

광학위성을 활용한 임진강 접경지역 황강댐 저수지의 월단위 물수지 분석*

김진겸¹ · 강부식² · 유완식³ · 황의호^{4*}

Monthly Water Balance Analysis of Hwanggang Dam Reservoir for Imjin river in Border Area using Optical Satellite*

Jin-Gyeom KIM¹ · Boo-Sik KANG² · Wan-Sik YU³ · Eui-Ho HWANG^{4*}

요 약

임진강 상류 북한지역에 위치한 황강댐은 약 3억 5천만m³ 규모의 저수지를 가지고 있으며, 하류로의 발전방류 이후 방류량 일부를 도수하여 예성강 유역의 생활, 공업, 농업용수를 공급하고 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 황강댐의 유역변경식 용수공급으로 인해 임진강 하류로 흘러내려 오는 유량이 감소하여 우리나라의 용수공급, 하천유지유량, 수질 및 생태환경에 부정적인 영향을 미치고 있다. 하지만 남북접경지역의 특성상 수문자료의 공유가 원활하지 못하고 황강댐의 운영방식을 알 수가 없으므로 하류부 남한측 지역의 피해위험이 상존하고 있다. 이에 본 연구에서는 광학 원격탐사 영상을 기반으로 보정된 수문모형과 물수지 분석을 통해 장기유출 개념의 월별 도수량을 산정하였다. 2019년 1월부터 2021년 9월까지의 물수지 분석결과 황강댐의 평균 도수량은 29.2m³/s로서 이는 연간 9.22억 톤에 해당하는 수자원 양이며, 황강댐에 유입되는 연평균 유입량인 20.2억 톤 중 45.6%를 차지한다.

주요어 : 원격탐사, 인공위성, 임진강, 황강댐, 접경지역, 도수량

2021년 12월 10일 접수 Received on December 10, 2021 / 2021년 12월 20일 수정 Revised on December 20, 2021 / 2021년 12월 21일 심사완료 Accepted on December 21, 2021

* 본 연구는 환경부의 물관리연구사업(79622)에서 지원받았습니다.

1 K-water연구원 유역물관리연구소 선임연구원 Senior Researcher, Water Resources Management Research Center K-water Research Institute

2 단국대학교 토목환경공학과 교수 Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

3 K-water연구원 유역물관리연구소 선임연구원 Senior Researcher, Water Resources Management Research Center K-water Research Institute

4 K-water연구원 유역물관리연구소 수석연구원 Head Researcher, Water Resources Management Research Center K-water Research Institute

※ Corresponding Author E-mail : ehhwang@kwater.or.kr

ABSTRACT

The Hwanggang Dam in North Korea is located upstream of the Imjin River which is a shared river in the border area. It is known to have a reservoir capacity of 350 million cubic meters and releases a discharge primarily for generating hydroelectric power and partly for transferring to the Yesung River basin. Due to the supply of water from the Hwanggang Dam to another basin, the flow of the Imjin River has decreased, which has a negative impact on the water supply, river maintenance flow, water quality, and ecological environment in Korea. However, due to the special national security issue of the South and North Korea border region, the hydrological data is not shared, and the operation method of the Hwanggang Dam is unknown, so there is a risk of damage to the southern part of the downstream area. In this study, the monthly diversion as the long-term runoff concept was derived through the calibrated hydrological model based on optical remotely sensed Images and water balance analysis. As a result of the water balance analysis from January 2019 to September 2021, the average diversion of the Hwanggang Dam was 29.2m³/s, which is equivalent to 922 million tons per year and 45.6% of the annual inflow of 2.02 million tons into the Hwanggang Dam.

KEYWORDS : Remote sensing, Satellite, Imjin river, Hwanggang Dam, Border area, Diversion

서 론

임진강과 북한강은 북한에서 발원하여 남한으로 흘러가는 대표적인 공유하천으로서 이 중 임진강 유역은 총 유역면적 8,117.5km² 중 약 63%에 해당하는 유역이 북한지역에 위치한다. 임진강에는 2007년에 북한 측 수자원개발에 따라 건설된 황강댐으로 인해 우리나라에 직접적인 영향을 미치고 있으며 임진강 하류의 용수 감소 및 홍수피해 우려가 지속되고 있는 실정이다. 황강댐은 군사분계선으로부터 약 42.3km 떨어진 위치에 존재하며 대략 3~4억 톤의 규모로 추정된다(Lee *et al.*, 2008). 우리나라에서는 황강댐의 무단방류에 의한 홍수를 방어하기 위해 약 7천만톤 규모의 군남홍수조절지를 2011년에 건설하였다.

북한의 황강댐 건설 이후 임진강 접경지역의 관심이 높아지면서 해당 지역에 관한 연구가 상당수 진행되었다. 미계측 지역인 북한지역의 수문변동을 모의하기 위해 Park and Hur(2009)는 물리적 기반 분포형 수문모형을 사용하여 홍수

유출을 모의하였다. 해당 연구에서는 DEM(Digital Elevation Model), 대분류 토지이용도, 개략도 양도를 사용하여 1km로 격자로 수문모형을 구성하여 황강댐 건설 이전인 2006년의 자연유출 상태를 기준으로 홍수유출 모형을 구축하였다. Kim *et al.*(2011)은 황강댐 건설 전후의 유출량 산정 및 평가를 통해 댐 건설 이후 물 부족량을 분석하기 위해 북한 황강댐 건설 이후의 기간을 대상으로 NWS-PC 모형을 구축하여 일 단위 장기유출 모의를 수행하였다. 해당 연구에서는 댐 건설 이전 자연유출 시기를 이용하여 모형을 구축하였으며 황강댐의 저류로 인해 임진강 상류의 수자원이 하류로 도달하지 못함을 보여주었다. 2011년 홍수방어를 위한 군남홍수조절지가 건설된 이후 임진강 하류지역의 홍수피해 분석을 위한 연구가 수행되었다. Yang *et al.*(2017)은 북한 황강댐의 무단방류에 대비하여 홍수조절효과를 높이기 위한 군남홍수조절지의 운영방안을 저수지운영모형과 과거 홍수 유입 사례 분석을 통해 제시하였으며 Park and Lee(2018)은 임진강 하류의 홍수피해를 사전에 예측하고 대비하기 위해 군남홍수조절지의

홍수조절용량을 초과한 홍수가 발생했을 때의 홍수 피해면적 및 지역을 산정하였다.

