 필요한 것으로 분석되었다.

<Table 4>는 일평균 자료를 이용하여 분석한 임진강 수계의 유량·수위관측소(하천유지유량 지점)들의 고시된 하천유지유량, 하천유지유량 총부족량, 부족일, 평균부족량을 정리한 표로서, 활용가능한 모든 댐 자료가 존재하는 기간의 평균 혹은 총합을 산정한 것이다. 하천유지유량 총부족량을 살펴보면, 군남댐 하류인 임진교 관측소는 2,612.2m³/s, 한탄강댐 하류인

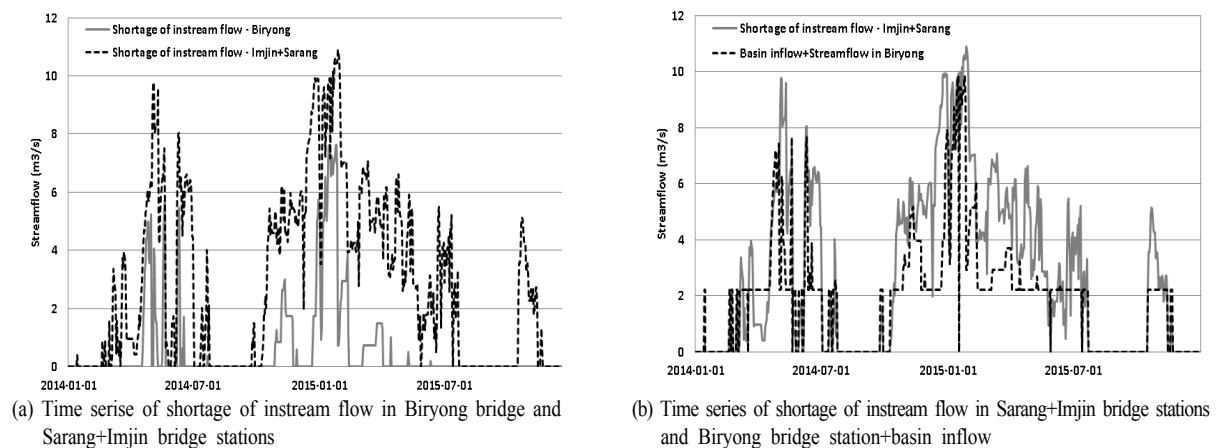


Figure 5. Comparison of shortages of instream flow in the Biryong bridge station during dry seasons (2014-2015)

Table 4. Results of shortages of instream flow in major stations in the Imjingang river basin

Item	Imjin bridge	Sarang bridge	Biryong bridge
Station code	1021680	1022680	1023660
Official instream flow (m ³ /s)	7.32	6.04	11.84
Total shortage amounts of instream flow (m ³ /s)	-2,612.2	-1,132.7	-450.2
Total period of instream flow shortage (day)	-784	-402	-169
Average shortage amounts of instream flow (m ³ /s)	-3.3	-2.8	-2.7
Annual total shortage amounts of instream flow (ton/year)	4.38 ×10 ⁶	3.70 ×10 ⁶	3.50 ×10 ⁶

사랑교 관측소는 1,132.7m³/s, 군남댐과 한탄강댐의 합류지점 이후인 비룡대교 관측소는 450.2m³/s로 산정되었다. 하류로 갈수록 하천유지유량 부족량이 줄어드는 것은 앞서 살펴본 바와 같이 유역 유입량의 비중이 큰 것으로 판단된다. 하천유지유량 총부족일은 하천유지유량이 부족한 일을 합한 값이며, 군남댐 하류인 임진교 관측소는 784일, 한탄강댐 하류인 사랑교 관측소는 402일, 군남댐과 한탄강댐의 합류지점 이후인 비룡대교 관측소는 169일로 산정되었다.

각 댐별로 연간 단위로 하천유지유량 부족량을 산정한 결과, 군남댐 하류인 임진교 관측소는 4,378,167m³, 한탄강댐 하류인 사랑교 관측소는 3,702,309m³, 군남댐과 한탄강댐의 합류지점 이후인 비룡대교 관측소는

3,500,293m³로 산정되었다. 댐별 연간 하천유지유량 부족량이 증가할수록 하천유지유량 평균부족량도 증가하는 것으로 나타났다.

