J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 53, No. 1 (2020), pp. 71-82
doi: 10.3741/JKWRA.2020.53.1.71
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Evaluation of instream flow in Han river according to the Imnam dam operation in North Korea

Lee, Jae-Kyoung[a]* · Jang, Suk Hwan[b] · Ihm, Nam-Jae[c]

[a]Innovation Center for Engineering Education, Daejin University, Pocheon-si, Korea
[b]Professor, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon-si, Korea
[c]Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon-si, Korea

Paper number: 20-003
Received: 17 January 2020; Revised: 28 January 2020; Accepted: 28 January 2020

Abstract

The objective of this study is to evaluate the instream flow in the North Han River basin according to the operation of Imnam Dam in North Korea. The water budget and instream flow satisfaction were analyzed using hourly, daily and monthly data of Water Management Information System (WAMIS) from Jan. 1991 to Dec. 2018. As a analysis result of water budget using hourly data in the North Han River basin, although inflows compared with dam release in the upstream basin of Peace Dam-Hwacheon Dam and Chuncheon Dam-Soyanggang Dam-Uiam Dam were calculated as negative values, the reasonable results using daily and monthly average data were estimated. It showed that the results of water budget analysis of dam inflow and total release may be different by time units of data. The monthly average inflow of Hwacheon Dam decreased significantly after the construction in 2003 of Imnam Dam, which confirmed that the operation of Imnam Dam had a significant effect on the dams in the North Han River basin. The operation of Imnam Dam is one of the main reasons for the lack of instream flow and total shortage amounts and shortage period increased up to +330% due to the decrease in inflow and total release of dams in the North Han River water after the operation of Imnam Dam. It is necessary to study various plans to secure instream flow including transboundary river management

Keywords: Instream flow, Shared river, North Han River, Imnam Dam

북한 임남댐 운영에 따른 북한강 하천유지유량 평가

이재경[a]* · 장석환[b] · 임남재[c]

[a]대진대학교 공학교육혁신센터 조교수, [b]대진대학교 건설시스템공학과 교수, [c]대진대학교 건설시스템공학과 박사수료

요 지

본 연구에서는 공유하천인 북한강 유역을 대상으로 북한 임남댐 운영에 따라 북한강 댐들의 하천유지유량 확보여부에 대해 평가하였다. WAMIS 자료 기준 1991. 01~2018. 12 기간 동안의 시자료, 일자료, 월자료의 댐 유입·유출량 자료를 기준으로 분석을 수행하였다. 시평균 자료를 이용한 물수지분석 결과를 살펴보면, 평화의댐-화천댐과 춘천댐-소양강댐-의암댐의 댐 방류량 기준 상류유역 유입량이 (-)값으로 산정되었으나 일평균이나 월평균에서는 합리적으로 추정되어 자료의 시간단위에 따라 댐유입량·방류량 물수지분석 결과가 달라질 수 있음을 확인하였다. 두 번째로 임남댐 운영 후에 화천댐 월평균 유입량이 크게 감소하는 것으로 나타나 임남댐 운영이 북한강 수계 댐에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 마지막으로 임남댐 운영으로 인한 북한강 수계 댐들의 유입량과 총방류량의 감소에 따른 하천유지유량 총부족량과 부족시간의 증가비율이 최대 +330%로 증가하는 것으로 나타나 임남댐 운영이 하천유지유량 부족의 주요 원인 중 하나로 분석되었다. 따라서 향후 중요성이 커지는 하천유지유량을 확보하는 다양한 방안 마련에 대한 연구가 필요하다.

핵심용어: 하천유지유량, 공유하천, 북한강, 임남댐

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-539-2357
E-mail: myroom1@daejin.ac.kr (J.-K. Lee)

© 2020 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

한강 유역은 크게 남한강 · 북한강 · 임진강 유역으로 구성되어 있으며, 남한강 수계를 제외한 북한강 수계와 임진강 수계는 북한지역에서 발원하여 남과 북의 군사분계선을 통과하여 연결되어 있는 실질적인 공유하천이다. 특히, 정치적 불확실성과 더불어 지구온난화 등에 기인한 극심한 가뭄과 집중호우가 빈번히 발생하는 기후요소의 불확실성까지 증가하면서 효율적인 물관리의 중요성이 요구되고 있는 상황이다. 한반도는 동쪽이 산악지형인 동고서저의 지리적 형태가 한반도 허리부분을 동서로 횡단하고 있는 지리학적 특성이 존재하며, 이 역시 효율적인 수문관리를 어렵게 하는 원인 중 하나이다. 북한강 수계의 경우 북한지역에 임남댐이 운영되기 전에는 북한강 상류로부터 1년간 17억 톤의 물이 하류인 남한지역으로 유입되었으나, 임남댐 운영 이후 유입량이 감소하였을 뿐만 아니라 북한 측의 수공(water attack) 작전에 대응하기 위한 평화의댐이 건설됨으로써 남한지역에만 총 7개의 댐이 운영 중이다. 북한과 연계되어 있는 또다른 임진강 수계 또한 북한지역에 황강댐이 운영되면서 남한지역에 군남댐과 한탄강댐 등 홍수조절 목적의 댐이 건설되어 운영 중에 있다. 한강 유역과 연계되어 있는 북한의 댐운영은 한강 유역의 효율적인 수자원관리에 있어 중요한 요소 중 하나이다. 이러한 북한 댐 운영에 따른 남한의 영향에 대한 연구들을 살펴보면, Lee *et al*. (2008)은 남북 공유하천의 문제점을 진단해 보고 북한 수자원 측면에서 협력체계를 촉진시킬 수 있는 방안을 제시하였다. Ahn *et al*. (2011)은 북한강을 대상으로 북한 임남댐에 의한 영향을 수량 및 수질 측면에서 분석하고 수리권을 판단하기 위한 물 부족 상황을 해석하여 제시하였다. Ahn *et al*. (2011)은 북한강 유역의 임남댐 운영과 유역변경이 하류하천에 미치는 영향을 종합적으로 평가하여 남북공유하천의 특수한 상황과 수문지형학적 비대칭적 문제를 분석하였으며, Sah (2017)는 국가간 통합수자원관리에 관한 이론적 논의를 토대로 임진강과 북한강의 물분쟁을 검토하였다.

특히 공유하천인 북한강 유역의 효율적인 수자원 관리를 위해서는 댐 관리 및 운영체계와 연계분석이 절실히 필요하다. 최근 들어 생태계보전과 농업활동 등에 요구되는 수자원의 중요성이 강조되면서 각 하천별 하천유지용수 확보여부가 매우 중요한 사항으로 대두되고 있다. 하천유지유량에 대한 연구사례를 살펴보면, Jang *et al*. (2005)은 하천유지유량에 대한 정의를 확립하고 여러 나라에 대하여 산정방법에 따른 장 · 단점을 도출하여 도심하천에서 적용 가능한 하천유지유량 산정에 있어 고려되어야 할 필요항목을 도출하고 이에 대한 하천유지유량 산정기준을 제시하였다. Kang and Lee (2005)은 우리나라의 하천유지유량의 개념, 하천수 사용과의 관계 및 보다 효율적인 물이용과 관리를 위한 개선방향에 대한 연구를 수행하였다. Bae (2018)는 섬진강 댐 하류구간의 생태학적으로 건강한 하천유지를 위한 유량을 산정하기 위하여 PHABSIM 모형을 적용하여 하천유지유량을 산정하여 제안하였다. 위에서 살펴본 바와 같이, 기존 연구들에서는 공유하천에 따른 한강 유역의 수자원관리 측면과 특정 하천의 하천유지유량 산정에 대한 검토들을 수행하였으나, 우리나라에서 매우 중요한 북한강 수계에서 북한 댐운영에 따라 하천유지유량이 어떠한 영향을 받는지에 대한 검토가 매우 미비하였다.