최근에는 황강댐의 무단방류로 인한 홍수피해와 국지적 가뭄현상이 빈번히 나타남에 따라 황강댐의 존재와 운영방식이 임진강 하류지역에 미치는 영향에 대해 분석하려는 시도가 있어왔다. Jang *et al.*(2020)은 임진강유역의 하천유지용량의 부족분을 산정하기위해 황강댐 건설 이후 임진강의 유량이 줄어드는점을 지적하여 일단위 물수지 분석을 통해 정량적인 용수감소분을 산정하였다. Ha *et al.*(2020)은 GIS 기반으로 수문모형의 매개변수를 추출하여 준분포형 수문모형을 구축하고 지상강우자료를 최대한 활용하여 임진강 수계의 유출모형을 구축하였으며, AutoROM 기반의 저수지 모의운영 방법을 응용하여 북한 황강댐의 방류량과 군남관측소까지의 유입량을 산정하였다. Kim *et al.*(2020)은 임진강 접경지역을 대상으로 고해상도 광학 위성영상을 통한 댐 정보 취득, SAR(Synthetic Aperture Radar) 위성 영상분석을 통한 황강댐 수표면적 변화 추적, 지형자료와 연계한 황강댐 저수량 변화 탐지를 수행하여 접경지역에서 원격탐사 자료를 이용한 수문자료 획득의 가능성을 보여주었다. 또한, Kim *et al.*(2021)은

북한 황강댐의 유입량을 정량적으로 산정하기 위해 인공위성 영상에서 추출한 황강댐의 수표면적을 수위로 환산하고 AutoROM기반의 저수지 운영모형과 연속유출모의가 가능한 단위도모형의 조합을 통해 연속적인 댐 수위변화를 모의하여 유출모형을 보정하고 황강댐의 유입량을 간접적으로 검증하였다.

본 연구에서는 원격탐사 기반의 황강댐 수위자료와 WMO(World Meteorological Organization)에서 제공하는 북한지역 지상강우를 이용하여 수문모형을 간접적으로 보정하고 황강댐 유입량과 군남댐의 자체유입량을 산정하여 물수지 방정식을 통해 황강댐의 유역변경식 월평균 도수량을 정량적으로 산정하였다.

연구방법

1. 연구 지역

임진강은 북한에서 발원하여 우리나라로 흘러와 한탄강과 합류하는 공유하천으로서 전체 유역면적은 8,177.5km²이고, 총 유로연장은 254.6km이다. 이 중 군사분계선을 기준으로 남한지역의 유역면적은 전체 유역의 37.1%이며, 나머지 62.9%는 북한지역에 위치하고 있다. 임진강유역의 토

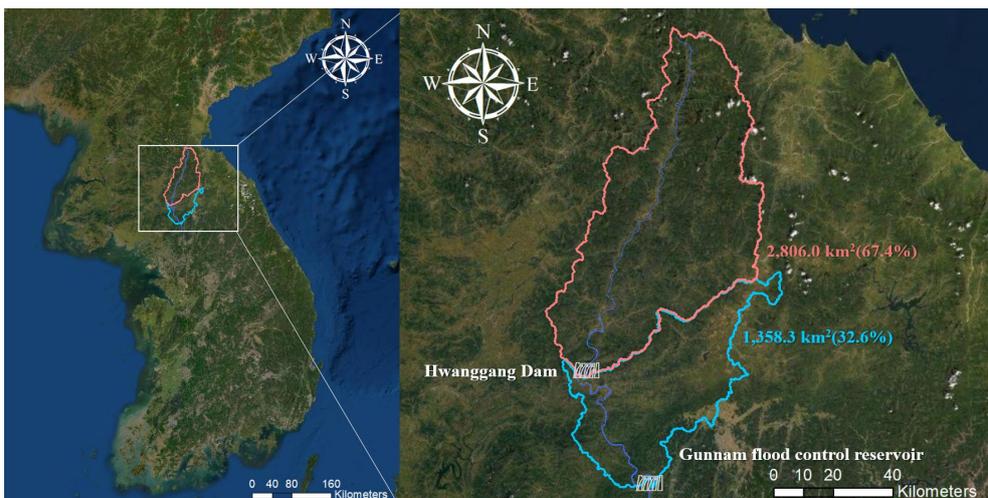


FIGURE 1. The location of Imjin river basin including contributing area of Hwanggang dam and Gunnam flood control reservoir

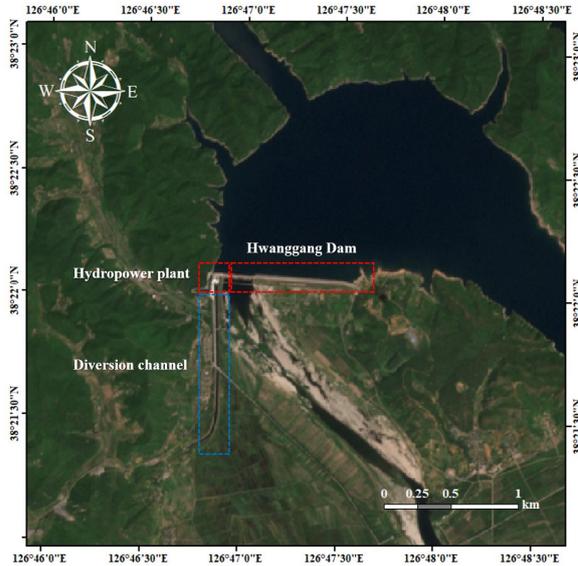


FIGURE 2. Optical Sentinel-2 satellite image showing diversion channel of Hwanggang dam

지이용현황은 대부분 임야로서 가용수자원이 풍부하여 수자원 개발 가능성이 많지만 접경지역이라는 이유로 관련 개발이 어려운 상황이다 (Baek *et al.*, 2010). 수문학적 관점에서 그림 1과 같이 임진강 남측에 설치된 군남홍수조절지를 기준으로 전체 유역면적 4164.3km² 중 북한 황강댐에 의해 분리된 유역면적은 2806.0km²로서 67.4%의 유역의 수자원이 황강댐으로 유입되고 있다.

2007년 12월경 완공된 황강댐은 군사분계선으로부터 42.3km 북쪽에 위치하며, 콘크리트 중력식댐과 중심코아형 석괴댐으로 이루어진 복합댐으로 댐 총길이 880m로 추정되며(Kim *et al.*, 2011) 저수용량 3~4억m³ 규모의 다목적댐으로 저류된 물을 그림 2와 같이 수력발전기를 가동한 이후 도수로를 통해 예성강으로 이동시켜 개성공단에 공업용수와 생활용수를 공급하는 것으로 알려져 있다. Jang *et al.*(2020)에 따르면 황강댐 건설 이후인 2007년 말을 기준으로 임진강 하류 임진교의 월평균 유량이 29% 감소한 것으로 분석되었으며 특히, 10월부터 이듬해 5월까지 갈수기의 월평균 유량은 53% 감소하

는 것으로 분석되어 북한지역의 황강댐으로 인해 우리나라로 유입되는 임진강의 유량이 상당부분 감소한 것을 보여주었다.

