

## Drought and Water Deficit Analysis in Imjin River Basin: Focusing on Influence of Hwanggang Dam in North Korea

Suk Hwan Jang<sup>1#</sup>, Jae Kyoung Lee<sup>1+</sup>, Ji Hwan Oh<sup>1</sup>, Hyo Sang Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi, Korea

<sup>2</sup> School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju-si, Korea

### Abstract

Agricultural water deficit and the effect of tide level occurred during 2014-2015 due to decrease in rainfall and runoff in downstream of Imjin River basin, including northern Gyeonggi-do. This paper analyzed the causes of the water deficit in Imjin River basin and proposed possible solutions. A trend analysis of precipitation and runoff revealed that runoff in the Imjin River has been decreased due to operation of dams in North Korea and the decrease in runoff from 2014 to 2015 was due largely to a reduction in precipitation. While there was no water deficit prior to the operation of the dams (an average low-flow of 46.84 m<sup>3</sup>/s), the average low-flow dropped to 27.99 m<sup>3</sup>/s after the dam operation which is less than water demand (29.88 m<sup>3</sup>/s). Based on the findings of the analyses, this paper proposed an alternative to meet the water demand by using Gunnam Dam and Hantangang Dam in the Imjin River basin during the dry season.

**Key words:** Imjin river, Water deficit, Low-flow, Drought

### 1. 서론

임진강은 북한에서 발원하여 남한으로 흘러 한강으로 유입되는 공유하천으로써, 임진강이 속한 유역은 우리나라뿐만 아니라 북한과의 접경지역도 유역에 포함된다. 이러한 지리적 조건 때문에 타 유역에 비해 불안요소가 많은 지역으로 임진강 유역은 이수, 치수, 수질, 환경 측면에 대한 효과적인 개선과 관리를 위해서는 남북한 공동의 노력이 필요한 유역이다. 임진강 유역은 과거에 집중호우와 태풍의 영향 등으로 인하여 많은 피

해가 발생하여 이에 따른 대책과 많은 계획 등이 수립되었으며, 북한 지역에 위치한 댐들의 무단방류에 따른 영향을 저감하고 홍수조절을 목적으로 군남홍수조절지(이하 군남댐)와 한탄강홍수조절용댐(이하 한탄강댐)을 건설하였다. 특히 최근 경기북부를 포함한 임진강 유역의 유량 감소로 인하여, 2014~2015년의 파주 장단반도 일대의 농업용수 부족과 하구의 조위, 즉 염도에 의한 영향으로 하류부 급수 불량 등 이수적 측면에서 주민들의 피해가 발생하고 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 기존 많은 연구들

<sup>#</sup> The 1st author: Suk Hwan Jang, Tel. +82-31-539-2025, Fax. +82-31-539-2020, e-mail. drjang@daejin.ac.kr

<sup>+</sup> Corresponding author: Jae Kyoung Lee, Tel. +82-31-539-2357, Fax. +82-31-539-2020, e-mail. myroom1@daejin.ac.kr

이 진행되었다. Choi, *et. al.*(2007)은 기존에 구축된 임진강 홍수예보시스템에 대하여 문제점을 분석하여 수문학적 모형과 수리학적 모형으로 구분하여 재구축하였으며, 과거 홍수사상에 대하여 검증한 결과 홍수예보의 정확성과 효율성이 향상되었음을 증명하였다. Park & Heo(2009)는 임진강 유역에 설치된 수문레이더 자료를 활용하여 물리적기반의 분포형모형인 H-DRUM (Hydrologic & Hydraulic Distributed flood RUNoff Model)을 활용하여 임진강 유역 홍수유출을 모의하고 실측 수문곡선과 비교하여 실무적용 가능성을 검토하였다. Ko, *et. al.*(2010)은 레이더 관측 자료를 이용하여 북한 황강댐 방류기간에 대한 레이더-AWS (Automatic Weather Station) 누적 강수량을 산출하고 그 정확성을 분석하였다. Kwak, *et. al.*(2015)은 미세측지역인 임진강 유역을 중심으로 돌발홍수 지수를 산정하여 홍수 위험도를 검토하였다. 이와 같이 기존 임진강 유역을 대상으로 한 연구들은 치수대책 관련 연구들이 대부분이었으며, 최근 발생하고 있는 임진강 유역의 물 부족 현상 등 용수공급 및 이수대책에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 2014-2015년 임진강 유역의

물 부족 발생 원인을 파악하고 이에 대한 대응방안을 제안하고자 한다.

## II. 분석 대상 유역 및 특성

### 1. 임진강 유역 특성

임진강 유역은 북위 37°44'23"~ 39°11'12", 동경 126°31'19"~ 127°36'21"에 위치하고 있는 한강의 제1지류로서 한반도 중앙부에서 남북으로 길게 위치한 우상형태를 가지는 유역이다. 유역 면적은 총 8,138.9 km<sup>2</sup>로 남한 3,185.6 km<sup>2</sup>, 북한 4,953.3 km<sup>2</sup>으로 북한이 약 60.9%를 차지하고 있다(〈Table 1〉 참조). 임진강 유역 평균 폭(=유역면적÷유로연장)은 27.52 km로 다른 유역에 비하여 크며, 형상계수는 0.09로 유출의 집중도가 약하여 침투홍수량이 비교적 작은 것으로 나타났다. 임진강 유역의 지세는 험준한 산악구릉지대이며, 일부 하류구간을 제외한 대부분의 본류 및 지류는 급류하천으로 협곡을 형성하고 있는 구간이 많으며, 만곡부가 많으나 대체로 하폭이 일정하고 연안지가 협소한 편이다. 이에 따라 중·상류부에서는 홍수로 인한 피해가 적은 반면 문산 등의 하류구간은 조위 등의 영향으로 피해

Table 1. Characteristics of the Imjin river basin

Item	Total	South Korea	North Korea
Area(km <sup>2</sup> )	8,138.9	3,185.6 (39.1%)	4,953.3 (60.9%)
River length(km)	273.5	91.1	182.4

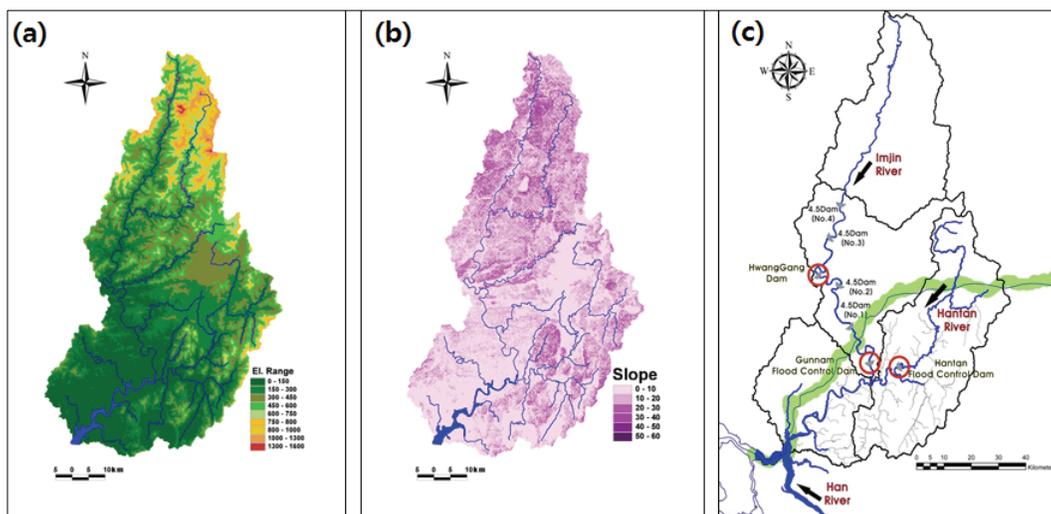


Figure 1. Description of the Imjin river basin: (a) Land coverage, (b) Land slope, and (c) Location of dams

발생 가능성이 상대적으로 높은 지역이다(〈Figure 1〉(a)와 (b) 참조)(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011). 임진강 유역의 댐을 살펴보면, 임진강 상류인 북한 유역에 발전용인 4월 5일댐 1호기~4호기와 다목적인 황강댐이 위치하고 있으며, 임진강 중류인 남한 유역에 홍수조절용 군남댐이 있고 한탄강 상류에는 한탄강댐이 건설 중에 있다(〈Figure 1〉(c) 참조).