따라서 본 연구에서는 공유하천인 북한강 유역을 대상으로 북한 임남댐 운영에 따라 북한강 댐들의 하천유지유량 확보여부에 대해 평가하고자 한다. 첫 번째로 북한강 수계에 위치한 댐들에 대해 간략히 물수지를 분석하고자 한다. 두 번째로 북한 임남댐 운영 전과 후에 따라 북한강 수계 댐들에 어떤 영향을 미치는지 파악하고자 한다. 마지막으로 임남댐 운영에 따라 북한강 수계 댐들의 하천유지유량 확보여부에 대해 평가하고자 한다.

2. 북한강 댐운영에 대한 기초분석

2.1 기초자료조사

2.1.1 북한강 하천현황

북한강은 물 이용측면에서 수자원 부존은 물론 하천의 지형적 특성상 여러 가지 장점을 가지고 있으며 청평, 의암, 춘천, 소양강 및 화천댐 등이 건설되어 있어 우리나라 강 중 수자원 이용이 가장 활발한 하천이다. Table 1과 같이 북한강은 임진강을 제외한 한강의 제1지류로 유역면적이 10,761.2 km^2, 유로연장은 291.3 km로 한강 전체 유역면적의 약 41.3%에 해당

Table 1. Description of the North Han River basin

Item	Description
River length	· 317.5 km (mean river width 400 m)
River basin area	· South Korea: 10,834.8 km^2 / North Korea: 3,901 km^2
Inflow	· 17×10^6 ton/year from North Korea before operating Imnam Dam
Basin characteristics	· Mean rainfall amounts: 1,170 mm · Major water source in the metropolitan area

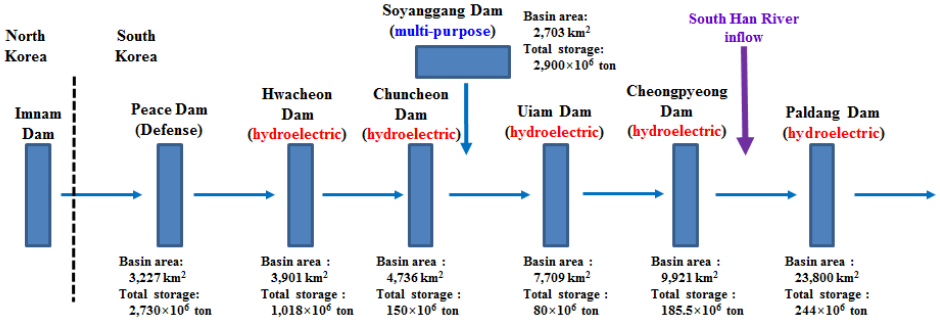
된다. 북한강은 비무장지대 이북에 위치하고 있는 단발령(EL. 1,241 m)에서 발원하여 양구서천, 금강천, 수입천, 소양강, 가평천 및 홍천강 등의 많은 대소 지천들과 합류 경기도 양평군 양서면 양수리 부근에서 남한강과 합류하여 서류하다 팔당호로 유입된다(KEI, 2010). 북한강은 산악지형으로 이루어져 협곡이 깊고 경사가 급해 천혜의 댐 입지조건을 갖추고 있고, 우리나라 대표적인 수력발전 댐군을 형성하고 있으므로 이를 통해 전력생산은 물론 수도권의 용수공급과 하류 홍수조절에 활용되고 있다. 북한강 수계에서 임남댐 건설과 동해안으로의 도수에 따른 유량감소에 의한 용수공급능력의 저하는 팔당댐 지점을 기점으로 95% 보장용수공급량이 215 m^3/s에서 192 m^3/s로 감소하여 연간 최대 12억 m^3이 감소하는 것으로 나타났다. 이로 인해 서울을 중심으로 한 수도권지역에서 2011년 기준으로 7.7억 m^3, 2020년에는 11.9억 m^3의 물 부족이 추가 발생하는 것으로 추정되고 있다(K-water, 2002).

2.1.2 사용 수문자료 개요

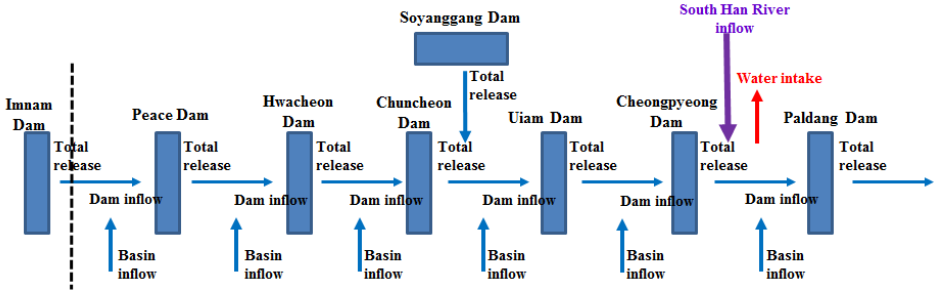
본 연구에서는 남북한 공유하천인 북한강 유역에 위치한 댐들에 초점을 맞추어 북한 임남댐을 시작으로 평화의댐, 화천댐, 춘천댐, 소양강댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐까지 살펴보았다. Fig. 1(a)는 북한강 수계에 위치한 각 댐의 목적과 기본제원(유역면적과 총저수량)을 나타낸 그림이며, 평화의댐이 북한 임남댐 유역을 포함하므로 총 저수용량이 26.3억 톤으로 가장 크고 유역면적은 하류로 갈수록 더 커짐을 알 수 있다. 댐 운영목적을 보면, 북한 수공의 방어목적인 평화의댐과 다목적댐인 소양강댐(한국수자원공사 관리)을 제외하고 나머지 댐들은 수력발전이 목적인 발전전용댐(한국수력원자력 관리)이다. Fig. 1(b)는 각 댐들의 유량흐름(유입량, 총방류량, 유역유입량, 취수량)에 대한 모식도를 나타낸 것으로 각 댐별 유량들의 관계를 파악하기 위한 목적으로 구성하였으며, 총방류량과 댐 유입량 개념을 다음과 같이 정의하였다.