북한지역의 특수성으로 인해 실시간으로 강우자료를 획득하기는 어려우나 기상청에서는 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization)의 GTS(Global Telecommunication System)를 통해 북한지역의 27개 관측소의 기상관측자료에 대해 전일 취득한 자료를 시간 및 일단위로 정리하여 제공하고 있다. 그중 임진강 접경지역에 영향을 주는 관측소는 그림 3과 같이 총 5개(양덕, 원산, 신계, 평강, 개성)가 존재한다. 본 연구에서는 2019년 1월 1일~2021년 9월 30일까지의 시간위 자료를 수집한 뒤 황강댐을 중심으로 상하류로 나누어진 유역에 맞게 표 1과 같이 산정된 티센가중치를 이용하여 면적평균강우로 환산한 뒤 수문모형의 입력자료로 활용하였다.

2. 분석방법

북한 황강댐 및 우리나라 군남홍수조절지의 자체 유입량을 산정하기 위해서는 수문모형의

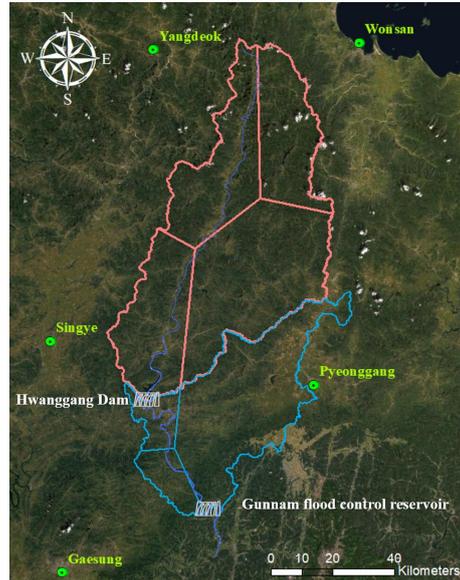


FIGURE 3. Thiessen polygon of Imjin river basin using weather stations in North Korea

TABLE 1. Weights of weather stations for the Thiessen polygon in the study area

Station	Yangdeok	Wonsan	Singye	Pyeonggang	Gaesung	Total
Upper basin	0.224	0.183	0.211	0.382	-	1.000
Lower basin	-	-	0.099	0.114	0.787	1.000

구동이 필요하다. 미계측 유역을 대상으로 구축하는 수문모형은 유역의 지형공간적 특성을 물리적으로 반영할 수 있는 분포형 모형이 유리하다고 알려져 있으나 매개변수가 다양하고 계산 부하가 크며 장기유출보다는 단기 홍수유출모형에 어울리는 특징 있다. Kim *et al.*(2008)과 Park and Hur(2009)는 임진강유역 전체를 대상으로 레이더 강우와 물리적 기반 분포형 모형을 활용하여 홍수유출모의를 수행한 바 있다. 하지만 북한의 황강댐과 우리나라의 군남홍수조절지가 건설되기 이전 기간을 대상으로 연구가 수행되었기 때문에 당시에는 임진강 상류지역을 자연유역으로 간주할 수 있었지만, 현재는 황강댐으로 인해 유역의 수문학적 구조가 변화되어 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 집중형 모형인 Clark 단위도 모형을 활용하였다. Clark

단위도 모형은 시간-면적 관계식으로부터 침투홍수량의 감쇠와 지체효과를 구현하고 지형학적 특성으로부터 산정할 수 있는 간단한 매개변수 추정과 신속한 계산을 통해 실시간 혹은 준실시간 유출모의를 수행할 수 있는 장점이 있으며, 미계측 지역의 수문곡선 산정에 활용할 수 있도록 홍수량 산정 표준지침(환경부, 2019)을 통해 식 1과 2와 같이 저류상수(K)와 도달시간(T_c) 매개변수의 통계적 경험식이 제시되어 있어 모형의 초기 구축이 편리하다.

$$K = \alpha \left(\frac{A}{L^2} \right)^{0.02} T_c \quad (1)$$

$$T_c = 0.214 LH^{-0.144} \quad (2)$$

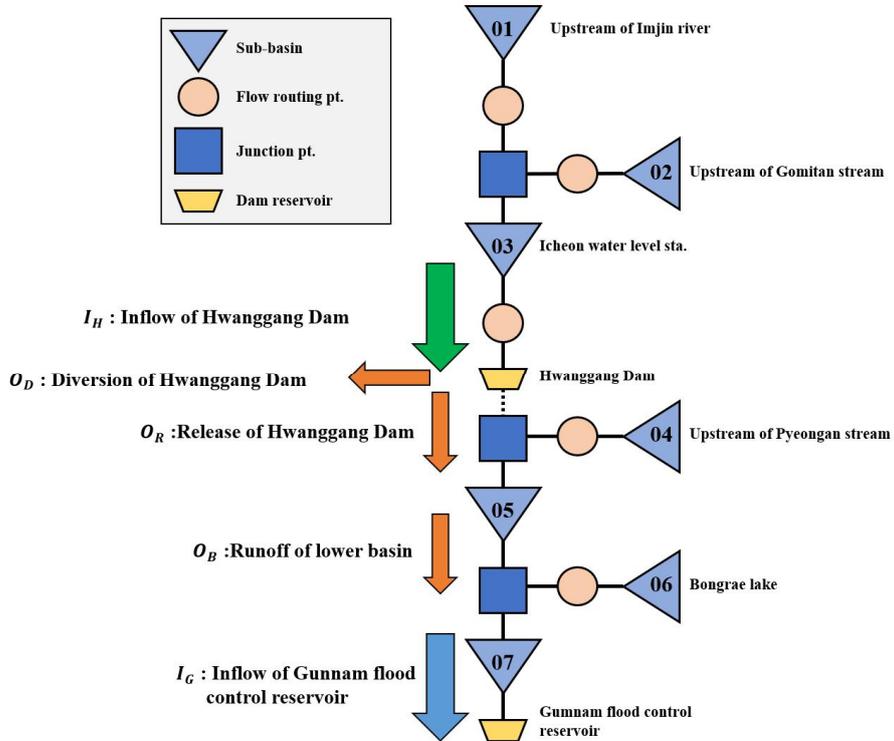


FIGURE 4. Drainage basin system and water balance components in study area

여기서, K 는 저류상수(hr), α 는 일반적인 하천유역에서 1.45(기준값), 산지 등 하천경사가 급하고 저류능력이 적은 유역은 1.20, 평지 등 하천경사가 완만하고 저류능력이 큰 유역은 1.70을 적용, A 는 유역면적(km^2), T_c 는 도달시간(hr), L 은 유로연장(km), H 는 고도차(m, 유역 최원점 표고와 홍수량 산정지점 표고의 고도차) 이다.