3. 북한 황강댐 운영에 따른 남한 임진강 수계 하천유지유량 검토

본 절에서는 북한 황강댐의 운영이 임진강 수계에 위치한 댐군의 운영과 하천유지유량 충족에 영향을 주었는지를 파악하였다. 분석방법은 임남댐 건설 후 담수하기 시작한 2008년을 기준으로 하여 운영 전과 후로 구분하여 각 유량관측소별(하천유지유량고시 지점) 하천유지유량 부족량 및 부족시간을 산정하여 비교하였다. 한탄강댐 하류인 사랑교 관측소관측소(사랑교)은 황강댐 운영에 대한 직접적인 영향을 받지 않기 때문에 비교사항으로만 포함하였다.

<Table 5>는 유량관측소별로 황강댐 운영 전과 후에 대하여 하천유량, 하천유지유량, 하천유지유량 부족량과 부족시간을 비교하여 정리한 것이다. <Table 5>에서 우선 북한 황강댐 운영 전과 후에 대한 일평균 하천유량을 비교하면, 임진교 관측소에서는 황강댐 운영 이전에는 147.4m³/s이었으나 이후 93.0m³/s으로 -36.9% 감소하는 것으로 나타났으며, 비룡대교 관측소에서는 황강댐 운영 이전에는 269.1m³/s이었으나 이후 174.0m³/s으로 -35.3% 감소하는 것으로 산정되었다.

다음으로 각 유량관측소의 하천유지유량 총부족량

Table 5. Shortage amounts of instream flow at each station in the Imjingang river basin according to Hwanggang dam operation in North Korea

Item	Sarang bridge station	Imjin bridge station				Biryong bridge station			
		Total	Before Hwanggang Dam	After Hwanggang Dam	Change ratio (%)	Total	Before Hwanggang Dam	After Hwanggang Dam	Change ratio (%)
Streamflow (m ³ /s)	75.8	110.7	147.4	93.0	-36.9%	207.6	269.1	174.0	-35.3%
Instream flow (m ³ /s)	6.04	7.32	7.32	7.32		11.84	11.84	11.84	
Total shortage amounts of instream flow (m ³ /s)	-1,132.7	-2,612.2	0	-2,612.2		-450.2	-3.1	-447.11	14,516%
Total period of instream flow shortage (day)	-402	-784	0	-784		-169	-1	-168	16,800%
Average shortage amounts of instream flow (m ³ /s)	-2.8	-3.3	0	-3.3		-2.7	-3.1	-2.7	

과 부족시간의 증가비율을 살펴보면, 임진교 관측소에서는 황강댐 운영 이전에는 하천유지유량의 부족이 발생하지 않았으나 이후에 집중적으로 발생한 것으로 나타나 하천유지유량 총부족량은 2,621.2m³/s, 부족일은 784일로 산정되었다. 다음으로 비룡대교 관측소에서는 황강댐 운영 이전에는 하천유지유량 총부족량과 부족일이 3.1m³/s와 1일이었으나 이후에는 447.1m³/s와 168일로 늘어나 각각 +14,156%와 +16,800%로 매우 증가한 것으로 산정되었다. 두 유량관측소의 하천유지유량 총부족량과 부족시간의 증가로 볼 때 북한 황강댐 운영이 주된 원인으로 분석되었으며, 황강댐 운영으로 인한 하류 하천에 대한 하천유지유량이 확보되지 않을 경우에 하천생태계와 수질 등에 심각한 영향을 줄 것으로 예상된다. 특히, <Figure 4>와 <Figure 5>까지의 경향성을 볼 때 현재 상황이 유지되는 한, 지속적으로 반복해서 발생될 것이라는 점에서 문제의 심각성이 더 크다고 할 것이다.

이상에서 분석한 바와 같이, 현재의 임진강 수계의 댐 운영 방식으로는 하천유지유량을 적절히 충족시키지 못하고 있으므로, 이를 해결할 수 있는 개선방안의 마련이 시급하다.