임진강 유역은 과거 1996년 7월, 1998년 8월, 2003년 8월 및 2006년 7월에 집중 호우와 태풍의 영향으로 큰 홍수 피해 이력이 있었으며, 이에 따라 “임진강 유역 홍수피해 원인조사 및 항구대책 수립(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2002), 임진강유역 홍수대책 검증·평가 보고서(Office for Government Policy Coordination, 2006)가 수립된 바 있으며, 2009년 9월 북한의 무단방류에 따른 급격한 수위 증가로 인하여 인명피해까지 발생하였다. 또한 2014~2015년에는 유량의 감소로 인하여 임진강 유역 전역에 심각한 물 부족 현상이 발생하였다. 유역면적의 50% 이상이 북한에 존재하는 공유하천으로 임진강 유역에 대하여 체계적인 수자원관리를 하기 위해서는 임진강 전역을 고려한 분석이 필요한 실정이다.

## 2. 강수·유량 경향성 분석

본 장에서는 최근 물 부족 현상을 분석하기 위한 기초조사로서 임진강 유역에 대하여 최대 2001년부터 2015년까지 강수와 수위·유량의 경향성 분석을 실시하였다. 강수 경향성 분석을 위해 임진강 유역내 22개 기상관측소(국토교통부 18개소, 기상청 4개소) 관측자료에 기반한 면적평균강수량을 산정하여 이용하였으며, 수위·유량 경향성 분석을 위해서 15개 수위관측소(국토교통부 15개소, 한국수자원공사 1개소) 중 4개 지점(임진강 상류: 황산관측소, 군남관측소, 한탄강 하류: 전곡관측소, 임진강·한탄강 합류부: 적성관측소)을 선정하였다.

우선 임진강 유역에 대하여 2001년 1월부터 2015년까지 월평균 강수 경향성을 분석하였다. 최근 10년간 임진강 유역 강수량은 평균 1554.4 mm로서 우리나라 연평균 강수량인 1245.0 mm(Ministry of Construction & Transportation, 2006)보다 많았으나, 2014년에는 680.6 mm로 평균 강수 대비 약 54.7%로 매우 적게 발생하였다. 특히, 2014년 여름철(6월~9월) 강수는 마른장마에 의해 최근 10년 대비 37.5% 밖에 되지 않았다. 〈Figure 2〉는 2001년부터 2015년까지 임진강 유역 월평균 강수량을 연도별로 나타내고 있으며, 2001년부터

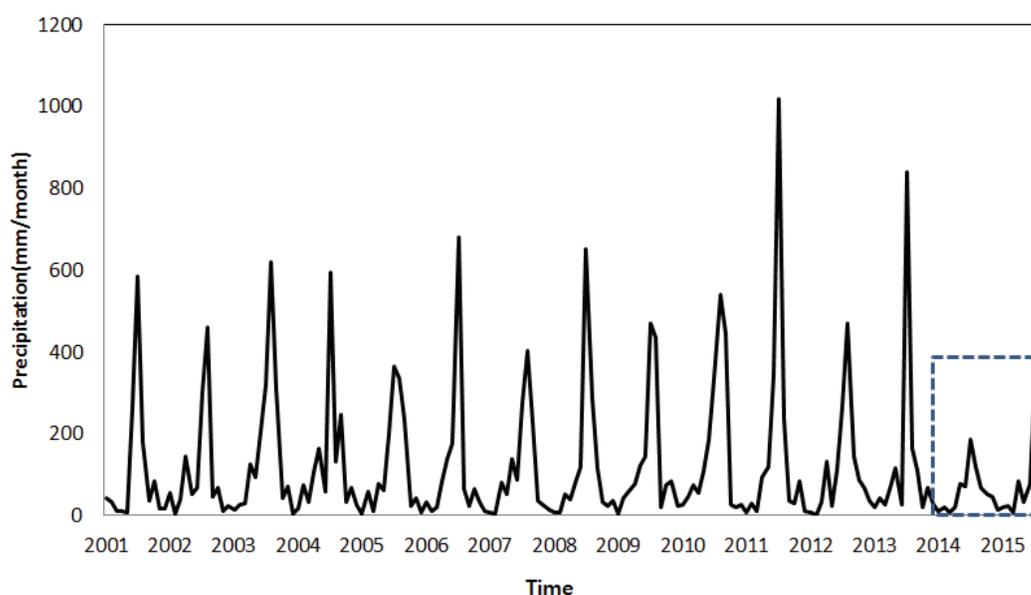


Figure 2. Time series of monthly areal average precipitation in the Imjin river basin

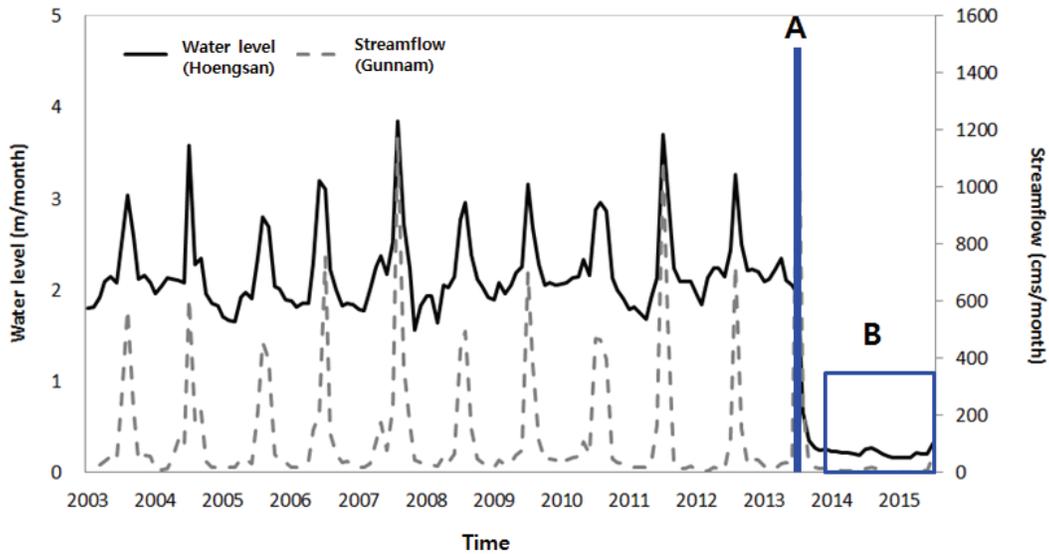


Figure 3. Time series of monthly average water level in the Hengsan station and streamflow in the Gunnam station

2013년까지 여름철 강수량에 비해 2014년과 2015년의 여름철 강수량이 현저히 작음을 알 수 있다.

다음으로 수위·유량 경향성을 살펴보면, 횡산관측소의 연평균 수위와 군남관측소의 연평균 유량에서 2014년과 2015년의 수위와 유량이 매우 낮아짐을 알 수 있다. <Figure 3>에서 A지점은 횡산관측소가 2013년 6월 25일 수위 관측지점 이전 시점을 나타내며, 이를 기준으로 이전 평균수위는 2.13 m, 이 후(B 구간)에는 0.35 m로 나타나 강수량의 감소에 의해 수위가 매우 낮아짐을 알 수 있다. 특히, 강수 경향성 결과와 동일한 시점인 2013년 하반기부터 횡산관측소의 수위가 감소하기 시작하였으며, 2014년 연강수량과 2015년에 발생한 강수량도 감소함에 따라 횡산관측소의 수위와 군남관측소의 수위가 매우 낮게 나타났다. 군남관측소에서 2004년 1월부터 2013년 12월까지 월평균 유량은 138.03 m<sup>3</sup>/s 이나 2014년 1월부터 12월까지 월평균 유량은 8.51 m<sup>3</sup>/s로서 과거 10년 대비 6.2% 정도 밖에 되지 않아 임진강 유역의 가뭄 발생의 주요한 원인 중 하나로 볼 수 있다. 또한 2015년에 발생한 월평균 유량도 10.89 m<sup>3</sup>/s로서 과거 대비 매우 적은 유량이 발생하였다.