수문모형 구동을 위해 그림 4와 같이 황강댐

을 포함하며 군남홍수조절지를 출구로 하는 유출모형을 구축하였으며 수문모형은 황강댐을 중심으로 상하류로 구분된 시단위 면적평균강우를 활용하여 구동하였다. 모형에 활용된 매개변수는 GIS 도구를 활용하여 표 2와 같이 구축하였다. 이때, 집중형 모형의 특성상 유효강우에 의한 유효유출만을 계산하는 특징이 있어 비강우시의 기저유량을 설정해줄 필요가 있으므로 황

TABLE 2. Parameters of Clark unit hydrograph and Muskingum flow routing

No	Basin Name	Clark unit hydrograph		Muskingum flow routing		
		T_c (hr)	K (hr)	C_0	C_1	C_2
01	Upstream of Imjin river	6.60	9.21	0.0266	0.4160	0.5575
02	Upstream of Gomitan stream	8.66	11.98	0.0162	0.4097	0.5741
03	Icheon water level sta.	4.84	6.79	0.0316	0.4190	0.5494
04	Upstream of Pyeongan stream	6.30	8.64	0.0368	0.4221	0.5412
05	Confluence of Yeockok stream	3.88	5.39	-	-	-
06	Bongrae lake	6.49	8.97	0.0303	0.4182	0.5515
07	Gunnam flood control reservoir	1.99	2.84	-	-	-

TABLE 3. Spectral bands and spatial resolutions of the Sentinel-2 optical sensors for NDWI calculation

Sentinel-2 bands	Sentinel-2A		Sentinel-2B		Spatial resolution(m)
	Central wavelength(nm)	Band width(nm)	Central wavelength(nm)	Band width(nm)	
Band 3 (Green)	559.8	36	559.0	36	10
Band 8 (NIR)	832.8	106	832.9	106	10

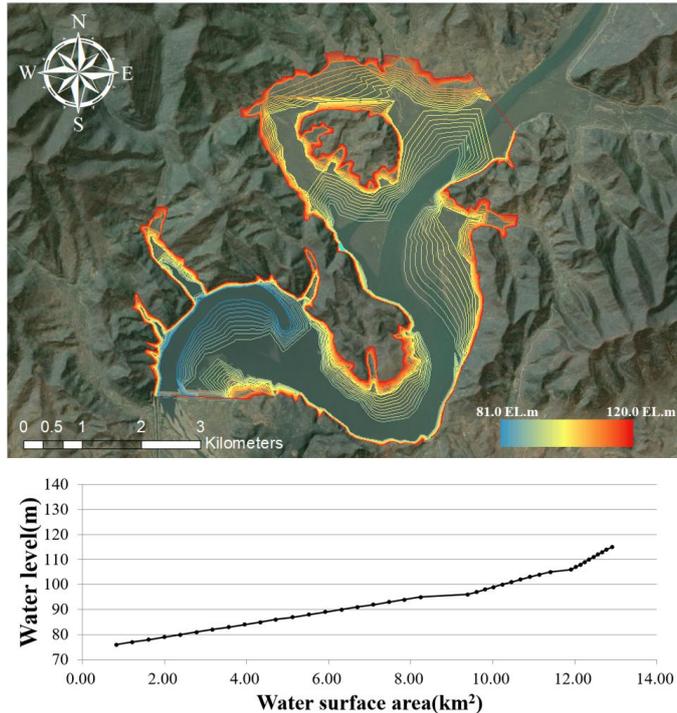


FIGURE 5. The contour map through water level and relationship of water level–surface area for Hwanggang dam reservoir

강댐 하류의 기저유량은 군남홍수조절지 비홍수기(11~4월)의 유입량의 평균값인 14.4m³/s를 사용하였으며, 황강댐 상류의 경우 관측자료를 확보할 수 없으므로 황강댐을 기준으로 상하류 간의 면적비(2.08:1)를 적용하여 30.0m³/s를 사용하였다.

수문모형에서 산정되는 황강댐 유입량은 직접 검증이 불가능하므로 본 연구에서는 황강댐 유입량을 간접적으로 검증하기 위해 Sentinel-2 광학위성에서 추출한 황강댐의 수위를 이용하였

다. 황강댐의 수위를 추정하기 위해 그림 5와 같이 10m 해상도의 DEM(Digital Elevation Model)로부터 산정한 황강댐 저수지의 수표면적-수위 수위 관계를 구축하였으며 Sentinel-2 광학영상으로부터 수체를 추출하기 위해 식 3과 같은 McFeeters (1996)가 제시한 NDWI(Normalized Difference Water Index)를 활용하였다.

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (3)$$

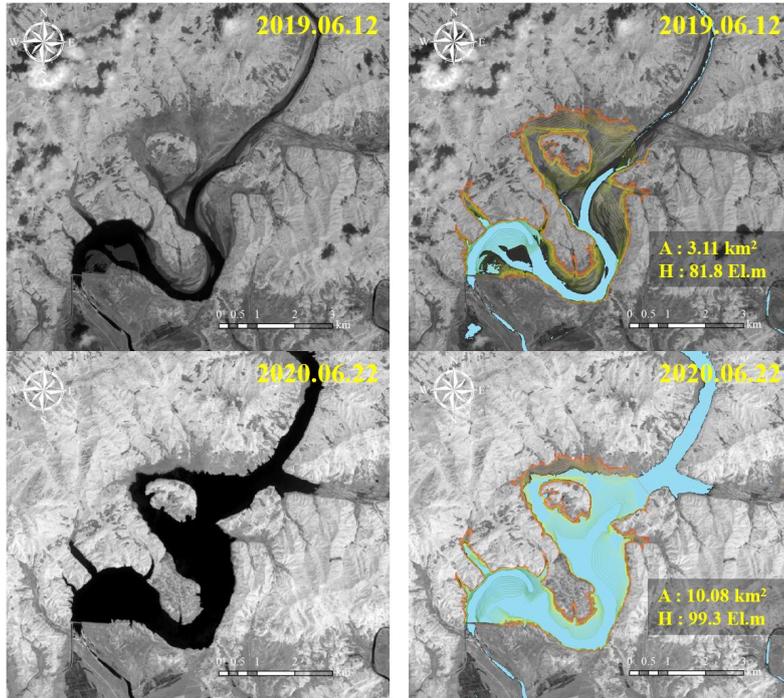


FIGURE 6. Example near infrared imagery of Sentinel-2 optical satellite(left) and waterbody detection imagery(right) for water surface variation monitoring

여기서, ρ_{Green} 은 녹색광의 반사도, ρ_{NIR} 은 근적외선파의 반사도를 나타내며 $NDWI$ 가 0보다 큰 격자를 수체로 간주할 수 있다.