4. 하천유지유량 부족 해소방안 검토

본 절에서는 부족한 하천유지유량을 만족하기 위해 연구차원에서 제시할 수 있는 몇 가지 방안을 제시하고자 한다. 먼저 이 방안을 진행하기 위해서는 현실적으로 반영해야 하는 다양한 변수들과 환경조건들이 있으며, 장기적인 검토가 필요함을 밝힌다.

1) 기존 군남댐·한탄강댐 활용방안

본 절에서는 임진강 유역의 군남댐과 한탄강댐 하류의 하천유지유량을 확보할 수 있는 방안으로 우선 임진강 유역 내 기존 댐을 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 하천유지유량은 임진강 모든 기존 댐 유역에서 지속적으로 발생하고 있으며, 이를 연간 하천유지유량 부족량으로 환산하면

<Table 4>와 같이 군남댐에서는 최대 연간 4.38백만 ton, 한탄강댐에서는 최대 연간 3.70백만 ton이 부족한 것으로 추정된다. 특히, 임진강 수계에서는 군남댐과 한탄강댐 지류가 다르기 때문에 각각의 댐에서 하류의 하천유지유량을 확보해야 하며, 두 댐의 하류가 합류된 후의 하류 지점에 대한 하천유지유량도 고려하여야 한다.

이에 본 연구에서는 기존 댐 활용방안으로서 군남댐과 한탄강댐 담수를 통하여 하천유지유량 부족량을 만족시키는 방안을 제시하고자 하며, 기본적인 개념도는 <Figure 6>과 같다.

군남댐과 한탄강댐에서 확보해야 하는 하천유지유량 부족량은 각각 4.38백만 ton과 3.70백만 ton이다. 우선 군남댐을 활용한 하천유지유량 부족량 확보방안을 살펴보면, K-water(2016)의 ‘한탄강댐 갈수기 대응 방안 수립 보고서’에서의 군남댐 저수위와 저수용량 자료를 이용하여 산정한 평균저수위인 EL. 24.4m(저수용량 2.56백만 ton)을 기준으로 4.38백만 ton을 확보하기 위해서는 3.5m 상승시켜야 하며, 이 때 저수용량은 수위-저수량곡선을 이용하면 7.05백만 ton으로 추정할 수 있다.

동일한 방법으로 한탄강댐을 활용한 하천유지유량 부족량 확보방안을 살펴보면, K-water(2016)의 ‘한탄강댐 갈수기 대응 방안 수립 보고서’에서의 한탄강댐 저수위와 저수용량 자료를 이용하여 산정한 평균저수위

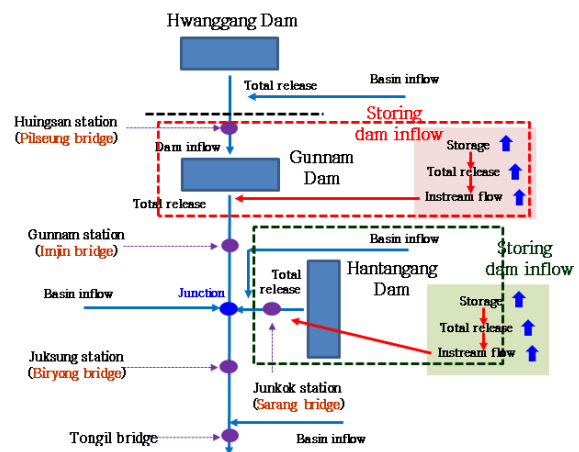


Figure 6. Concept of the existing dams in the Imjingang river basin for the instream flow security

인 EL. 50.3m(저수용량 1.33백만 ton)을 기준으로 3.70백만 ton을 확보하기 위해서는 8.1m 상승시켜야 하며, 이 때 저수용량은 5.08백만 ton으로 추정할 수 있다.