주요 지점별 면적평균강수량과 수위·유량자료(2006~2015년)를 비교하면, 군남관측소에서는 매년 홍수기마다 강수의 증가에 따라 수위와 유량이 증가하여 두

시계열이 비슷한 경향을 보였다. 하지만 2001년부터 2013년까지 최저 일유량이 평균 11 m<sup>3</sup>/s를 초과하였으나 2014년 일평균유량은 5.75 m<sup>3</sup>/s로서 수위와 유량이 줄어드는 것으로 나타났다. 전곡관측소에서도 군남관측소와 동일하게 2014년과 2015년에 강수의 감소에 따라 수위와 유량이 감소한 것으로 나타났다. 적성관측소와 전곡관측소의 수위와 유량의 시계열 자료를 살펴보면, 두 관측소 모두 2013년까지 홍수기와 갈수기에 강수의 증감에 따라 수위와 유량의 변동도 비슷한 경향을 나타냈다. 하지만 2014~2015년까지 적성관측소에서는 강수의 감소에 따라 유량이 감소하는 것으로 나타났으며, 일 평균유량을 분석한 결과에서 2001년부터 2013년까지 최저 일평균유량이 42.0 m<sup>3</sup>/s를 초과하나 2014년 일평균유량은 25.35 m<sup>3</sup>/s 밖에 되지 않았다. 전곡관측소에서는 다른 관측소와 달리 강수 감소대비 수위가 다소 높게 나타났다. 이는 전곡관측소가 임진강 유역 하류에 위치하여 임진강 상류와 한탄강 유역에서 흘러오는 유량이 합쳐졌기 때문으로 판단된다.

각 주요 지점별로 면적평균강수 대비 유역발생유량의 비율을 유출율로 계산하여 기간별로 단순 비교하였다. 군남관측소 유량에 대한 유출율은 2006년 1월~2013년 12월까지 평균 0.76 정도로 유출율이 높으나 2014년과 2015년의 유출율은 각각 0.095와 0.083으로

서 매우 낮았다. 전곡관측소의 유출율은 평균 0.68(2003년 1월~2013년 12월)이었으나 2014년 유출율은 0.30, 2015년 유출율은 0.35로 기존보다 약 50% 정도로 나타났다. 적성관측소의 유출율은 평균 0.83(2003년 1월~2013년 12월)으로 매우 높았으나 2014년과 2015년 유출율은 각각 0.22와 0.23으로 기존 평균유출율의 1/3보다 낮게 나타났다.

### III. 물 부족 발생 원인과 대응방안

#### 1. 물 부족 발생 원인 분석

본 장에서는 우선 2014~2015년까지 임진강 유역에 발생한 물 부족 현상의 원인을 갈수기(6월부터 9월 제외)를 중심으로 기상학적 원인과 수문학적 원인으로 나누어 살펴보았다. 기상학적 원인으로는 임진강 유역에 발생한 강수량에 의한 영향을 살펴보았으며, 수문학적 원인으로는 북한댐 운영이 우리나라 임진강 유역에 발생하는 유량에 영향을 미치는지에 대하여 분석하였다.

#### 1) 강수량 감소에 의한 영향

최근 임진강 유역에 발생한 물 부족의 원인으로 우선 강수량의 감소에 의한 영향인지 분석하기 위해 임진강 유역 면적평균강수량과 북한 댐건설의 영향을 많이 받는 3개의 수위·유량관측 주요 지점들(임진강 상류: 군남관측소, 한탄강 하류: 전곡관측소, 임진강 하류: 적성관측소)의 유량자료를 분석하였다. <Figure 4>은 2003~2015년까지 임진강 유역 월 면적평균강수량과 주요 지점들의 월 유량 시계열을 나타낸다. 강수량의 증감에 따라 각 관측소의 유량도 동일한 추세를 나타내고 있으며, 특히 <Figure 4>에서 박스 A의 2014~2015년까지 강수 감소의 영향으로 각 지점들의 유량도 기존 기간(2003~2013년) 대비 매우 감소한 것으로 나타났다. <Table 2>는 군남, 전곡, 적성관측소에 대하여 기존 기간과 2014년 기간의 연강수량, 연유출량, 유출율을 나타낸다. 강수량은 2014년 680.60 mm를 기록하여 기존 기간(1554.10 mm) 대비 43.79%만 발생하였으며, 강수량이 줄어들어 따라 연 유출량도 군남, 전곡, 적성

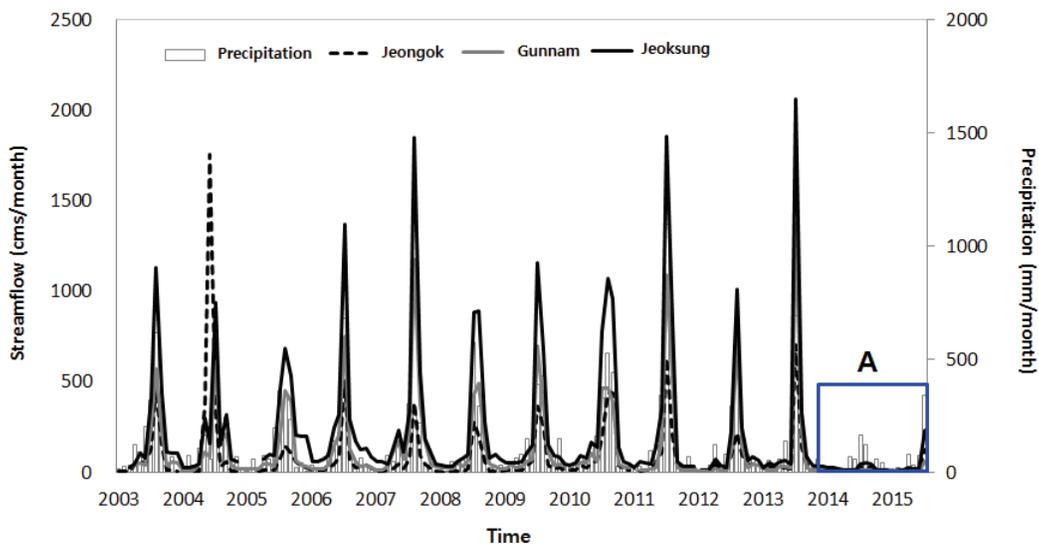


Figure 4. Time series of monthly average streamflow and streamflow

Table 2. Comparison of annual precipitation, streamflow and average runoff ratio between the reference period (2003~2013) and 2014

Period	Annual Precipitation (mm)	Annual streamflow(m <sup>3</sup> /s)			Runoff ratio		
		Gunnam	Jeongok	Jeoksung	Gunnam	Jeongok	Jeoksung
Reference	1554.10	1731.59	931.39	2750.73	0.66	0.65	0.76
2014	680.60 (43.8%)*	85.07 (4.9%)	303.77 (32.6%)	149.78 (5.5%)	0.10 (15.2%)	0.30 (46.2%)	0.22 (28.9%)

\* Percentage value in 2014 represents the ratio compared to the reference period

관측소 각각 기존 기간 대비 85.07 m<sup>3</sup>/s(4.91%), 303.77 m<sup>3</sup>/s(32.61%), 149.78 m<sup>3</sup>/s(5.45%)만 발생하였다. 또한 연유출율도 군남, 전곡, 적성관측소 각각 0.10(15.15%), 0.30(46.15%), 0.22(28.95%)로 감소하였다. 이에 따라 2014년 연강수량의 감소는 임진강 유역 물 부족의 중요한 원인 중 하나로 판단할 수 있다.