Sentinel-2는 동일한 위성 두 대(Sentinel-2 A/B)가 같은 궤도로 공전하며 지구를 관찰하고 있으며 다분광 장비(MSI, Multi Spectral Instrument)를 탑재하여 가시광 영역을 포함한 13개의 분광영상을 제공하고 있다. 표 2는 Sentinel-2에서 제공하는 여러 분광영상 중 $NDWI$ 를 산정하기 위해 선택된 영상의 파장대역과 공간해상도에 대해 나타내고 있다. Kim *et al.* (2021)은 북한 황강댐의 저수량 변화를 파악하기 위해 근적외선 영상과 $NDWI$ 를 사용하여 수체를 추출하였으며 수체의 임계값(Threshold) 설정에 있어 단일 근적외선 영상에서의 DN (Digital Nuber)는 매번 통계분석 및 감독분류 과정을 거쳐야하는 단점이 있지만 $NDWI$ 지수는 미리 제시된 기준값을 중심으로 수체를 추출할 수 있

는 장점이 있다고 기술하였다. 또한, Kye *et al.* (2021)도 동일한 기준으로 북한 황강댐의 수체면적 변화를 분석한 바 있으며 저수지 내 구름의 차폐로 인해 활용할 수 없는 영상을 일부 보정하여 수체면적을 제시하였다. 본 연구에서도 앞선 연구에서 활용한 $NDWI$ 지수를 사용하여 그림 6과 같이 광학 위성영상으로부터 수체면적을 분석하고 수표면적-수위 관계식에 적용하여 황강댐의 수위를 추정하였다.

수문모형을 통해 황강댐의 유입량이 결정되고 나면 황강댐의 수위가 변동되게 된다. 이 때 황강댐의 수위는 수위-저수량 관계에 따라 변화가 이루어지며, 황강댐의 저수지가 넘치지 않도록 조절해주는 과정이 필요하다. 이러한 이유로 저수지 운영 방법(Reservoir Operation Method, ROM)이 필요하게 되며 본 연구에서는 가장 단순한 저수지 운영 모형인 AutoROM을 활용하였다. Auto ROM은 현재의 저수지 수위를 기준

으로 댐의 안전만을 보장하여 평시에는 상시만 수위 이하에서, 홍수시에는 계획홍수위를 초과하지 않도록 일정한 범위 안에서 운영하는 방식이며, 다음과 같은 조건에 의해 수위를 조절한다.

첫째, 저수지의 수위가 상한수위 이하이고 하한수위 이상이면 유입량에 상관없이 일정량의 발전방류를 수행

둘째, 저수지의 수위가 상한수위 이상이면 초과된 유입량을 전량 방류

셋째, 저수지의 수위가 하한수위 이하이면 발전방류를 중단하고 유입량을 전량 저류

넷째, 황강댐은 저수지 수위와 관계없이 수문 조작을 통해 특정 유량을 방류할 수 있는 것으로 가정

이와 같은 저수지 운영 절차와 황강댐 유입량의 변화를 통해 황강댐의 수위가 변하게 되면 광학 원격탐사에서 추출한 수위와 비교하는 절차를 통해 황강댐의 유입량을 간접 검증하였다.

황강댐의 유입량이 검증된 뒤 황강댐의 도수량은 임진강 상류 유역 내에서의 물수지 방정식으로 표현하였다. 장기 유출관점에서의 댐에 일시 저류된 유량은 시간이 지남에 따라 전량 방류되어 댐 저류효과에 영향을 받지 않는다는 가정을 전제로 분석하였다. 그림 4의 수계모식도에서 표현하였듯이 황강댐의 유입량은 저수지에 일시적으로 저류되었다가 방류되는데 대부분의 방류량은 발전방류로서 도수도를 통해 예성강 유역으로 흘러가게 되며 홍수기에 수위조절이 필요한 경우에는 수문방류를 실시하여 하류로 내보내게 되며 이는 식 4와 같이 나타낼 수 있다. 하류로의 방류량은 황강댐과 군남홍수조절지 사이의 유역에서 발생하는 잔유역 유출량과 합쳐져 군남홍수조절지로 흘러들어오게 되며 이를 수식으로 나타내면 식 5과 같다. 최종적으로 식 4와 식 5를 연립하여 식 6과 같이 황강댐의 유역외 도수량을 계산할 수 있다.

$$I_H = O_D + O_R \quad (4)$$

$$I_G = O_R + O_B \quad (5)$$

$$O_D = I_H - I_G + O_B \quad (6)$$

여기서, I_H 와 I_G 는 각각 황강댐 유입량(m^3/s)과 군남홍수조절지 유입량(m^3/s)이며, O_D 는 황강댐의 도수량(m^3/s), O_R 은 황강댐의 하류 방류량, O_B 는 잔유역 유출량이다.

황강댐 유입량, 잔유역 유출량은 원격탐사 영상을 이용해 보정된 수문모형을 활용하여 획득할 수 있으며 군남홍수조절지 유입량은 관측자료가 존재하기 때문에 가장 불확실성이 큰 황강댐 방류량을 획득할 수 없는 상황에서도 황강댐의 도수량을 추정할 수 있다.

연구결과

분석기간인 2019년 1월 1일부터 2021년 9월 30일까지의 북한 황강댐 유역의 강우량을 수집한 뒤 면적평균 강우량으로 환산하여 강우-유출 모형에 입력할 시단위 시계열을 작성하였다. 북한 황강댐 유역의 강우는 연평균 1,100mm로 알려져 있으며 여름철 홍수기에 강우가 집중되는 한반도 강우특성이 동일하게 나타나고 있다. 그림 7은 북한 황강댐 유역의 월단위 면적평균강우를 나타낸 그래프이다. 2019년에는 연평균강우량에 74.6%에 해당하는 821.5mm의 강우가 관측되었으며, 2020년에는 연평균강우량 대비 약 170.5%에 해당하는 1,875.0mm의 강우가 관측되었다. 특히, 2020년 8월은 연평균강우량의 약 84.7%에 해당하는 강우가 집중하여 내렸으며 임진강 하류 연천군 지역에 홍수경보가 발령되기도 하였다. 2021년 9월 현재까지 844.3mm의 강우가 관측되었으며, 봄철(3~5월) 강우가 다른 시기에 비해 많은 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 구축된 황강댐 및 잔유역의 강우 시계열을 이용하여 황강댐 유입량을 시단위로 산정하였으며 황강댐의 수위변화를 통해 간접적으로 검증하였다. 그림 8은 황강댐 유입량에 따른 황강댐 수위변화를 2019년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지 1시간 단위로 모의하여