특히, 군남댐의 하천유지유량 부족량과 한탄강댐 하천유지유량 부족량은 임진강 유역의 하류에 위치한 비룡대교 관측소의 하천유지유량 부족량보다 더 크기 때문에 군남댐 혹은 한탄강댐의 하천유지유량을 확보하는 것으로도 충분히 비룡대교 관측소의 하천유지유량을 확보하는 것으로 나타났다.

이 방안은 치수목적으로만 건설된 군남댐과 한탄강댐을 다목적으로 활용방향을 넓힐 수 있으며, 임진강 수계 기존댐만으로 하천유지유량을 확보할 수 있는 방안이다. 특히 이 방안은 군남댐에서 계획홍수위인 EL. 40.0m보다 EL. 12.1m나 낮으며, 저수용량으로는 확보저수위 EL. 27.9m의 저수용량이 계획 홍수위 저수용량의 10%도 되지 않는다. 따라서 군남댐의 원래 목적인 북한의 수공(Water attack)을 방어하는 역할을 충분히 수행하면서도 하천유지유량을 확보하기 위해 기존댐을 활용한다는 측면에서 검토해 볼 만한 방안이라 판단된다.

2) 공유하천 활용방안

임진강 수계의 하천유지유량 부족량을 확보하기 위해 북측댐을 연계한 공유하천 활용방안을 제시할 수 있다. 북한에서는 황강댐에서 하천유지유량 부족량만큼 방류해주고 남한에서는 이에 대해 상응하는 보상대책을 마련하는 것이다.

황강댐 운영에 따른 수자원 손실량을 추정하면, 임진교 관측소 하천유량을 기준으로 황강댐 건설 전과 후의 유입량 감소량은 <Table 5>와 같이 일평균 54.4m³/s이며 연간 발생하는 수자원 손실량은 71.5백만 ton으로 추정된다. 이는 하천유지유량 부족분인 4.38백만 ton보다는 많은 양이므로 하천유지유량만을 확보할지 하천유량 감소량을 확보할지는 정책적으로 판단하여 결정할 사안이라고 판단된다.

북측댐 연계 운영에 대한 보상대책으로 생태계서비스

기반 정책 중 생태계서비스지불제(Payments for Ecosystem Services, PES)를 적용하는 것이며(Daily, 1997; Costanza, et al., 1997), 부족량 확보에 상응하는 보상이 따라야 한다.

Ahn & Kim(2016)의 연구결과에서 한강 하류 하천유지유량인 63.5m³/s의 생태계 가치인 2,610억 원을 기준으로 산정하면, 임진교 관측소 수자원 손실량인 71.5백만 ton(하천유지유량 부족량: 4.38백만 ton)의 물공급 가치는 약 77.1억 원(4.7억 원)으로 추정된다. 이 보상은 남한과 북한의 공유하천을 기반으로 연계한 다양한 협력사업이나 북한의 기반시설에 투자하는 협력사업 등으로 진행되는 것이 더 타당할 것이며, 이에 대한 정부·국민·관련단체 등이 참여하여 다양한 논의와 동의가 있어야 할 것이다.

3) 한계점과 제약조건

본 연구에서는 군남댐과 한탄강댐의 하천유지유량 총 부족량인 4.38백만 ton과 3.70백만 ton을 댐별로 한번에 만족해야 하는 것으로 우선 고려하였다. 각 댐별 담수해야 하는 계획 수위는 미래 강수전망·유입량·방류량 등의 계획을 면밀히 검토하여 수위를 산정하게 된다. 즉, 본 연구에서 제시한 방안과 같이 한번에 담수하는 것보다 댐별 운영계획에 따라 하천유지유량을 만족할 수 있는 유량만큼 방류하는 것이 더 현실적인 대안일 수 있다. 하지만 본 연구에서는 하천유지유량 부족량 제시에 초점을 맞추었으며, 각 댐별 운영을 고려한 하천유지유량 부족량의 충족방안은 향후 과제에서 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 먼저 한강 유역의 공유하천인 임진강유역을 대상으로 물수지 분석을 수행하였으며, 다음으로 북한 황강댐 운영에 따른 임진강 수계에 위치한 댐군의 하천유지유량 만족여부에 대하여 검토하였다. 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