- 해당댐 총방류량 = 해당댐 발전방류량 + 해당댐 여수로 방류량 + 해당댐 기타방류량
- 해당댐 유입량 = 상류댐 총방류량 + 상류유역 유입량 − 해당댐 취수량
- 상류유역 유입량 = 해당댐 유입량 − 상류댐 총방류량

기본적인 댐의 운영 현황을 파악하기 위해 본 연구에서는 Table 2와 같이 댐 운영 자료를 WAMIS(www.wamis.go.kr)에서 취득하였으며, 이 자료를 이용하여 북한강 유역에 위치한 댐들의 운영을 분석하였다. 가용한 댐 운영 자료의 시간적인 범위는 1992년 5월에서 2018년 12월(소양강댐)까지인데 댐들 간의 비교를 위해 검토 대상의 모든 댐 운영 자료가 가용한



(a) Purpose at each dam



(b) Inflow and release at each dam

Fig.1. Purpose & specifiation and inflow & release at each dam in the North Han River basin

Table 2. Description of dam data in the North Han River basin

Item	Peace Dam	Hwacheon Dam	Chuncheon Dam	Uiam Dam	Soyanggang Dam	Choengpyeong Dam	Paldang Dam
Data length	2004.01 ~2018.12	1998.05 ~2018.12	1998.05 ~2018.12	1998.05 ~2018.12	1992.05 ~2018.12	1998.05 ~2018.12	1998.05 ~2018.12
Unit	Hourly, daily average, monthly average						
Used data	Inflow, total release (hydroelectric, spilway, etc), intake, instream flow						

Table 3. Notification of instream flow in the Han River basin

Basin	Station	River grade	Instream flow (m^3/s)	Classification criteria
Han River	Chungju-si	National	23.10	Mean droughty flow
	Yeoju-si	National	30.00	Mean droughty flow
	Yangpyeong	National	32.50	Mean droughty flow
	Paldang Dam	National	61.20	Mean droughty flow
	Jamsil submersible beam	National	62.20	Mean droughty flow
	Hangang bridge	National	63.50	Mean droughty flow
North Han River	Hwacheon Dam	National	4.64	Ecology
	Chuncheon Dam	National	5.20	Water quality
	Uiam Dam	National	19.13	Water quality
	Cheongpyeong Dam	National	9.58	Water quality
Soyanggang Dam	Naerin stream	National	7.17	Ecology
	Soyanggang Dam	National	10.53	Ecology

구간을 선택하였다. 댐 운영 현황은 시평균(hourly average), 일평균(daily average), 월평균(monthly average) 자료로 구분하여 분석하였다. 본 연구에서 검토한 댐 운영 자료는 유입량, 총방류량(발전방류량, 여수로방류량, 기타방류량), 취수량, 하천유지유량 등이다. 주요 지점별 하천유지유량은 Table 3의 자료를 이용하였다.

2.2 북한강 수계 댐들의 물수지 검토

'상류댐에서의 총방류량' · '해당댐에서의 유입량' · '상류유역에서의 유입량'간의 관계를 중심으로 살펴보았으며, 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)의 시평균 자료를 이용한 댐운영 분석을 살펴보면, 평화의댐의 경우 댐유입량은 평균 66 m^3/s, 총방류량은 평균 63 m^3/s, 취수량은 0, 하류댐인 화천댐 유입량은 평균 60.2 m^3/s이다. 여기에 상류유역 유입량을 산정하기 위해서는 하류댐인 화천댐의 유입량에서 상류댐인 평화의댐 총방류량을 빼서 산정해야 하나 평화의댐 총방류량이 더 크기 때문에 상류유역 유입량은 (−)의 값으로 산정된다. 이는 증발산량, 지하수유입 등의 다양한 수문학적 환경을 감안하더라도 댐 상류유역에서는 하천으로의 유출량이 반드시 발생할 것이며, 하천유출량은 댐으로 유입될 것이기 때문에 평화의댐과 화천댐 사이 유역에서 유역유출량이 전혀 발생하지 않을 가능성은 거의 없다고 판단할 수 있다.

반면에 화천댐과 춘천댐의 댐 운영을 살펴보면, 화천댐 총방류량이 51.1 m^3/s, 취수량은 0이고 춘천댐 유입량은 122.3 m^3/s이므로 상류유역 유입량은 61.2 m^3/s으로 추정이 가능하다. 춘천댐-소양강댐-의암댐에 대한 분석에서도 상류댐인 소양강댐과 춘천댐의 총방류량은 376.7 m^3/s로서 하류댐인 의암댐의 유입량 179.4 m^3/s보다 커서 상류유역 유입량이 (−)값으로 산정되었다. 춘천댐-소양강댐-의암댐 유역도 평화의댐-화천댐 유역처럼 방류량과 유입량의 물수지가 맞지 않아 관측된 댐자료의 정확성에 대한 재검토가 필요한 것으로 나타났다.

하지만 이러한 현상은 시간단위별 자료 사용에 따라 다른 결과가 나타났다. 화천댐 유역의 유역유입량은 시평균, 일평균, 월평균 자료를 사용하는 경우에 동일하게 유역유입량 산정이 (−)값으로 산정되었으나 춘천댐 · 소양강댐 · 의암댐의 상류유역 유입량에서 일평균과 월평균 자료를 이용한 결과가 시평균 자료를 이용한 경우와 다르게 산정되었다(Fig. 2(b)와 (c)). 춘천댐-소양강댐-의암댐 유역에서는 소양강댐의 총방류량이 시평균 값에서 일평균 값(월평균 값)으로 환산되면서 총방류량값이 시평균자료보다 상대적으로 작아져서 상류댐