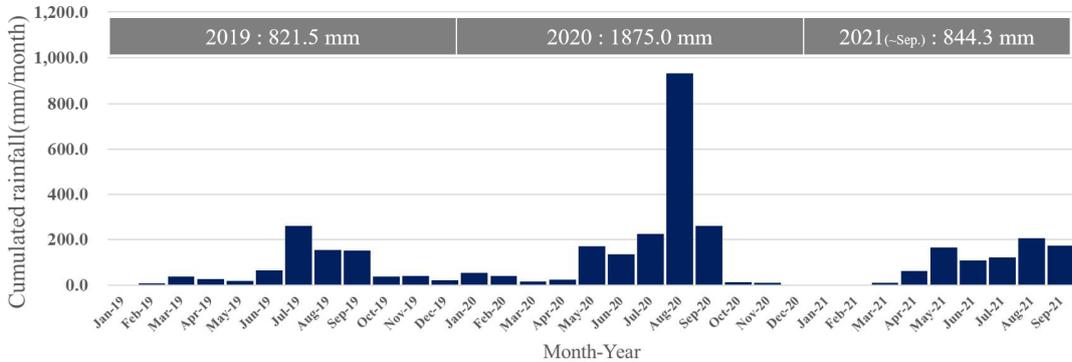


FIGURE 7. Time series of monthly areal rainfall in Hwanggang dam basin

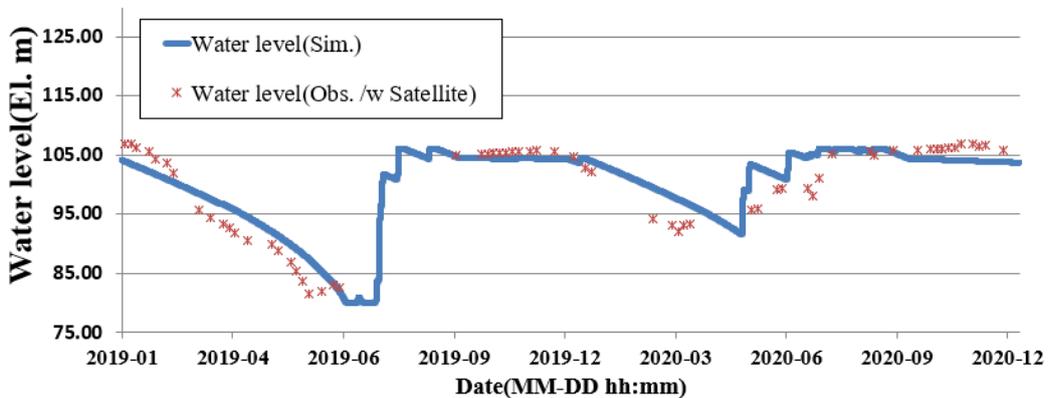


FIGURE 8. Continuous simulation of water level comparing with water level monitoring based on optical remote sensed image for Hwanggang dam

Sentinel-2 광학 인공위성 기반의 댐 수위와 비교한 그래프이며, 해당 기간의 댐 수위 비교 결과 결정계수(R^2) 0.87, RMSE(Root mean square error) 3.17m로 산정되었다. 이렇게 결정된 황강댐의 유입량을 댐 저류 및 수문방류 효과를 상쇄하고 장기유출 개념의 도수량을 산정하기 위해 월단위 평균 유출량으로 환산하였다.

최종적으로 황강댐의 도수량을 산정하기 위해서 2019년 1월 1일부터 2021년 9월 30일까지의 황강댐의 유입량, 하류 잔유역 유출량을 수문모형으로부터 결정된 관측자료가 존재하는 군남홍수조절지의 유입량을 수집하고 월단위 평균유입량으로 환산하여 황강댐 도수량을 산정하였으며 그 결과는 표 4와 같다. 물수지 방정

식을 통해 산정된 황강댐의 도수량을 살펴보면 2020년 8~9월 및 2021년 6월에 음의 도수량이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 식 4와 같은 물수지 방정식에서 황강댐 유입량과 하류 유역 유출량의 합이 군남댐 유입량을 초과할 때 나타나게 되며 주요 원인은 집중호우 등으로 황강댐에 과도한 유입량이 발생하여 추가적인 수문방류를 수행하여 황강댐의 유입량보다 방류량이 더 많아지는 때나 강우자료 등의 오류로 인해 실제 유입량보다 모의된 유출량이 적을 때 나타나게 된다. 반대의 경우로 2019년 7월과 같이 황강댐의 도수량이 과도하게 산정되는 경우가 있는데 이는 관측된 강우에 비해 군남홍수조절지에서 실제 관측된 유입량이

TABLE 4. Monthly water balance components of Imjin river basins

(Unit : m³/s)

Year	2019				2020				2021			
Month	I_H	O_B	I_G	O_D	I_H	O_B	I_G	O_D	I_H	O_B	I_G	O_D
1	30.0	14.4	12.5	31.9	34.9	16.5	22.5	29.0	30.0	14.4	10.9	33.5
2	30.0	14.4	11.8	32.6	30.0	14.4	16.8	27.7	30.0	14.4	11.2	33.2
3	30.4	14.4	10.0	34.8	30.0	14.4	16.1	28.3	30.0	14.4	15.6	28.8
4	30.0	14.4	8.9	35.5	30.0	14.4	8.0	36.4	33.0	16.7	29.3	20.4
5	30.0	14.4	8.2	36.2	73.7	40.8	47.4	67.2	51.8	30.3	66.4	15.7
6	30.3	14.7	12.0	32.9	50.9	18.9	32.1	37.7	31.2	14.4	57.8	-12.1
7	85.2	56.9	33.5	108.6	82.7	20.9	92.5	11.1	40.6	20.8	55.0	6.3
8	66.7	25.2	74.2	17.7	704.3	381.0	1548.2	-462.8	41.3	29.6	25.3	45.6
9	73.9	24.1	56.8	41.2	149.8	34.2	312.6	-128.6	50.8	19.1	33.5	36.4
10	30.0	14.4	19.3	25.1	30.0	14.4	25.8	18.6	-	-	-	-
11	31.2	15.4	13.8	32.8	30.0	14.4	16.5	27.9	-	-	-	-
12	30.0	14.4	14.3	30.1	30.0	14.4	12.8	31.6	-	-	-	-

I_H : Inflow of Hwanggang Dam, O_B : Runoff of lower basin,
 I_G : Inflow of Gunnam flood control reservoir, O_D : Diversion of Hwanggang Dam

적은 경우 발생하게 된다. 이러한 이유로 인해 평균적인 황강댐의 도수량을 평가하기 위해서는 이상치를 제거해야 한다.

이상치제거는 음수로 표현되는 도수량과 과도하게 많은 도수량을 대상으로 실시하였으며, 과도한 도수량의 경우 평균대비 표준편차의 3배를 벗어나는 값을 제외하는 3-sigma rule을 적용하였다. 평균 29.2m³/s, 표준편차 9.0m³/s로 나타나는 통계에 의해 56.2m³/s 이상의 도수량 결과를 제거하여 2019년 7월과 2020년 5월에 해당하는 2개의 도수량은 이상치로 판단되었다.

그림 9는 음의 도수량을 제외한 30개의 도수량을 오름차순으로 정리하고 누적하며 변화하는 표준편차를 나타낸 그래프로써 상위 2개의 데이터가 표준편차를 과도하게 증가시키는 것을 알 수 있다.