1) 일평균 자료를 이용한 임진강 수계의 물수지 분석결과를 살펴보면, 임진강 수계에서의 물수지는 군남댐 총방류량, 임진교 관측소 유량, 사랑교 관측소 유량, 비룡대교 관측소 유량, 통일대교 유량, 각 댐과 관측소 간 유역 유입량이 어느 정도 타당하게 산정 및 추정되었음을 확인하였다. 하지만 다양한 시간단위, 관측자료의 품질, 다양한 수문변수들이 포함되지 않았으므로 향후 보다 정확한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

2) 북한에 위치한 황강댐 운영 전·후에 따라 임진강 수계의 댐군과 주요 수위관측소에 대한 영향 분석결과, 황강댐 운영을 기준으로 전체 기간의 경우 강수량 변화는 거의 없으나 임진교 관측소의 일평균 유량은 -29.1%, 비룡대교 관측소의 일평균 유량은 -22.7%로 매우 크게 감소하였다. 갈수기에도 강수량 변화는 거의 없었으나 임진교 관측소는 -53%, 비룡대교 관측소는 -50.5%나 감소하여 황강댐 운영에 따라 임진강 남측으로 유입되는 유량이 크게 감소하였음을 확인하였다.

3) 임진강 수계 댐운영에 따른 하천유지유량 만족에 대한 검토 결과, 일평균 유량자료를 이용한 분석에서 주요 수위관측소 모두 하천유지유량을 지속적으로 만족시키지 못함을 확인하였으며, 댐 하류일수록 하천유지유량 부족량이 조금씩 감소되었다.

4) 북한 황강댐 운영의 영향으로 임진강 수계의 주요 수위관측소들의 하천유량 감소에 따른 하천유지유량 총부족량과 부족일의 증가 정도를 살펴보면, 임진교 관측소는 각각 $2,621.2\text{m}^3/\text{s}$ 와 784일, 비룡대교 관측소는 $447.1\text{m}^3/\text{s}$ (+14,156%)과 168일(+16,800%)로 나타나 황강댐 운영이 남한 임진강 수계에 유입되는 하천유량에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히 이러한 상황이 지속적으로 발생할 것이라는 점이 심각한 문제점이라 판단된다.

본 연구에서 분석한 결과와 같이 하천유지유량을 만족시키지 못하는 상태가 지속적으로 발생하면 수환

경과 생태계에 악영향을 주게 되며, 수자원 확보가 시급한 우리나라의 지역별 물부족문제로 확장될 수 있다. 따라서 앞서 검토한 바와 같이, 임진강 수계에 하천유지유량을 확보할 수 있는 다양한 방안들을 적극 검토해야 할 것이며, 이에 대한 연구도 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 대전대학교와 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. NRF-2017R1E1A1A01075118).

References

- Ahn, Jong Seo, Kwan Sue Jung, and Gwang Man Lee. 2011. Problems of Water Use of Estimation of Water Right in North Han River Shared by North and South Korea (I): Analysis of Diversion Impacts on Downstream Area by Innam Dam. *Journal of Korea Water Resources Association*. 44(4): 305-314.
- Ahn, S. E. and G. Kim. 2016. Economic Values of Freshwater Ecosystem Services from Demand and Supply Perspectives. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 38(10): 580-587.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. DeGroot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Aem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. Van Den Belt. 1997. The Value of the World's Ecosystem Services into Conservation Assessments: A Review. *Ecological Economics*. 63(4): 714-721.
- Daily, G. 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, D. C.: Island Press.
- KEI. 2009. *Developing a Water Security Framework of Transboundary Rivers between South and North Korea*. Research Report 2009-06.
- KEI. 2015. *A Study on Water Environment Policy under Changing Water Demand For Environmental Flow and Recreation Water*. Research Report 2015-03.
- Kim, Y. B., S. J. Lee, M. W. Lee, and J. Y. Choi. 2002. *A Study*