2) 북한댐 운영에 의한 영향

북한에 속한 임진강 유역에 위치한 황강댐은 2007년에 완공되어 담수가 시작되었으며, 이에 따라 우리나라에 속한 임진강 유역의 유량에 영향을 주는지에 대한 분석을 수행하였다. 우선 북한지역의 임진강 유역 내 위치한 4개 관측소(용연, 개성, 사리원, 신계) 자료를 이용하여 면적평균강수량을 분석하였다(Korea Meteorological Administration, 2014). 2003년부터 2014년까지 북한 지역에 속한 임진강 유역의 월별 면적평균강수량을 살펴보면, 여름철(6~8월)에 강수량이 가장 높은 계절 경향성을 나타내며 2003~2013년까지 연총강수량은 평균 1598.90 mm로서 우리나라 연총강수량보다 높게 나타났다으나 2014년 연총강수량은 486.78 mm로서 2003~2013년 대비 약 30% 정도의 강수량만 발생하였다.

다음으로 북한 황강댐 운영에 따른 우리나라 임진강 유역 내 유량변동을 파악하기 위하여 북한 황강댐이 건

설되어 운영되기 시작한 2007년을 기준으로 하여 군남, 적성, 전곡관측소의 유량자료의 변화를 분석하였다.

① 군남관측소

우선 2003년 1월부터 2015년 7월까지 군남관측소의 관측유량을 살펴보면, 북한 황강댐의 담수가 시작된 2008년을 기준으로 이전에는 월평균 유량이 46.29 m<sup>3</sup>/s 이었으나 2008년 이후에는 월평균 유량이 24.03 m<sup>3</sup>/s로 감소하여 유량이 약 48% 감소하였다. 또한 표준편차도 2008년 이전에는 41.67 m<sup>3</sup>/s이었으나 2008년 이후에는 20.34 m<sup>3</sup>/s로 변동폭이 매우 감소한 것으로 나타났다(〈Table 3〉 참조). 〈Figure 5〉는 황강댐 담수 이전과 이후의 갈수기 관측유량의 경향성을 나타낸 그림이며, 황강댐 담수 이전(Fig. 5(a))에는 유량이 증가추세였으나 담수를 시작한 2008년 이후(〈Figure 5〉(b))에는 유량이 유의한 수준(유의수준 95%)에서 감소하는 것으로 나타났다. 이는 군남관측소 갈수기 유량이 황강댐 담수가 시작된 이후에 황강댐으로부터 유량이 하류로 흘러 내려오지 않아 유량이 감소하는 것으로 판단된다.

② 전곡관측소

전곡관측소의 갈수기 전체 월평균은 18.72 m<sup>3</sup>/s로 산정되었으며, 전체기간의 경향성은 감소추세이나 유의

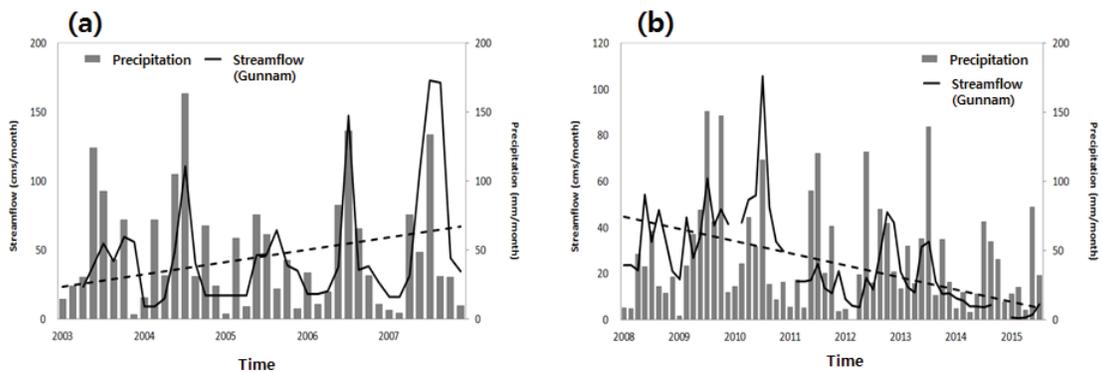


Figure 5. Monthly average streamflow trend analysis in the Gunnam station: (a) Before the dam operation, (b) After the dam operation

Table 3. Statistics in low-flow period for the Gunnam station

Statistic	Total period (2003~2013)	Before operating Hwanggang dam (~2008)	After operating Hwanggang dam (2008~)
Average(m <sup>3</sup> /s)	33.65	46.29	24.03
Standard deviation(m <sup>3</sup> /s)	31.93	41.67	20.34

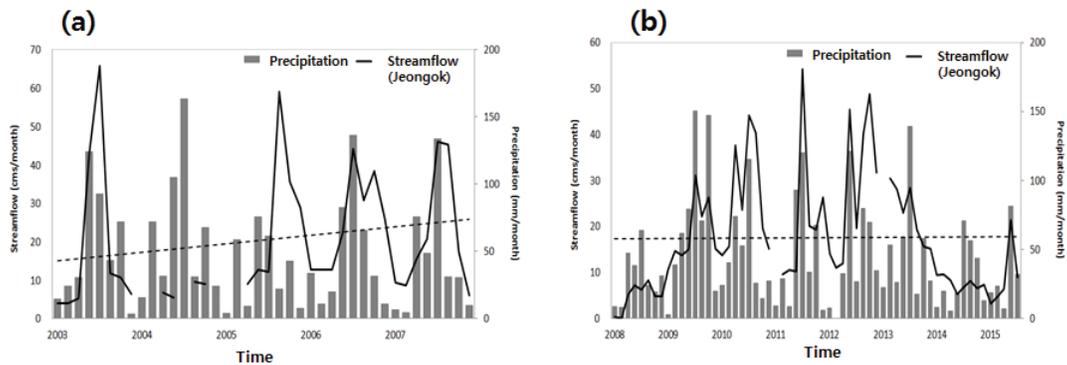


Figure 6. Monthly average streamflow trend analysis in the Jeongok station: (a) Before the dam operation, (b) After the dam operation

Table 4. Statistics in low-flow period for the Jeongok station

Statistic	Total period (2003~2013)	Before operating Hwanggang dam (~2008)	After operating Hwanggang dam (2008~)
Average(m <sup>3</sup> /s)	18.72	20.75	17.55
Standard deviation(m <sup>3</sup> /s)	12.76	16.86	12.76

한 수준은 아닌 것으로 나타났다. 2008년 기준으로 유량 변화를 살펴보면, 2008년 이전에는 월평균 유량이 20.75 m<sup>3</sup>/s로 갈수기 전체 평균에 비해 약 2 m<sup>3</sup>/s 정도 큰 것으로 산정되었으며, 2008년 이후에는 17.55 m<sup>3</sup>/s로 갈수기 전체 평균보다 작게 나타났다. 또한 2008년 이전 표준편차는 16.86 m<sup>3</sup>/s이었으나 2008년 이후에는 12.76 m<sup>3</sup>/s로 다소 낮아져 갈수기유량의 변동성이 감소한 것으로 나타났다(〈Table 4〉 참조). 〈Figure 6〉을 살펴보면, 황강댐 담수 이전에는 유량이 유의하지 않은 수준에서 증가추세를 보였으며, 담수를 시작한 2008년

이후에는 유량변화가 거의 없이 이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 전곡관측소 위치가 임진강 상류가 아닌 한탄강 유역에 위치하므로 북한 황강댐 담수의 영향을 받지 않기 때문으로 판단된다.