최종적으로 그림 10와 같은 월단위 도수량 시계열을 산정하였으며 북한의 황강댐은 월평균 29.2m³/s의 수자원을 예성강 지역으로 보내주는 것으로 판단된다. 이는 연평균 수자원의 이동을 도식적으로 표현한 그림 11에서의 연평균 물수지현황에서 볼 수 있듯이 연간 9.22억 톤에 해

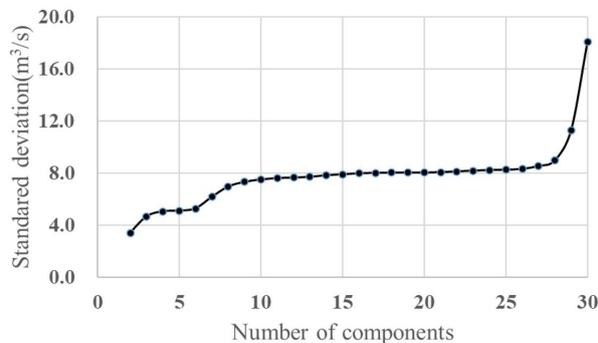


FIGURE 9. Variation of standard deviation according to the ascending order number of the water diversion data

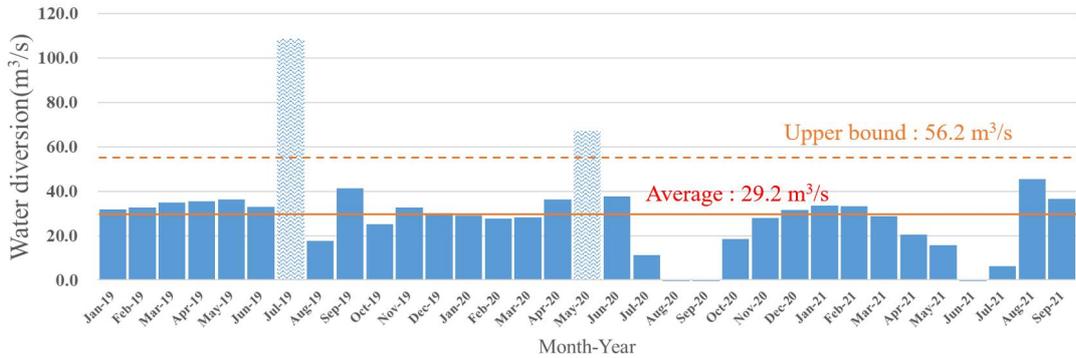


FIGURE 10. Time series of monthly averaged diversion from Hwanggang dam in North Korea

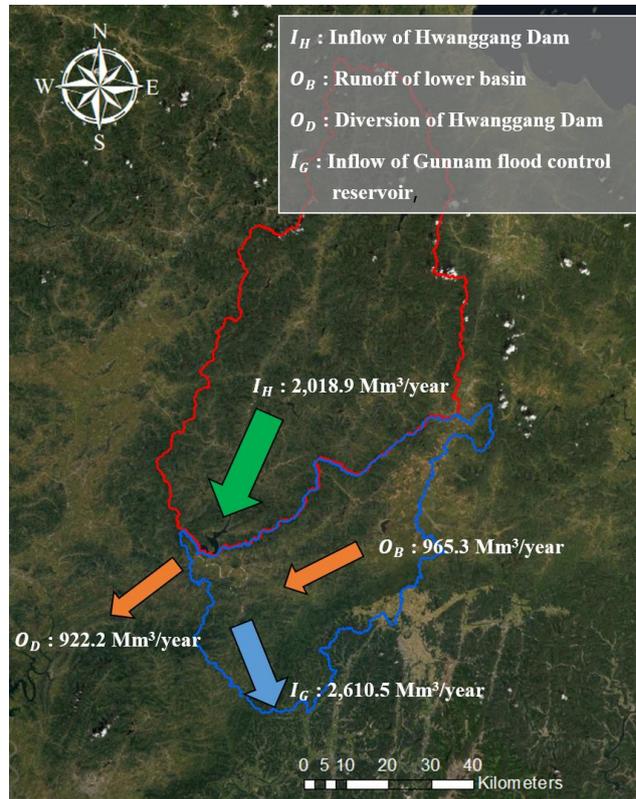


FIGURE 11. Annual averaged water balance components for Imjin river basin

당하는 수자원 양이며, 황강댐에 유입되는 연평균 유입량인 20.2억 톤의 45.6%에 해당하는 양으로서 절반에 가까운 가용수자원이 우리나라

로 흘러들어오지 못함을 알 수 있다. 단, 그림 10의 물수지현황에서 약 5.5억 톤/년의 물수지 오차가 발생하게 되는데 이는 황강댐의 평균 도

수량 산정 시 제외된 이상치와 황강댐의 저류효과로 인해 발생하는 오차로 볼 수 있다.

요약 및 결론

본 연구에서는 대표적인 남북 공유하천인 임진강 상류 북한측에 위치한 황강댐의 유역변경식 도수량을 산정하기 위해 광학 인공위성에서 추정된 황강댐의 수위변화를 이용해 기 보정된 수문모형을 이용하여 북한 황강댐 상하류의 유출량을 계산하고 물수지 방정식을 통해 황강댐의 도수량을 월별로 산정하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과, 한계점 및 개선방안은 다음과 같다.

수문모형의 구동을 위해 세계기상기구(WMO)에서 제공하는 1시간 단위의 GTS 강우자료를 이용하였다. 본 자료는 관측소의 공간밀도가 우리나라에 비해 현저히 떨어지지만 북한지역의 강우이력을 획득할 수 있는 점에서 임진강 상류 지역의 면적평균강우 시계열을 산정하는데 활용하였다. 현재 임진강 상류의 강우관측을 위해 기상청과 환경부에서는 레이더를 활용하고 있지만 북한지역 특성상 지상관측자료를 통한 실시간 보정이 어려운 상황이기 때문에 정량강수추정의 정확도가 떨어지는 것이 현실이다. 향후, 미계측 지역의 레이더 강우 보정기술이 발달하여 정확도가 향상된다면 면적평균강우의 현실적인 추정과 신뢰도 높은 접경지역 수문모형의 구동이 가능할 것이다.

지상강우자료와 단위도 기반의 수문모형을 사용하여 황강댐의 유입량과 하류 잔유역의 유출량을 산정하였다. 이 중 북한지역에 위치한 황강댐 유입량은 직접 검증이 어려운 상황이기 때문에 광학 인공위성 영상의 수체분석으로부터 획득한 수위정보와 댐 운영 알고리즘을 통한 황강댐 저수지의 수위변화 결과를 비교함으로써 황강댐의 유입량을 간접적으로 검증하였다. 해당 방법은 황강댐의 만수위 이상의 범위에서는 유입량이 전량 방류되는 것으로 계산되기에 단기적으로 홍수기 첨두유량을 정확히 추정하기에는 한계가 있으나, 저수지 수위의 상승기를 중

심으로 유입량을 검증하였기에 장기유출 관점에서 충분히 활용 가능하다고 판단된다. 추후, 군남홍수조절지의 유입량 관측자료를 활용하여 댐 운영 알고리즘의 매개변수 최적화 과정을 거친다면 홍수기 첨두유량의 정확도까지 확보할 수 있을 것이라 기대한다.