- on the Utilization of the Imjin River Basin through South-North Korean Cooperation*. Korea Research Institute for Human Settlements.
- K-water. 2016. *Countermeasures Establishment Report for Dry Season in Hantangang River Dam*. 2016-WR-GP-9-54.
- Myeong, Soo Jeong and Hyun Han Kwon. 2010. Precipitation Characteristics Analysis and Climate Change Outlook of North Korea. *Proceeding of Korea Water Resources Association*. 1443-1447.
- Woo, So Young, Seong Joon Kim, Sun Jin Hwang, and Chung Gil Jung. 2019. Assessment of Changes on Water Quality and Quatic Ecosystem Health in Han River Basin by Additional Dam Release of Stream Maintenance Flow. *Journal of Korea Water Resources Association*. 52(S-2): 777-789.
- Zhao, L., A. Lyn, J. Wu, M. Hayes, T. Zhenghong, and B. He. 2014. The Impact of Meteorological Drough on Streamflow Drought in the Jinghe River Basin of China. *Chinese Geographical Science*. 24(6): 694-705.
- Korean References Translated from the English*
- 김영봉, 이상준, 이문원, 손기웅, 최지용. 2002. 남북협력을 통한 임진강유역의 평화적 활용방안에 관한 연구. 국토연구원.
- 명수정, 권현한. 2010. 북한의 강수특성 분석과 기후변화 전망. 한국수자원학회 학술대회논문집. 1443-1447.
- 안소은, 김지은. 2016. 수요 및 공급측면에서 평가한 하천 생태계 서비스의 경제적 가치. *대한환경공학회지*. 38(10): 580-587.
- 안정수, 정관수, 이광만. 2011. 남북공유하천 북한강의 물이용 문제점 및 수리권 추정(I): 임남댐 유역변경에 의한 하류 영향 분석. *한국수자원학회지논문집*. 44(4): 305-314.
- 한국수자원공사. 2016. 한탄강댐 갈수기 대응 방안 수립 보고서. 2016-WR-GP-9-54.
- 한국환경정책·평가연구원. 2009. 남·북한 공유하천의 관리 현황과 물안보 확보 방향. 정책보고서 2009-06.
- 한국환경정책·평가연구원. 2015. 환경생태유량, 친수용수 등 물수요 변화에 대응하는 물환경 정책 개발 연구. 연구보고서 2015-03.

Received: May 29, 2020 / Revised: Jun. 22, 2020 / Accepted: Jun. 22, 2020

북한 황강댐 운영에 따른 임진강 수계 하천유지유량 검토

국문초록 본 연구는 북한 황강댐 운영으로 인한 임진강수계 기존댐 및 주요 수위관측소의 하천유지유량을 검토하고 하천유지유량 확보를 위한 방안을 제시하였다. 첫째, 임진강 수계의 일단위 관측자료를 이용한 물수지분석 결과, 하천유량, 유역 유입량 및 댐 유출량이 타당하게 추정되었다. 둘째, 황강댐 운영 후 임진강 수계의 주요 수위 관측소의 흐름이 크게 감소하는 것으로 나타나 황강댐 운영이 남한 임진강 수계의 유량유입에 영향을 미쳤음을 확인하였다. 셋째, 임진강 수계의 하천유지유량 충족여부 분석 결과 모든 수위 관측소에서 하천유지유량이 지속적으로 충족되지 않는 것으로 확인되었다. 마지막으로 황강댐 운영으로 인해 하천유지유량의 총부족량과 부족기간이 각각 + 14,156 % 및 16,800시간으로 증가했으므로, 황강댐 운영이 하천유지유량 부족의 주요 원인 중 하나로 분석되었다. 하천유지유량 확보를 위해 기존 댐 및 공유하천의 활용 계획을 제시하였다. 향후 중요성이 증가하는 하천유지유량을 확보하기 위해 다양한 장기적이고 계획된 방안들을 준비할 필요가 있다.

주제어 : 하천유지유량, 공유하천, 임진강수계, 황강댐

Profiles **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 a 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, creative problem solving methodology(myroom1@daejin.ac.kr).

Joon Won Jo : He is a Ph.D. course student in civil and environmental engineering at Daejin University. His interesting subject area of research are hydraulics, hydrology, drought and water resources management(yhjowon@naver.com).