③ 적성관측소(비룡대교)

마지막으로 2008년을 기준으로 적성관측소의 유량 변화를 살펴보면, 2008년 이전에는 월평균 유량이 105.88 m<sup>3</sup>/s였으나 이후에는 52.39 m<sup>3</sup>/s로 약 51% 감소한 것으로 나타났다. 표준편차는 2008년 이전에는

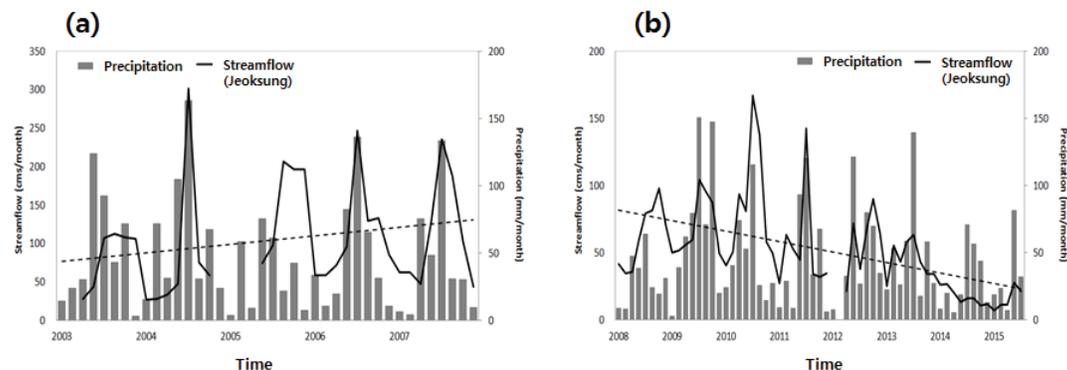


Figure 7. Monthly average streamflow trend analysis in the Jeoksung station: (a) Before the dam operation, (b) After the dam operation

Table 5. Statistics in low-flow period for the Jeoksung station

Statistic	Total period (2003~2013)	Before operating Hwanggang dam (~2008)	After operating Hwanggang dam (2008~)
Average(m <sup>3</sup> /s)	71.94	105.88	52.39
Standard deviation(m <sup>3</sup> /s)	56.12	70.10	33.70

70.10 m<sup>3</sup>/s이었으나 이후에는 33.70 m<sup>3</sup>/s로 매우 크게 낮아져 갈수기 유량 변동폭이 매우 감소한 것으로 나타났다(〈Table 5〉 참조). 특히 〈Figure 7〉을 살펴보면, 황강댐 담수 이전에는 유량이 증가추세였으나, 담수를 시작한 2008년 이후에는 유량이 유의한 수준(유의수준 95%)에서 감소하는 것으로 나타났다. 이는 군남관측소와 마찬가지로 적성관측소의 갈수기 유량이 황강댐 담수로 인하여 영향을 받는다는 것을 의미한다.

위의 군남, 전곡, 적성관측소 관측 강수와 유량분석 결과들을 종합해보면, 임진강 유역 전체의 총 유량은 크게 변하지 않았으며, 이는 홍수기에는 유량이 다소 증가하고 갈수기에는 유량이 감소하기 때문으로 분석되었다. 갈수기는 유량이 뚜렷하게 감소하는 것으로 나타나 향후 갈수기 임진강 유역의 물 부족에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 또한 북한 황강댐 담수로 인한 갈수기 유량 감소를 확인하였다. 전곡관측소의 유량변동을 분석하면, 한탄강 유역에서 발생하는 관측유량의 변동은 거의 없는 것으로 판단되나, 임진강 상류에서 북한 댐건설로 인한 갈수기 유량 감소가 임진강 하류까지 영향을 주는 것으로 분석되었다.

## 2. 주요 지점별 갈수량 추정

다음으로 본 논문에서는 임진강 유역에서 북한 댐건설에 의한 영향을 많이 받는 주요 지점들(군남, 적성, 전곡관측소)에 대하여 하천유지유량을 검토하였다. 이를 위해 우리나라 하천유지유량으로 사용 중인 평균갈수량(average low flow)을 추정하고 빈도별 평균갈수량도 산정하였다. 빈도별 평균갈수량을 산정하기 위해 355일 유지유량에 대하여 probability plot 방법을 사용하였다. 이 중 Blom의 plotting position 공식을 적용하였으며, 기본 식은 다음과 같다.

$$q_i = \frac{i - 3/8}{n + 1/4} \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $n$ 는 자료 전체의 수,  $i$ 는 내림차순정렬시의 순위이다. 산정과정을 살펴보면, 우선 plotting position

을 이용하여 해당 지점의 매년 일유량에서 초과확률 97%(355일)를 만족하는 일유량을 선정하며, 이 값이 355일 유지유량이다. 다음으로 매년 산정된 355일 유지유량을 산술평균하여 평균갈수량을 산정한다. 각 지점별 평균갈수량 산정결과는 다음과 같다.

### 1) 군남관측소

우선 임진강 유역 상류이면서 군남댐 하류에 위치한 군남관측소의 유량 자료를 이용하여 분석하였으며, 분석결과는 〈Table 6(a)〉와 같다. 평균갈수량을 살펴보면, 전체기간의 평균갈수량은 17.09 m<sup>3</sup>/s이나 2014년과 2015년 355일 유지유량은 0.68 m<sup>3</sup>/s과 0.93 m<sup>3</sup>/s로서 전체기간 평균갈수량 대비 평균 4.7%로 밖에 되지 않았다. 빈도별 평균갈수량을 살펴보면, 전체기간에 대한 10년과 30년 빈도 평균갈수량은 각각 25.19 m<sup>3</sup>/s와 20.12 m<sup>3</sup>/s로 산정되었다. 또한 2001~2014년까지 빈도별 평균갈수량은 10년 빈도와 30년 빈도는 각각 22.25 m<sup>3</sup>/s와 14.16 m<sup>3</sup>/s이며, 2001~2015년 경우의 10년과 30년 빈도는 각각 21.42 m<sup>3</sup>/s와 13.80 m<sup>3</sup>/s로서 빈도별 평균갈수량이 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 2014년과 2015년의 355일 유지유량이 이전보다 매우 작기 때문으로 판단된다.

다음으로 북한댐 운영에 따른 평균갈수량과 평균갈수량의 빈도를 비교하였다. 북한 황강댐 담수 이전인 2001년부터 2007년까지 평균갈수량은 20.81 m<sup>3</sup>/s였으나 담수 이후인 2008년부터 2013년까지 갈수량은 12.74 m<sup>3</sup>/s로 감소한 것으로 산정되었다. 다음으로 빈도별 평균갈수량을 살펴보면, 10년 빈도 평균갈수량에서는 담수 이전에는 29.14 m<sup>3</sup>/s이었으나 담수 이후에는 23.07 m<sup>3</sup>/s로 감소하였으며, 30년 빈도에서도 담수 이전과 이후가 각각 20.24 m<sup>3</sup>/s와 14.51 m<sup>3</sup>/s로서 북한 황강댐이 담수를 시작한 이후 빈도별 평균갈수량이 감소함을 알 수 있다.

### 2) 적성관측소

임진강 유역 합류지점 하류에 위치한 적성관측소의

Table 6. Average low-flows by frequency

(a) Gunnam						
Low-flow	Total period <sup>1</sup>	2014	2015	Period#1 <sup>2</sup>	Period#2 <sup>3</sup>	
Average low-flow (m <sup>3</sup> /s)	17.09	0.68(4.0%) (355Q)	0.93 (355Q)	20.81	12.74	
Average low-flow by frequency (m <sup>3</sup> /s)	10-year	25.19	22.25 (included 2001-2014)	21.42 (included 2001-2015)	29.14	23.07
	30-year	20.12	14.16 (included 2001-2014)	13.80 (included 2001-2015)	20.24	14.51
(b) Jeoksung						
Low-flow	Total period	2014	2015	Period#1	Period#2	
Average low-flow (m <sup>3</sup> /s)	33.37	7.65(22.9%) (355Q)	5.38 (355Q)	46.84	27.99	
Average low-flow by frequency (m <sup>3</sup> /s)	10-year	62.65	48.08 (included 2001-2014)	45.84 (included 2001-2015)	63.75	38.20
	30-year	40.61	39.77 (included 2001-2014)	39.05 (included 2001-2015)	41.23	33.17
(c) Jeongok						
Low-flow	Total period	2014	2015	Period#1	Period#2	
Average low-flow (m <sup>3</sup> /s)	7.40	3.47(46.89%) (355Q)	2.35 (355Q)	6.92	7.81	
Average low-flow by frequency (m <sup>3</sup> /s)	10-year	11.58	11.44 (included 2001-2014)	11.30 (included 2001-2015)	10.88	12.27
	30-year	8.97	8.38 (included 2001-2014)	8.37 (included 2001-2015)	8.47	10.15