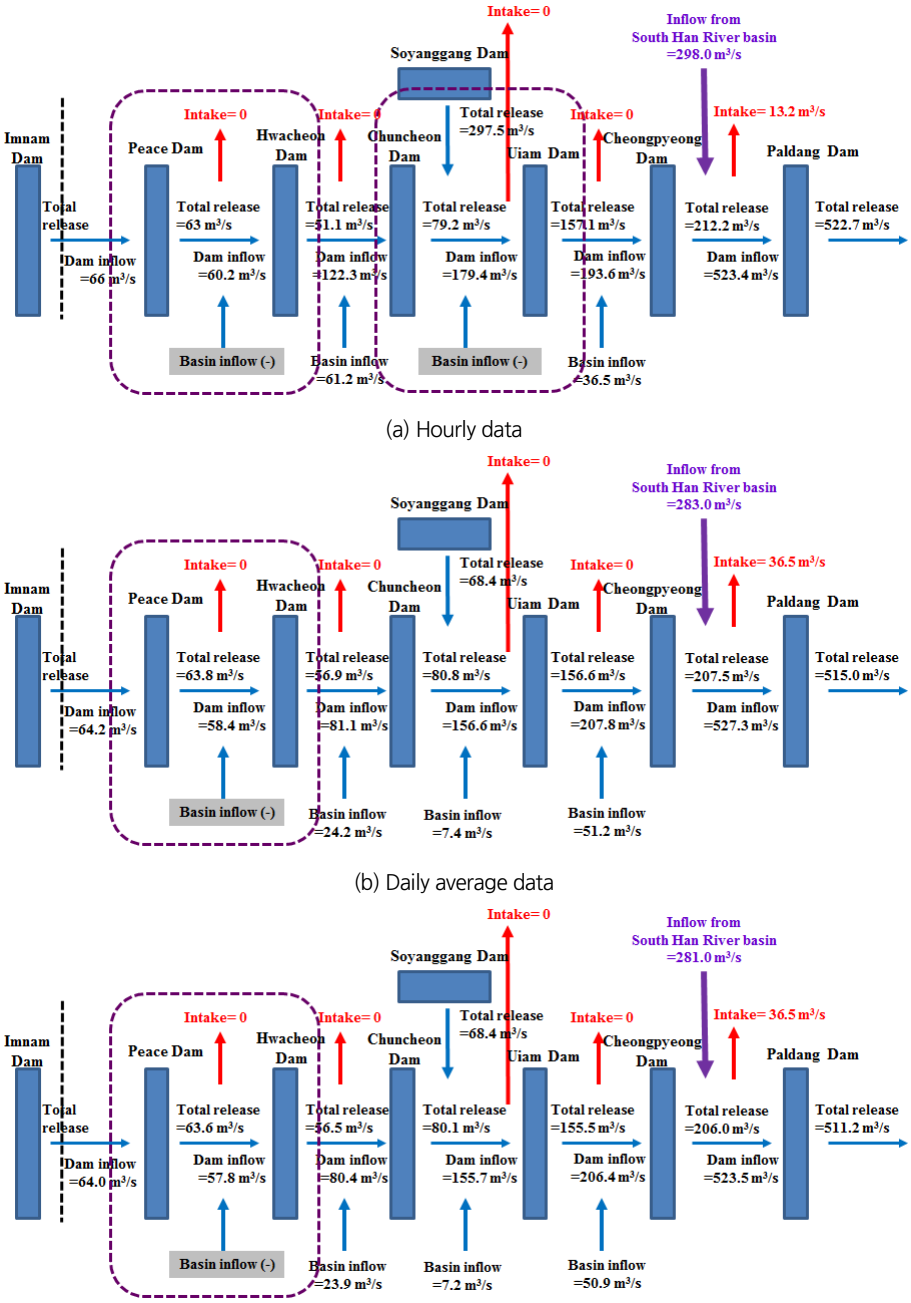


Fig. 2. Examination of dam operations using hourly, daily average, monthly average data

인 소양강댐과 춘천댐의 총방류량 합은 149.2 m^3/s(148.5 m^3/s)로서 하류댐인 의암댐의 유입량 156.6 m^3/s(155.7 m^3/s)보다 작아 상류유역 유입량은 7.4 m^3/s(7.2 m^3/s)로 추정되었다.

이러한 결과는 시평균자료와 일평균자료의 사용에 따라 댐유입량과 방류량 물수지분석 결과가 달라질 수 있음을 의미하는 중요한 결과라 할 수 있다. 따라서 관측자료의 정확성에 대해 의구심을 가질 수밖에 없으며, 관측된 자료의 원자료부터 품질관리 과정까지 면밀한 검토가 필요하다고 판단하였다. 실제로 평화의댐 자료품질관리 측면에서 K-water에서 2017년부터 체계적인 품질관리가 시작되었기 때문에 2017년 자료부터 보다 신뢰성 있는 자료라 할 수 있다. 또한 평화의댐은 화천댐 저수구역 내에 위치하고 있어, 화천댐 수위변화

에 직접적인 영향을 받는 상황(배수위)이며, 2018년까지 2단계 증축공사와 치수능력 증대사업이 진행됨에 따라 불가피하게 정확한 관측이 어려운 한계점이 존재한다. 이에 본 연구에서는 K-water에서 대외적으로 제공되는 자료에 국한하여 분석한 결과이므로, 추후 이 부분에 대해서는 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

3. 북한 임남댐 운영에 따른 북한강 하천유지유량 검토

3.1 임남댐 운영에 따른 북한강 댐 영향 검토

우선 본 연구에서는 '북한 임남댐 운영에 의한 임남댐 방류량의 변화에 따라 남한 북한강에 위치한 댐들에 어떤 영향을 줄 것인가?'를 기준으로 검토하였다. 이와 관련하여 북한 임남댐의 영향을 받을 수 있는 평화의댐을 우선 고려할 수 있으나, 평화의댐은 치수목적으로 건설된 특수한 목적이 있는 댐으로 평상시 운영에서는 유입량 100%를 그대로 방류하는 운영을 하고 있다. 이에 평화의댐 방류량이 화천댐 유입량에 매우 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 즉, 임남댐의 건설에 따른 남한 북한강 공유하천에 위치한 댐의 영향을 분석하기 위해서는 화천댐 유입량의 변화를 분석함으로서 판단할 수 있으므로 화천댐의 운영변화를 중심으로 검토하였다.

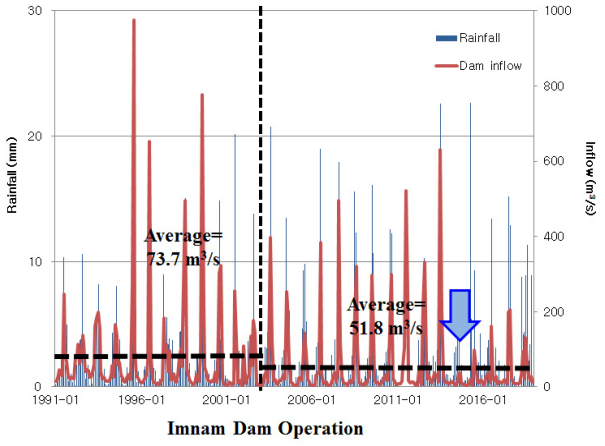


Fig. 3. Comparison of monthly average inflow and rainfall of the Hwacheon Dam according to the operation of Imnam Dam

임남댐 운영에 따른 평화의댐과 화천댐 영향분석을 위해 임남댐(2003년 6월~2018년 12월), 평화의댐(2004년 1월~2018년 12월), 화천댐(1991년 1월~2018년 12월)의 월평균 유입량, 방류량, 강수량 자료를 활용하였다. 임남댐과 평화의댐 사이에는 오작교 수위관측소가 존재하나 유량환산값이 존재하지 않고 수위변화를 하류의 유량변화와 직접적으로 비교하기에는 어려움이 있다고 판단되어 평화의댐 유입량을 임남댐의 방류량으로 가정하여 검토하였으며, 그 결과는 Table 4와 Fig. 3과 같다. Table 4는 전체기간과 임남댐 운영 전후(2003년)를 기준으로 하여 전체기간(홍수기+갈수기)와 갈수기의 화천댐 유역의 월평균 면적평균강수량과 월평균유량을 비교한 표이며, Fig. 3은 전체기간에 대한 월평균 면적평균강수량과 월평균유량 시계열을 나타낸 그래프이다. 결과를 살펴보면, 전체기간에서의 면적평균강수량은 96.0 mm, 유입량과 방류량은 각각 62.0 m^3/s과 61.1 m^3/s로 관측되었다. 특히 임남댐 운영 전후를 기준으로 홍수기와 갈수기를 합한 전체기간의 경우에는 면적평균강수량은 93.0 mm와 99.0 mm로 조금 증가하였으나 화천댐의 월평균 유입량은 73.7 m^3/s에서 51.8 m^3/s로 29.7%로 매우 크게 감소하였으며, 유입량의 감소에 따라 총방류량도 74.9 m^3/s에서 49.0 m^3/s(34.6% 감소)로 크게 감소하였다. 또한 갈수기에는 임남댐 운영 이후 면적평균강수량은 증가하였으나(36.0 mm에서 48.00 mm), 화천댐의 유입량(총방류량)은 28.9 m^3/s(38.8 m^3/s)에서 15.7 m^3/s(25.3 m^3/s)로 45.7%(34.8%)나 감소하였다. 즉, 북한 임남댐 운영 이전과 이후를 기준으로 강수량의 변화는 작으나 남한 화천댐의 유입량과 총방류량이 매우 크게 감소하였다는 것은 북한으로부터 남한 북한강 유역으로 유입되는 유량이 크게 감소하였다는 것을 의미하며, 북한 임남댐의 운영이 주된 원인으로 지적할 수 있다. 비슷한 결과로 KEI (2010)에서도 임남댐 운영 이후 화천댐의 수력발전량이 30% 이상 감소하였다는 결과를 제시한 바 있다.