임진강 상류지역의 유출/유입량이 결정된 이후 군남홍수조절지의 관측 유입량과 함께 물수지분석을 통해 황강댐의 도수량을 산정하였다. 이후 이상치 제거를 통해 월별 도수량을 결정하였으며 황강댐은 월평균 29.2m³/s를 발전방류 및 예성강 지역으로 도수하는 것으로 산출되었다. 우리나라의 시각에서는 황강댐으로 인해 임진강 상류 유역의 수자원 중 45.6%가 손실되는 것으로 해석할 수 있다. 하지만 황강댐의 실제 도수량은 발전방류 이후 도수로를 통해 예성강 유역으로 이동하기 때문에 황강댐의 운영 및 발전계획에 따라 달라질 수 있는 상황이다. 정확한 도수량의 산정을 위해서는 북한 황강댐의 운영방식을 파악하는 것이 중요하며 황강댐의 유입량, 방류량 및 잔유역 유출량, 군남홍수조절지의 유입량을 유기적으로 분석하는 것이 필요하다.

본 연구를 통해 획득한 임진강의 물수지 정보는 이수측면에서 국가물관리기본계획 및 한강유역 물관리종합계획 수립 시 임진강의 수자원량을 파악하기 위해 활용 가능하며 치수측면에서 황강댐의 댐 운영방식을 추정할 때 중요한 매개변수로 활용할 수 있다. 향후, 레이더와 인공위성 등 원격탐사자료를 활용하여 레이더 강우의 정확도 향상 및 원격탐사 자료를 활용한 수문모형의 공학적 검보정이 추가로 이루어진다면 이수와 치수를 아우르는 접경지역 수자원 관리 시스템이 완성되리라 기대한다. **KAGIS**

REFERENCES

- Baek, K.O., Y.H. Choi and D.H. Lim. 2010. A plan for preventing disaster by water at Imjin river, Gyeonggi Research Institute 2009(82):9-13 (백경오, 최용환, 임동희. 2010.

- 임진강 수난사고 방지를 위한 대응체계 구축방안. 경기개발연구원 2009(82):9-13).
- Ha, D.T.T., S.H. Kim and D.H. Bae. 2020. Impacts of upstream structures on downstream discharge in the transboundary Imjin river basin, Korean Peninsula.. Applied sciences 10(9):3333.
- Jang, S.H., J.K. Lee and J.W. Jo. 2020. Evaluation of instream flow in the Imjingang river according to the operation of Hwanggang dam in North Korea. Crisisonomy 16(6): 105-118 (장석환, 이재경, 조준원. 2020. 북한 황강댐 운영에 따른 임진강 수계 하천유지 유량 검토. 한국위기관리논집 16(6):105-118).
- Kim, B.S., Y.H. Bae, J.S. Park and G.T. 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):52-34 (김병식, 배영혜, 박정술, 김경탁. 2008. 레이더 강우와 분포형 수문모형을 이용한 미계측 유역의 홍수 유출모의; 임진강 유역. 한국지리정보학회지 11(3):52-34).
- Kim, D.H., H.K. Lee, J.C. Jung, E.H. Hwang, F. Hossain, M. Bonnema, D.H. Kang. and A. Getirana. 2020. Monitoring river basin development and variation in water resources in transboundary Imjin river in North and South Korea using remote sensing. Remote sensing 12(1):195.
- Kim, D.P., K.H. Kim and J.H. 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 (김동필, 김경호, 김주훈. 2011. 북한의 4월5일댐과 황강댐 건설에 따른 임진강 유역의 유출량 평가. 한국환경과학회지 20(12): 1635-1646).
- Kim, J.G., E.J. Kim and B.S. Kang. 2021. Estimation of ungauged Hwanggang dam inflow using Sentinel-2 optical satellite imagery. Journal of Korean Water Resources Association 54(4):265-277 (김진겸, 김은지, 강부식. 2021. Sentinel-2 광학 위성영상을 이용한 황강댐 미계측 유입량 추정. 한국수자원학회논문집 54(4):265-277).
- Kye, C.W, D.K. Shin, J.H. Lee and J.G. Kim. 2021. Waterbody detection from Sentinel-2 images using NDWI: A case of Hwanggang dam in North Korea. Korean journal of remote sensing 37(5-1):1207-1214 (계창우, 신대규, 이종혁, 김진겸. 2021. Sentinel-2 기반 NDWI를 이용한 수체 탐지 연구:북한 황강댐을 사례로. 대한원격탐사학회지 37(5-1): 1207-1214).
- Lee, G.M., B.S. Kang and I.P. Hong. 2008. Cooperative framework for conflict mitigation and shared use of South-North Korean transboundary rivers. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 28(5B):505-514 (이광만, 강부식, 홍일표. 2008. 남북한 공유하천의 갈등해소와 공동이용을 위한 협력체계. 대한토목학회논문집 28(5B):505-514).
- McFeeters, S. K. 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17:1425-1432.
- Ministry Of Environment. 2019. Standard guidelines for flood estimation. pp.37-42 (환경부. 2019. 홍수량 산정 표준지침. 37-42쪽).
- Park, J.H. and Y.T. Hur. 2009. Flood runoff simulation using physical based distributed model for Imjin-river basin. Journal of Korean Water Resources Association 42(1):

- 51-60 (박진혁, 허영택. 2009. 물리적기반의 분포형모형을 활용한 임진강유역 홍수유출모의. 한국수자원학회논문집 42(1):51-60).
- Park, S.J. and C.W. Lee 2018. Simulation of the flood damage area of the Imjin river basin in the case of North Korea's Hwanggang dam discharge. *Korean Journal of Remote Sensing* 34(6-1):1033-1039 (박성재, 이창욱. 2018. 북한 황강댐 유출량에 따른 임진강유역 홍수 피해 지역 시뮬레이션. 대한원격탐사학회지 34(6-1):1033-1039).
- Yang, W.S., J.H. Ahn and J.E. Yi. 2017. A study on the measures to use Gunnam flood control reservoir through a reservoir simulation model. *Journal of Korean Water Resources Association* 50(6):407-418 (양원석, 안재황, 이재웅. 2017. 저수지 모의 모형을 통한 군남홍수조절지의 활용방안에 관한 연구. 한국수자원학회논문집 50(6):407-418).

KAGIS