1. Total period: from 2001 to 2013

2. Period#1(before operating Hwanggang Dam): from 2001 to 2007

3. Period#2(after operating Hwanggang Dam): from 2008 to 2013

자료를 분석하였으며, 분석결과는 <Table 6(b)>와 같다. 전체기간의 평균갈수량은 33.37 m<sup>3</sup>/s로 산정되었으며, 2014년과 2015년 355일 유지유량은 각각 7.65 m<sup>3</sup>/s(전체 대비 22.9%)와 5.38 m<sup>3</sup>/s(전체 대비 16.12%)로 나타나 2014년과 2015년 임진강 하류 지역의 물 부족이 매우 심각함을 알 수 있다. 전체기간에 대한 10년 빈도 평균갈수량은 62.65 m<sup>3</sup>/s, 30년 빈도는 40.61 m<sup>3</sup>/s로 산정되었으며, 2001~2014년 빈도별 평균갈수량은 10년 빈도와 30년 빈도 각각 48.08 m<sup>3</sup>/s와 39.77 m<sup>3</sup>/s이며, 2001~2015년 10년과 30년 빈도 평균갈수량은 각각 45.84 m<sup>3</sup>/s와 39.05 m<sup>3</sup>/s로서 빈도별 평균갈수량이 점차 감소하는 것으로 나타났다. 특히 전체기간에 비하여 2014년과 2015년에 대한 10년 빈도 평균갈수량의 감소폭이 약 23%나 되었다.

다음으로 북한댐 운영에 따른 평균갈수량과 빈도별 평균갈수량을 살펴보면, 북한 황강댐 담수 이전인 2000년부터 2007년까지 평균갈수량은 46.84 m<sup>3</sup>/s였으나 2008년부터 2013년까지 갈수량은 27.99 m<sup>3</sup>/s로 감소한 것으로 산정되었다. 또한 10년 빈도 평균갈수량

에서는 담수 이전에는 63.75 m<sup>3</sup>/s이었으나 담수 이후에는 38.20 m<sup>3</sup>/s로 감소하였으며, 30년 빈도에서도 담수 이전과 이후가 각각 41.23 m<sup>3</sup>/s와 33.17 m<sup>3</sup>/s로서 북한 황강댐이 담수를 시작한 이후 빈도별 평균갈수량이 감소함을 알 수 있다.

### 3) 전곡관측소

한탄강 유역에 위치한 전곡관측소의 자료를 분석하였으며, 분석결과는 <Table 6(c)>와 같다. 전체기간의 평균갈수량은 7.40 m<sup>3</sup>/s로 산정되었으며, 2014년 355일 유지유량은 3.47 m<sup>3</sup>/s로 산정되어 전체기간 평균갈수량 대비 약 46.89%로 밖에 되지 않았고 2015년 355일 유지유량은 2.35 m<sup>3</sup>/s로서 2014년보다도 적게 산정되었다. 또한 전체기간에 대한 10년 빈도 평균갈수량은 11.58 m<sup>3</sup>/s, 30년 빈도는 8.97 m<sup>3</sup>/s로 산정되었으며, 2001~2014년 빈도별 평균갈수량은 10년 빈도와 30년 빈도 각각 11.44 m<sup>3</sup>/s와 8.38 m<sup>3</sup>/s이며, 2001~2015년 10년과 30년 빈도 평균갈수량은 각각 11.30 m<sup>3</sup>/s와 8.37 m<sup>3</sup>/s로서 빈도별 평균갈수량이 조금 감소하는 것

으로 나타났다.

다음으로 북한댐 운영에 따른 평균갈수량과 평균갈수량의 빈도를 비교하면, 평균갈수량과 10년 빈도 및 30년 빈도 평균갈수량이 담수 이전보다 담수 이후에 다소 증가한 것으로 산정되었다. 이는 전곡관측소는 한탄강 유역에 위치하므로 북한 댐건설과는 연관이 없는 것을 다시 확인하였다.

### 3. 임진강 유역 물 부족량 산정

본 논문에서는 기존 다양한 보고서에서 제안된 임진강 유역의 하천유지유량을 조사하였으며, 기존 제안된 하천유지유량은 임진강과 한탄강 합류후인 임진강하류 혹은 적성관측소를 기준으로 산정된 값이다. 경기개발연구원(2014)에 따르면 한국농어촌공사에서는 임진강 유역의 농업활동을 위해 최소 22.9 m<sup>3</sup>/s의 하천유지유량을 요구하고 있으며, 이를 바탕으로 경기개발연구원에서는 ‘임진강 유량감소 실태와 대응방안’ 보고서에서 임진강 유역에 대한 하천유지유량을 최대 23 m<sup>3</sup>/s까지 제안하고 있다. 또한 Ministry of Construction & Transportation(2006)의 ‘수자원장기종합계획(Water Vision 2020)’에서는 임진강 유역 하천유지유량을 18.7 m<sup>3</sup>/s로 제안하고 있으며, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011)의 임진강하천기본계획에서는 하천유지유량(갈수량)을 20.0 m<sup>3</sup>/s로 산정하고 있다. 전체적으로 임진강 유역에서는 하천유지유량으로 19~23.0 m<sup>3</sup>/s 정도의 유량이 필요한 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 적성관측소 유량자료를 이용하여 산정한 평균갈수량과 각 기관별 보고서의 하천유지유량과 비교하였으며, 결과는 <Table 7>과 같다. 본 연구에

서는 2001년부터 2013년 평균갈수량은 33.37 m<sup>3</sup>/s로 추정되었으며, 각 기관별 하천유지유량과 비교하면 11.05 m<sup>3</sup>/s에서 15.35 m<sup>3</sup>/s까지 많은 것으로 산정되었다. 하지만 2014년 355일 하천유지유량과 비교하면, 북한댐 운영의 영향과 2014년 강수가 예년에 비해 약 40% 정도 밖에 내리지 않은 영향으로 유량이 감소하여 최소 11.05 m<sup>3</sup>/s에서 최대 15.35 m<sup>3</sup>/s까지 부족한 것으로 나타났다.

다음으로 북한 황강댐 담수 이전과 담수 이후로 나누어 본 연구의 평균갈수량과 각 기관별 하천유지유량과 비교하였으며, 임진강에서의 필요수량을 산정하기 위해 하천유지유량과 생공농용수 필요수량을 이용하였다. 생공농용수 필요수량은 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr) 자료를 이용하여 직접 산정하였다. 농업용수(유효수량 미포함)의 경우에 임진강 유역에서 직접 농업용수를 취수하는 파주, 동두천, 포천, 연천의 논과 밭 사용량을 이용하였으며, 공업용수의 경우 상수도, 공업용수도, 공단지차 취수시설 등 용수공급 수원 및 공급체계가 매우 복잡하여 이를 세세하게 분류하기는 한계가 있어 최대개념으로 모든 지역의 공업용수 이용량을 포함하였다. 마지막으로 생활용수는 광역상수도로 공급받는 지역을 제외한 모든 지역을 포함하였다. 이러한 과정을 통하여 산정된 임진강 유역의 농업용수는 평균 6.10 m<sup>3</sup>/s, 공업용수는 평균 0.22 m<sup>3</sup>/s, 생활용수는 평균 3.56 m<sup>3</sup>/s로서, 전체 생공농용수 필요수량은 9.88 m<sup>3</sup>/s이다.