Table 4. Comparison of monthly average inflow and rainfall for the Hwacheon Dam accordiing to operation of the Imnam Dam

Seperation (operation of the Imnam Dam)	Total period			Dry season		
	Inflow (m^3/s)	Total release (m^3/s)	Rainfall (mm)	Inflow (m^3/s)	Total release (m^3/s)	Rainfall (mm)
Before (~2003)	73.7	74.9	93.0	28.9	38.8	36.0
After (2004~)	51.8⇩	49.0⇩	99.0	15.7⇩	25.3⇩	48.0
Total period (1991~2018)	62.0	61.1	96.0	21.8	31.6	42.0

3.2 북한강 수계 댐운영에 따른 하천유지유량 검토

앞서 언급한 바와 같이 고시된 하천유지유량을 만족시키기 위해서는 댐에서 방류하는 유량이 최소한 하천유지유량 이상 지속적으로 유지되어야 한다. 앞으로 하천유지유량을 환경유량 개념으로 확장시켜 나가기 위해서는 현재의 하천유지유량보다 더 많은 유량을 필요로 할 것이며, 정해진 기준 유량을 만족시키지 못하는 경우 하천 환경에 미치는 영향도 지금보다 더욱 중대하게 다루어질 것이다. 이에 본 연구에서는 '현재 댐의 운영 방식이 하천유지유량을 적절하게 만족시키고 있는가?'를 기준으로 하여 북한강 수계에 위치한 각 댐 운영과 댐 간 연계운영이 하천유지유량을 잘 만족하도록 운영되고 있는지 혹은 유입량의 부족, 특정한 목적을 위한 댐 운영, 보수적인 댐 방류 등의 원인으로 하천유지유량을 만족하지 못하는지에 대하여 검토하였다.

Table 5는 북한강 수계 각 댐지점별 하천유지유량을 나타내고 있다. 화천댐 하류의 하천유지유량은 4.64 m^3/s, 춘천댐 하류의 하천유지유량은 5.20 m^3/s이며, 최하류에 위치한 팔당댐 하류의 하천유지유량은 61.20 m^3/s으로 하류로 내려갈수록 취수량과 하천의 규모 등을 고려하여 하천유지유량이 증가함을 알 수 있다. 이 중 평화의댐은 특수목적댐으로 별도로 하천유지유량이 고시되지 않아 화천댐 유역과 평화의댐 유역의 면적비를 이용하여 평화의댐 하천유지유량을 1.12 m^3/s로 산정하여 검토하였다.

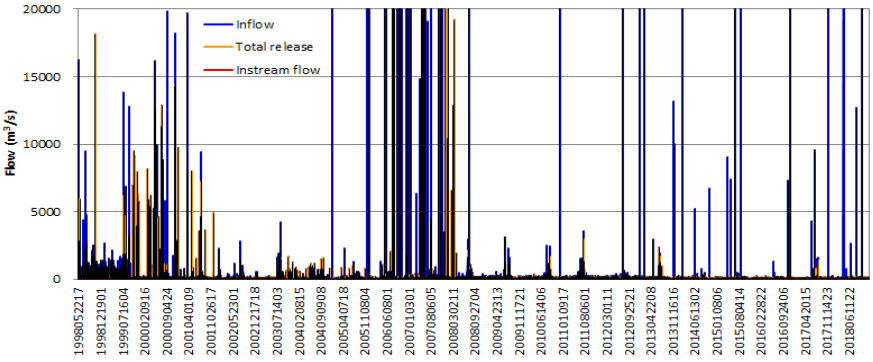
평화의댐부터 팔당댐까지 각 댐의 시평균 · 일평균 · 월평균 유입량과 총방류량 그리고 각 댐의 하천유지유량을 비교하였다. 특히, 댐의 총방류량이 댐 하류부의 하천유지유량을 상시적으로 만족하는지에 초점을 맞추어 분석하였다. 예시로 Fig. 4의 화천댐에 대해서 시평균 유입량, 총방류량, 하천유지유량 부족량 등에 대해 살펴보면, Fig. 4(a)에서 화천댐의 시평균 유입량과 총방류량의 증감이 비슷한 경향을 나타내고 있다. Fig. 4(b)에서는 시평균 자료에서 거의 모든 시간 동안 화천댐 하천유지유량인 4.64 m^3/s를 만족하지 못하고 있으며, Fig. 4(c)의 일평균 자료(하천유지유량과 저수량)에서도 2000년과 2001년을 제외하고 대부분의 연도에서 많은 일수동안 하천유지유량을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 특히, 화천댐의 수위가 매우 낮아지는 2011년 12월과 2013년 12월에는 하천유지유량을 만족하지 못하는 일수가 집중되어 나타났다. Fig. 4(d)의 월평균 자료(하천유지유량과 댐유입량)를 사용한 경우에는 드물게 만족하지 못하는 월들이 있으나 이는 월평균 환산에 의한 영향으로 판단된다. 월단위에서까지 하천유지유량을 만족하지 못하였다는 것은 발전방류도 할 수 없을 만큼 저수량의 여유가 없다는 것을 의미한다. 따라서 시평균과 일평균자료 분석결과를 기준으로 하천유지유량을 만족하지 못하는 댐 운영을 파악할 수 있었다면 월평균자료 분석결과에서는 댐에서 저수량이 매우 부족했던 기간을 간접적으로 파악할 수 있었다.

이러한 결과는 화천댐뿐만 아니라 북한강 수계에 위치한 대부분의 댐에서 시평균 · 일평균 · 월평균 자료에서 하천유지유량을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 일평균과 월평균 자료에서는 일단위와 월단위로 환산이 되면서 하천유지유량이 부족한 기간이 상당히 줄어드는 것처럼 보이나 이것은 시간단위간 환산 과정의 영향에 의한 것이므로 정확한 하천유지유량 분석을 위해서는 시간 단위의 방류량을 이용한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 특히 하천유지유량 만족여부를 세부적으로 평가할 수 있는 시평균 자료를 이용한 분석결과, 대부분의 댐에서 하천유지유량을 지속적으로 만족시키지 못하는 것으로 나타나 댐 하류지점의 하천유지유량 충족도가 매우 낮은 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 발전용댐은 수력발전에 초점을 맞추어 운영되고 다목적댐은 용수공급과 수력발전을 위해 운영되고 있으므로 시간단위 기준으로 하천유지유량을 충족시키지 못하는 것으로 판단된다. 이와 같이 하천유지유량을 충족시키지 못하는 상태가 오래 지속되면 수환경과 생태계에 악영향을 줄 가능성이 높아지게 된다.