<Table 8>은 본 논문에서 산정한 평균갈수량과 생공농용수 필요수량까지 합한 결과와 기 산정된 각 보고서와 비교한 결과이다. 북한 황강댐 담수 이전의 평균갈

Table 7. Comparison of instream flows between this study and other previous reports

Division	This study (m <sup>3</sup> /s)		Instream flow (m <sup>3</sup> /s)		
	2014's 355Q	Average low-flow (2001~2013)	①	②	③
Jeoksung station	7.65	33.37	18.7	20.0	23.0
Difference of instream flow between this study and other previous reports	-	25.72	-11.05	-12.35	-15.35

① Ministry of Construction and Transportation (2006)  
 ② Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs (2011)  
 ③ Gyeonggi Research Institute (2015)

Table 8. Comparison of instream flows between this study and other reports before/after operating the Hwanggang dam

Division (Jeoksung)		This study (m <sup>3</sup> /s)		Instream flow + Water demand for living, industry and agriculture (9.88 m <sup>3</sup> /s)	
		Period#1 <sup>1</sup>	Period#2 <sup>2</sup>	Period#1	Period#2
Hwanggang Dam (Average low-flow)		46.84	27.99	-	-
Difference of instream flow between this study and previous reports (m <sup>3</sup> /s)	①	28.14	9.29	18.26	-0.59
	②			16.96	-1.89
	③			13.96	-4.89

- 1. Period#1: before operating Hwanggang dam (2001~2007)
- 2. Period#2: after operating Hwanggang dam (2001~2007)
- ① Ministry of Construction and Transportation (2006): Total=28,58m<sup>3</sup>/s
- ② Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs (2011): Total=29,88m<sup>3</sup>/s
- ③ Gyeonggi Research Institute (2015): Total=32,88m<sup>3</sup>/s

Table 9. Comparison of water deficit according to the reference flow in emergency: 2014's case

Reference flow (Jeoksung station)	2014's 355Q	Water deficit	Volume (million m <sup>3</sup> )
20 m <sup>3</sup> /s (Instream flow)	7.65 m <sup>3</sup> /s	12.35 m <sup>3</sup> /s	365-day: 389.5 75-day: 80
29.88 m <sup>3</sup> /s (Instream flow + Water demand for living, industry and agriculture)	7.65 m <sup>3</sup> /s	22.23 m <sup>3</sup> /s	365-day: 701 75-day: 144

- 1. 75-day: Spring period(from March 1 to May 14)(Gyeonggi Research Institute, 2015)

수량은 46.84 m<sup>3</sup>/s로 각 기관별 하천유지유량보다 최소 23.84 m<sup>3</sup>/s에서 최대 28.14 m<sup>3</sup>/s까지 많게 산정되었으며, 황강댐 담수 이후의 평균갈수량은 27.99 m<sup>3</sup>/s로서 각 기관별 하천유지유량보다 많아 물 부족이 발생하지 않았다. 그러나 각 기관별로 제안한 하천유지유량과 임진강 유역에 필요한 생공농용수 필요수량 9.88 m<sup>3</sup>/s을 합한 값과 비교한 결과, 수장기 기준으로 0.59 m<sup>3</sup>/s, 임진강하천기본계획 기준 1.89 m<sup>3</sup>/s, 경기개발연구원 기준 4.89 m<sup>3</sup>/s의 유량이 부족한 것으로 분석되었으며, 이를 연간(365일)로 환산하면 각각 18.6백만 m<sup>3</sup>, 59.6백만 m<sup>3</sup>, 154.2백만 m<sup>3</sup>으로 분석되었다. 또한 임진강하천기본계획의 하천유지유량 20 m<sup>3</sup>/s와 본 논문에서에서 분석한 생공농용수 필요수량을 9.88 m<sup>3</sup>/s를 기준으로 평상시 임진강 유역에 필요한 유량을 29.88 m<sup>3</sup>/s로 가정하고, 각 기관별 하천유지유량과 비교하면, 임진강 유역의 유량이 최소 6.98 m<sup>3</sup>/s에서 최대 11.18 m<sup>3</sup>/s까지 추가적으로 확보되어야만 하천유지와 생공농용수 필요수량을 충족할 수 있는 것으로 분석되었다.

특히 강수부족으로 인한 비상시인 2014년을 살펴보면, 임진강 기본계획의 하천유지유량 20 m<sup>3</sup>/s를 기준으

로 12.35 m<sup>3</sup>/s가 부족하며, 이를 연간 환산시 389.5백만 m<sup>3</sup>, 농번기인 봄철(3월 1일~5월 14일) 갈수기 기준으로 80백만 m<sup>3</sup>의 물 부족이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 하천유지유량에 생공농용수 필요수량까지 고려한 29.88 m<sup>3</sup>/s을 기준으로는 22.23 m<sup>3</sup>/s가 부족하며, 이를 연간 환산하면 701백만 m<sup>3</sup>, 봄철 갈수기 기준으로 144백만 m<sup>3</sup>의 물이 부족한 것으로 추정되었다. 즉, 하천유지유량 기준의 80백만 m<sup>3</sup>과 하천유지유량 및 생공농용수 필요수량 기준의 144 백만 m<sup>3</sup>은 물 부족량이며, 하천유지유량을 위해서는 80백만 m<sup>3</sup>의 물이 확보되어야 하며, 하천유지유량을 기본으로 생공농용수까지 공급하기 위해서는 144백만 m<sup>3</sup>의 물이 확보되어야 한다.

#### 4. 갈수기 유량 감소 대응방안

앞 장에서 분석한 바와 같이, 저수지나 각 수리시설이 현재와 같이 운영이 되는 경우에는 북한댐 담수로 인해 임진강 유역은 갈수기에 지속적으로 물 부족이 발생할 것으로 판단되며, 특히 2014년부터 2015년 최근 까지 이어지는 기상현상이 다시 발생하는 경우에는 기존 물 부족에 더해 극심한 물 부족이 해소되지 않을 것

으로 예상된다. 따라서 갈수기에 대비하여 용수 수요에 따른 대비를 미리 해야 할 필요성이 심각히 대두된다. 본 장에서는 임진강 갈수기 물 부족을 해결하기 위한 방안으로 임진강 유역에 위치한 군남홍수조절지와 한탄강홍수조절댐 등의 기존 수공구조물을 활용하는 방안에 대해 살펴보았다.

현재 파주시, 경기도청, 한국농어촌공사 등 관련기관에서 한국수자원공사에 농업용수와 하천유지용수 등을 확보하기 위해 두 댐의 활용에 대한 제안을 하고 있는 실정이며, 두 댐은 치수목적의 이수기 활용에 초점이 맞추어져 있으나 임진강 유역의 물 부족 문제가 심각함에 따라 이수기 뿐만 아니라 갈수기 운영방안에 대해서도 고려할 필요성이 제기되고 있다. 이에 따라 군남홍수조절지와 한탄강홍수조절댐의 최대저수량, 이수기 및 갈수기 운영방안 등을 고려하여 하천유지용수 공급 가능성을 검토하고자 한다. 물 부족량을 확보하기 위해 임진강 유역에 위치한 군남홍수조절지와 한탄강홍수조절댐 답수방안을 아래와 같이 두 가지 조건으로 살펴보았다.

조건 1: 한탄강홍수조절댐만을 단독으로 활용하는 방안

조건 2: 한탄강홍수조절댐과 군남홍수조절지를 연계하여 운영하는 방안

1) 조건 1: 한탄강홍수조절댐 단독 운영 방안

한탄강홍수조절댐을 단독으로 운영하는 조건 하에 물 부족을 대비할 수 있는 경우를 살펴보았으며, 그 결과는 <Table 10>과 같다. 우선 평시에 365일 동안 하천

유지유량과 생공농용수를 같이 공급하기 위해서는 현재 임진강 유역의 유량으로는 59.6백만 m<sup>3</sup>정도 물 부족이 발생하므로 이를 확보하기 위해서는 한탄강홍수조절댐 저수위를 최대 EL.90.0 m까지 높여 운영하여야 한다. 이러한 경우 확보 가능한 유효저수량은 61.0백만 m<sup>3</sup>으로 물 부족량을 확보하고도 여유로운 운영이 가능할 것으로 추정되었다. 또한 평시에 봄철 갈수기 기간인 75일을 기준으로 하는 경우에는 물 부족량이 12.2백만 m<sup>3</sup>으로 한탄강홍수조절댐 저수위는 최대 EL.70.0 m로 운영이 필요하며, 이러한 경우 확보 가능한 유효저수량은 16.7백만 m<sup>3</sup>이다.