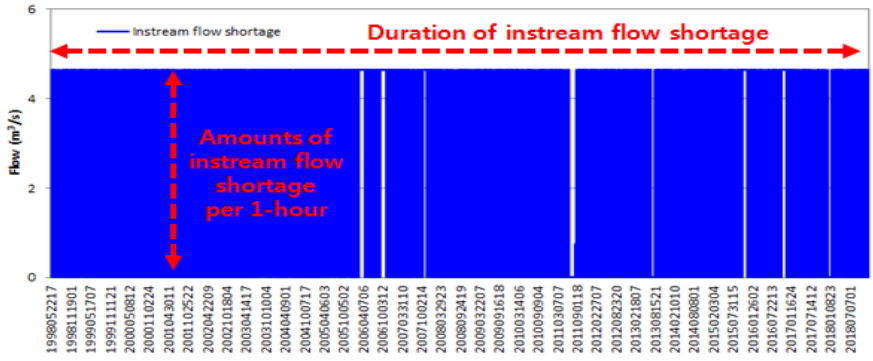
Table 6은 시평균 자료를 이용하여 분석한 북한강 수계의 댐들에 대한 하천유지유량 총부족량, 부족시간, 평균부족량을 정리한 표이다. 결과를 살펴보면, 하천유지유량 총부족량이 가장 큰 댐은 의암댐으로 1,471,100 m^3이며, 총부족시간은 77,921시간이었다. 그 다음으로 소양강댐이 총부족량 1,192,700 m^3에 총부족시간 119,076시간, 청평댐이 총부족량 755,400 m^3에 총부족시간 79,670시간 순으로 산정되었다.

Table 5. Instream flow at each Dam site in the North Han River basin

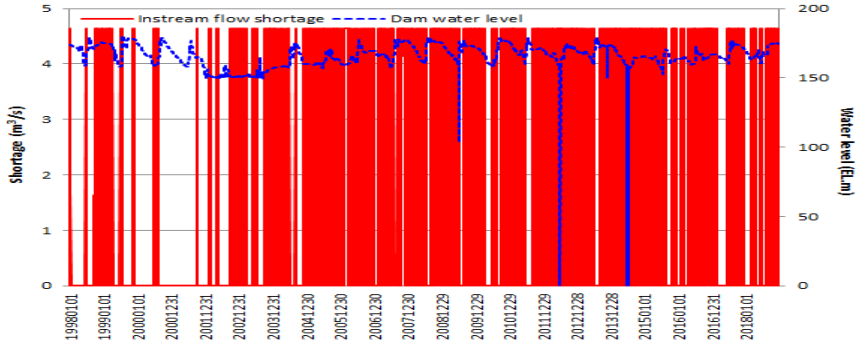
Item	Peace Dam	Hwachoen Dam	Chuncheon Dam	Uiam Dam	Soyangngag Dam	Choengpyoeng Dam	Paldang Dam
Instream flow (m^3/s)	1.12	4.64	5.20	19.13	10.53	9.58	61.20
Criteria	-	Ecology	Water Quality	Water Quality	Ecology	Water Quality	Mean droughty flow



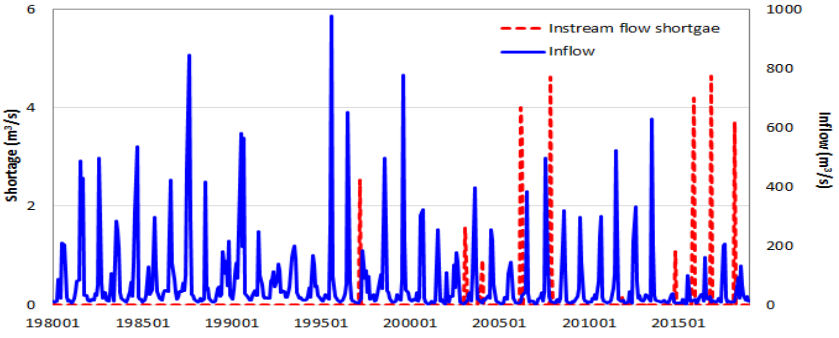
(a) Comparison of time series of inflow, total release, and instream flow using hourly data



(b) Time series of instream flow stortage using hourly data



(c) Time series of dam storage water level and instream flow using daily average data



(d) Time series of inflow and instream flow stortage using monthly average data

Fig. 4. Comparison of time series of instream flow storage using hourly, daily average, and monthly average data in the Hwacheon Dam

Table 6. Shortage amounts of instream flow at each dam in the North Han River basin

Item	Peace Dam	Hwachoen Dam	Chuncheon Dam	Uiam Dam	Soyangngag Dam	Choengpyoeng Dam	Paldang Dam
Instream flow (m^3/s)	1.1	4.6	5.2	19.1	10.5	9.6	61.2
Total stortage amounts of instream flow (m^3/s)	−38,981.0	−581,440.6	−578,909.4	−1,471,113.2	−1,192,871.5	−755,495.8	−235,487.7
Total period of instream flow shortage (hr)	−33,050.0	−125,733.0	−111,676.0	−77,921.0	−119,076.0	−79,670.0	−4,455.0
Average shortage amounts of instream flow (m^3/s)	−1.2	−4.6	−5.2	−18.9	−10.0	−9.5	−52.9
Annual total shortage amounts of instream flow (ton)	37.2 $\times 10^6$	145.8 $\times 10^6$	163.5 $\times 10^6$	595.4 $\times 10^6$	315.9 $\times 10^6$	299.0 $\times 10^6$	1,667.0 $\times 10^6$

최상류에 위치한 평화의댐에서 최하류에 위치한 팔당댐으로 내려갈수록 하천유지유량 총부족시간은 감소하는 경향을 보이나 하천유지유량 값 자체가 크기 때문에 총부족량은 상류쪽 댐들보다 하류쪽 댐들에서 더 크게 산정되었다. 즉, 하천유지유량은 유역 하류로 내려갈수록 부족시간은 줄어드나 부족량은 증가하는 것으로 분석되었다. 각 댐별로 연간 단위로 하천유지유량 부족량을 산정한 결과, 평화의댐은 37.2백만 톤, 화천댐은 145.8백만 톤, 춘천댐은 163.5백만 톤, 의암댐은 595.4백만 톤, 소양강댐은 315.9백만 톤, 청평댐은 299백만 톤, 팔당댐은 1,667백만 톤으로 산정되었다. 이중 팔당댐이 1,667백만 톤으로 가장 많이 부족한 것으로 나타났으며, 다음으로 의암댐 595.4백만 톤, 소양강댐 315.9백만 톤 등의 순으로 산정되었다. 댐별 연간 하천유지유량 부족량은 하천유지유량 평균부족량과도 비례하는 것으로 나타났다.

3.3 북한 임남댐 운영에 따른 북한강 수계 하천유지유량 검토

다음으로 본 연구에서는 북한 임남댐 운영이 북한강 수계에 위치한 댐들의 운영과 하천유지유량 충족에 영향을 주었는지를 검토하였다. 분석방법은 임남댐 운영이 시작된 2003년을 기준으로 하여 운영 전과 운영 후로 구분하여 유입량·총방류량·발전방류량·여수로방류량과 하천유지유량 부족량 및 부족시간을 산정하여 비교하였으며, 그 결과는 Table 7(화천댐, 춘천댐, 팔당댐만 제시)과 같다.

Table 7에서 북한 임남댐의 운영 전과 후에 대한 각 댐의 유입량 변화를 비교해보면, 화천댐은 −40%, 춘천댐 +20%, 의암댐 −30%, 청평댐 −40%, 팔당댐 −20%로 춘천댐을 제외하고 최대 −40%까지 큰 폭으로 감소하였다. 춘천댐의 증가는 2003년 이후 춘천댐 유역의 강수량이 다소 증가한 영향으로 판단된다.

임남댐의 운영으로 각 댐의 유입량이 감소함에 따라 댐의 총방류량도 비슷한 비율로 감소하였으며, 각 댐별로 차이는 있지만 이에 맞추어 북한강 수계 댐들은 발전방류 또는 여수로방류를 감소시킴으로서 총방류량을 감소시켜 운영하였다. 화천댐의 경우 총방류량 감소와 발전방류의 감소 간에 상관성이 높게 나타났다. 춘천댐과 의암댐의 경우 발전방류와 여수로방류 모두 감소하였으나 여수로방류의 감소가 총방류량 감소와 상관성이 더 높은 것으로 나타나 총방류량 감소의 주원인은 여수로방류의 감소로 분석되었다. 청평댐은 여수로방류량의 감소 영향이 더 컸으며, 팔당댐은 발전방류량의 감소 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

임남댐 운영으로 인한 댐의 유입량과 총방류량의 감소에 따른 하천유지유량 총부족량과 부족시간의 증가비율을 살펴보면, 화천댐은 각각 +330%와 +330%, 춘천댐은 각각 +280%와 +280%, 의암댐은 각각 +300%와 +310%, 청평댐은 각각 +330%와 +330%, 팔당댐은 각각 −20%와 +110%로 나타났다. 임남댐 운영 이후 하류인 남한 북한강 수계에 위치한 댐들 중 하천유지유량 총부족량과 부족시간이 최대 330%까지 증가하는 것으로 나타나 북한 임남댐의 운영으로 인한 영향이 매우 큰 것으로 분석되었으며, 지속적으로 반복될 것이라는 점에서 문제의 심각성이 더 크다고 판단된다. 이상에서 분석한 바와 같이, 현재의 댐 운영 방식으로는 하천유지유량을 효과적으로 충족시키지 못하고 있으며, 특히 북한 임남댐 운영이 북한강 수계에 위치한 댐들의 운영과 하천유지유량 충족도에 큰 영향을 주고 있으므로 이를 해결할 수 있는 개선방안의 마련이 시급하다.

3.4 하천유지유량 부족 해소방안 검토

앞서 검토한 바와 같이, 북한강 수계에 위치한 댐들의 현재 운영안으로는 하천유지유량을 지속적으로 만족시키지 못하

Table 7. Shortage amounts of instream flow at each dam in the North Han River basin according to operation of the Imnam Dam in North Korea

Item	Hwacheon Dam				Chuncheon Dam			
	Total	Before Imnam Dam	After Imnam Dam	Change ratio (%)	Total	Before Imnam Dam	After Imnam Dam	Change ratio (%)
inflow (m^3/s)	60.2	86.2	50.5	−40	122.3	109.4	127.3	+20
Total release(m^3/s)	51.1	73.8	42.6	−40	79.2	101.7	70.5	−30
Hydroeletronic (m^3/s)	44.3	52.5	42.0	−20	54.5	57.3	54.2	−10
Spilway (m^3/s)	8.8	8.4	8.9	+10	17.8	34.0	16.3	−50
Intake (m^3/s)	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	-
Instream flow (m^3/s)	4.6	4.6	4.6	-	5.2	5.2	5.2	-
Total stortage amounts of instream flow (m^3/s)	581,440.6	135,140.4	446,300.2	+330	578,909.4	153,392.8	425,516.6	+280
Total period of instream flow shortage (hr)	125,733.0	29,160.0	96,573.0	+330	111,676.0	29,519.0	82,157.0	+280
Average shortage amounts of instream flow (m^3/s)	4.6	4.6	4.6	-	5.2	5.2	5.2	-

Item	Paldang Dam			
	Total	Before Imnam Dam	After Imnam Dam	Change ratio (%)
inflow (m^3/s)	523.4	607.6	491.7	−20
Total release(m^3/s)	522.7	591.7	496.7	−20
Hydroeletronic (m^3/s)	284.6	302.9	279.4	−10
Spilway (m^3/s)	197.7	195.4	198.4	+1.5
Intake (m^3/s)	0.0	0.0	0.0	-
Instream flow (m^3/s)	13.2	0.0	18.2	-
Total stortage amounts of instream flow (m^3/s)	61.2	61.2	61.2	-
Total period of instream flow shortage (hr)	23,5487.7	130,980.4	104,507.3	−20
Average shortage amounts of instream flow (m^3/s)	4,455.0	2,157.0	2,298.0	+110

고 있으며 이를 해소할 수 있는 방안들을 검토하여야 한다. 해소방안에 대한 연구는 본 연구범위를 벗어난 것이므로 자세히 다룰 수는 없으나 간략하게 몇 가지 방안을 검토하면 다음과 같다.

3.4.1 기존 댐 활용방안

물 문제를 해소하기 위한 방안으로 우선 북한강 유역 내 기존 댐을 활용할 수 있는 방안을 고려할 수 있다. 실현가능성이 희박하나 우선 평화의댐과 화천댐의 연계 운영을 통하여 하천유지유량 부족량을 만족시키는 방안을 검토할 수 있다. 현재 평화의댐에는 담수를 위한 수문(gate)이 설치되어 있지 않으므로 이를 설치가능하다는 전제조건이 필요하며, 장기적 관점에서 기존 댐을 변경하는 계획하에 진행하여야 한다. 다음으로 남한강 수계에 위치한 기존 댐을 활용할 수 있으며, 이 중 충주댐이 가장 저수능력이 크므로 충주댐의 저수위를 상승시켜 충분한 저수용량을 확보함으로서 하천유지유량 부족량을 충족하는 방안을 검토할 수 있을 것이다.

3.4.2 공유하천 활용방안

다음으로 북한강 수계의 하천유지유량 부족량을 확보하기

위해 북측댐을 연계한 공유하천 활용방안을 고려할 수 있다. 북한에서는 임남댐에서 하천유지유량 부족량만큼을 방류해 주고 남한에서는 이에 대해 상응하는 보상대책을 마련하는 것이다 이에 대한 보상대책으로는 최근 많이 적용되는 정책이 생태계서비스기반 정책이며, 이 중 PES(Payments for Ecosystem Services)로서 생태계서비스 수혜자 또는 이용자가 생태계 공급자 또는 지킴이에게 제공하는 서비스로 정의된다. 따라서 남한이 수혜자(이용자)이므로 공급자인 북한에게 부족량만큼을 확보하기 위해서는 이에 상응하는 서비스를 제공해야 하는 것이다. 이러한 보상은 직접적인 방안도 있으나 남한과 북한의 공유하천을 연계한 협력사업이나 북한의 기반시설을 마련해주는 협력사업 등으로 이루어지는 것이 더 합리적으로 판단되며, 이에 대한 다양한 논의와 국민적 동의를 얻어야 할 것이다.

3.4.3 한계점 및 제약조건

본 연구에서는 팔당댐의 하천유지유량 총 부족량인 1,667백만 톤을 기준으로 댐들이 이 부족량을 일시에 충족해야 하는 것으로 우선 고려하였다. 각 댐별 담수 계획 수위는 강수전망 · 유입량 · 용수공급능력 · 발전방류 등의 계획을 검토하여 수위를 산정하게 된다. 즉, 본 연구에서 검토한 사항처럼 일시에 담수하는 것보다 댐별 운영계획에 따라 댐별로 하천유지유량 부족량만큼 방류하는 것이 더 현실적인 대안일 수 있다.

하지만 이러한 방안은 댐별 운영율 등을 전부 고려해야 하므로 본 연구의 범위를 벗어나게 된다. 따라서 본 연구에서는 하천유지유량 부족량을 제시하는 것에 조금 더 초점을 맞추고 이에 따라 각 댐별로 어떻게 운영하여 하천유지유량 부족량을 충족할지는 향후 과제에서 진행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 공유하천인 북한강 유역을 대상으로 북한 임남댐 운영에 따라 북한강 댐들의 하천유지유량 확보여부에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 18년 기간(1991~2018)의 WAMIS 자료를 활용하여 현재 북한강 수계에 위치한 댐운영 자료를 기반으로 물수지를 검토하였다.

1) 시평균 자료를 이용한 댐운영 분석을 살펴보면, 댐 방류량 기준으로 평화의댐-화천댐과 춘천댐-소양강댐-의암댐의 상류유역 유입량이 (−)값으로 산정되었다. 그러나 춘천댐-소양강댐-의암댐의 상류유역 유입량이 일평균과 월평균 자료를 이용한 결과는 시평균 자료를 이용한 경우와 다르게 산정되었다. 이러한 결과는 시평균자료와 일평균자료의 사용에 따라 댐유입량과 방류량 물수지분석 결과가 달라질 수 있음을 의미하는 중요한 결과라 할 수 있으며, 추후 이 부분에 대해서는 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.
2) 북한 임남댐 운영 전과 후에 따라 북한강 수계 댐들에 대한 영향 분석 결과, 임남댐 운영 전후를 기준으로 전체기간의 경우에는 면적평균강수량은 조금 증가하였으나 화천댐의 월평균 유입량은 −29.7%로 매우 크게 감소하였으며, 유입량의 감소에 따라 총방류량도 −34.6%로 크게 감소하였다. 또한 갈수기에는 임남댐 운영 이후 면적평균강수량은 증가하였으나 화천댐의 유입량과 총방류량은 각각 −45.7%와 −34.8%나 감소하였다. 북한 임남댐 운영 이전과 이후를 기준으로 강수량의 변화는 작으나 남한 화천댐의 유입량과 총방류량이 매우 크게 감소하였다는 것은 북한으로부터 남한 북한강 유역으로 유입되는 유량이 크게 감소하였다는 것을 의미하며, 북한 임남댐의 운영이 주된 원인으로 지적할 수 있다.
3) 북한강 수계 댐운영에 따른 하천유지유량 검토 결과, 시평균 자료를 이용한 분석하면, 대부분의 댐에서 하천유지유량을 지속적으로 만족시키지 못하는 것으로 나타나 댐 하류지점의 하천유지유량 충족도가 매우 낮은 것으로 분석되었다. 주요 원인은 발전용댐은 수력발전에 초점을 맞추어 운영되고 다목적댐은 용수공급과 수력발전을 위해 운영되고 있기 때문으로 판단된다.
4) 임남댐 운영으로 인한 북한강 수계 댐들의 유입량과 총방류량의 감소에 따른 하천유지유량 총부족량과 부족시간의 증가비율을 살펴보면, 화천댐은 각각 +330%와 +330%, 춘천댐은 각각 +280%와 +280%, 의암댐은 각각 +300%와 +310%, 청평댐은 각각 +330%와 +330%, 팔당댐은 각각 −20%와 +110%로 나타나 북한 임남댐의 운영으로 인한 영향이 매우 큰 것으로 분석되었으며, 지속적으로 반복될 것이라는 점에서 문제의 심각성이 더 크다고 판단된다.

이와 같이 하천유지유량을 충족시키지 못하는 상태가 본 연구의 분석결과와 같이 지속되면 수환경과 생태계에 악영향을 주게되며, 이는 결국 수자원 확보가 시급한 우리나라의 물부족문제로까지 연결될 수 있다. 따라서 앞서 검토한 바와 같이, 북한강 수계에 위치한 댐들의 현재 운영안으로는 하천유지유량을 지속적으로 만족시키지 못하고 있으므로 기존 댐들

의 활용이나 북한 공유하천 활용 등 이를 해소할 수 있는 방안들을 적극 검토해야 할 것이며, 이에 대한 연구도 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

References

Ahn, J., Jung, K., and Lee, G. (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 Imnam Dam." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 4, pp. 305-314.

Bae, J.A. (2018). *Estimation of Instream Flow for the protection of Acheilognathus somjinensis's habitat in the Downstream of the Dam, Seomjin River : Using by PHABSIM Model*. Masters dissertation, Jeonnam Univeristy, Gwangju, Korea.

Jang, C.H., Kim, H.J., Noh, S.J., and Kim, C.G. (2005). "The water cycle analysis of Kyeongancheon-watershed by using GSSHA." *Proceeding of Korea Water Resources Association*, pp. 75-79.

Kang, B.S., and Lee, G.M. (2005). "Holistic hierarchical approach to integrated water resources management in th Tumen international river." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 4, pp. 323-332.

Korea Environmental Institute (KEI) (2010). *Developing a framework of water security and cooperation in transboundary rivers of South and North Korea*. Research Report 2010-07, Korea Environmental Insitute, Sejong, Korea.

K-water (2002). *Water vision: trend analysis report*. K-water, Daejeon, Korea.

Lee, G.M., Kang, B., and Hong, I.-P. (2008). "Cooperative framwork for conflict mitigation and shared use of South-North Korea transboundary rivers." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5B, pp. 505-514.

Sah, D. (2017). "Inter-Korean shared river conflict and German integration case." *Proceeding of the Korean Association for Public Administration*, pp. 2023-2041.