다음으로 2014년과 같이 강수발생이 평년보다 매우 적은 비상시에 필요한 운영을 살펴보면, 먼저 하천유지유량만을 유지하고자 하는 경우에는 389.5백만 m<sup>3</sup>의 물 부족이 발생하게 된다. 이 물 부족은 확보하기 위해서는 한탄강홍수조절댐 최고 수위인 EL.125.0 m까지 저수위를 높여야 하며, 확보 가능한 유효저수량은 464.7백만 m<sup>3</sup>이다. 하지만 저수지운영에서도 최고 수위까지 물을 저수하는 것은 매우 제한적인 상황이므로 이러한 경우에는 군남홍수조절지와 연계운영이 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 하천유지유량과 생공농용수를 공급하는 경우에 발생하는 물 부족은 701백만 m<sup>3</sup>이며 이는 한탄강홍수조절댐만으로는 확보가 쉽지 않으며, 군남홍수조절지와 연계하더라도 물 부족량을 확보하기는 어렵다. 하지만 701백만 m<sup>3</sup>은 발생할 가능성이 매우 낮다고 할 수 있다. 또한 2014년, 2015년 가뭄이 지속되는 비상시의 경우는 생공농용수에서 봄철 갈수기 기간인 75일만 공급하는 경우에 물 부족량이

Table 10. Single dam operation condition in Hantangang dam

Condition	Content	Water deficit (million m <sup>3</sup> )	Required reservoir water level (EL, m)	Available water supply (million m <sup>3</sup> )
Normal	I+W <sup>1</sup>	59.6 (365-day)	maximum 90.0	61.0
	I+W	12.2 (75-day)	maximum 70.0	16.7
Emergency (2014's)	I <sup>2</sup>	389.5 (365-day)	maximum 125.0	464.7
		80 (75-day)	maximum 95.0	83.1
	I+W	701 (365-day)	125.0	464.7
		144 (75-day)	maximum 105.0	156.4

1. I+W: Instream flow + Water demand for living, industry and agriculture

2. I: Instream flow

144백만  $m^3$ 이다. 이러한 경우 한탄강홍수조절댐 저수위는 최대 EL.105.0 m까지 높여 운영할 필요가 있으며 확보 가능한 유효저수량은 156.4백만  $m^3$ 이나, 이 또한 댐의 운영 조건 상 현실적으로 발생가능성이 매우 낮을 것으로 판단된다.

## 2) 조건 2: 한탄강홍수조절댐과 군남홍수조절지 연계 운영 방안

한탄강홍수조절댐과 군남홍수조절지를 연계 운영하는 조건 하에 물 부족을 대비할 수 있는 경우를 살펴본다. 먼저 군남홍수조절지 저수위를 상시만수위인 EL.31.0 m에서 운영하는 조건으로 가정하였다(〈Table 11(a)〉 참조). 평시에 365일 동안 하천유지유량과 생공농용수를 같이 공급하기 위해서는 임진강 유역에서 59.6백만  $m^3$  정도의 물을 확보하여야 하며, 이를 위해서는 한탄강홍수조절댐 저수위는 최대 EL.85.0 m, 군남홍수조절지는 EL.31.0 m로 운영하여야 한다. 이러한 경우 확보 가능한 유효저수량은 약 58.5백만  $m^3$ 으로 물 부족량을 만족하게 된다. 또한 평시 봄철 갈수기 기간인 75일을 기준으로 하는 경우 황강댐 담수 이후 물 부족량은 12.2백만  $m^3$ 으로 군남홍수조절지 EL.31.0 m로 확보할 수 있는 유효저수량인 13.3백만  $m^3$  만으로도 유량 확보가 가능할 것으로 산정되었다.

2014년과 2015년과 같은 극한 가뭄 비상시 필요한 운영을 살펴보면, 봄철 갈수기 기간인 75일 기준으로 살펴보면, 한탄강홍수조절댐은 EL.90.0 m, 군남홍수조절지는 EL.31.0 m로 운영하여야 하며, 확보 가능한 수량은 74.3백만  $m^3$ 으로 물 부족량보다 5.7백만  $m^3$ 가 부족하다. 다음으로 하천유지유량과 생공농용수를 모두 공급하는 경우에 발생하는 물 부족은 365일 기준으로 701백만  $m^3$ 이고, 이를 확보하기 위해 한탄강홍수조절댐 저수위 최대인 EL.125.0 m까지 높여 운영하여야 한다. 하지만 물 부족량이 매우 크기 때문에 한탄강홍수조절댐과 군남홍수조절지가 연계운영하여도 이를 만족하기에는 매우 부족한 상황이다. 물론 이러한 상황은 발생가능성이 매우 낮고, 댐 운영 측면에서도 현실적인

방법이 아니라고 판단된다. 봄철 갈수기 기간인 75일만 공급하는 경우에는 물 부족량이 144백만  $m^3$ 이고, 이 때 한탄강홍수조절댐 저수위는 EL.100.0 m, 군남홍수조절지는 EL.31.0 m로 운영할 필요가 있으며 확보 가능한 유효저수량은 127.6백만  $m^3$ 이다. 이 경우에도 물 부족량보다 16.4백만  $m^3$ 가 부족하며, 물공급량을 다소 제한적으로 공급해야 한다.

두 번째로 군남홍수조절지 저수위를 EL.25.0 m에서 운영하는 조건으로 가정하였으며(〈Table 11(b)〉 참조), 군남홍수조절지에서 확보 가능한 유효저수량은 1.8백만  $m^3$ 이다. 평시 365일 기준으로 하천유지유량과 생공농용수 필요량인 59.6백만  $m^3$ 을 모두 확보하기 위해서는 한탄강홍수조절댐 필요 저수위는 최대 EL.90.0 m로 운영해야 하며, 확보가능 유효저수량은 62.7백만  $m^3$ 으로 다소 여유있게 물 운영을 할 수 있다. 봄철 갈수기 기간인 75일 기준으로 물 부족량을 확보하기 위해서 한탄강홍수조절댐은 최대 EL.65.0 m로 저수위를 높여야 하며, 확보가능 저수량은 12.5백만  $m^3$ 이다. 다음으로 비상시를 살펴보면, 하천유지유량만을 확보하는 경우에 365일 기준으로 한탄강홍수조절댐은 저수위를 최대 EL.125.0 m까지 높여야 하며, 확보 가능한 유효저수량은 466.4백만  $m^3$ 이다. 봄철 갈수기 기간인 75일 기준으로 한탄강홍수조절댐은 최대 EL.95.0 m의 저수위를 확보하여야 하며, 확보가능 유효저수량은 84.9백만  $m^3$ 이다. 하천유지유량과 생공농용수 필요량을 모두 확보하여야 하는 경우에 365일동안 물 부족이 발생하는 상황에서는 701백만  $m^3$ 의 물 부족이 발생하며, 한탄강홍수조절댐은 저수위를 최대 EL.125.0 m로 운영하여야 하고 확보 가능한 유효저수량은 466.4백만  $m^3$ 이다. 이는 물 부족량에 매우 미치지 못하는 양이나 현실적으로 이러한 상황이 발생할 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다. 봄철 갈수기 기간인 75일 기준으로 한탄강홍수조절댐은 저수위를 최대 EL.105.0 m를 확보하여야 하며, 확보 가능한 저수량은 158.2백만  $m^3$ 이다. 비상시 365일 하천유지유량과 생공농용수 물 부족이 발생하는 경우를 제외한 모든 경우에 한탄강홍수조절댐과 군남홍

Table 11. Conjunctive dam operation condition in Hantangang dam and Gunnam dam(Normal pool level in Gunnam dam)

(a) Normal pool level in Gunnam Dam: EL. 31.0m

Condition	Content	Water deficit (million m <sup>3</sup> )	Hantangang Dam		Gunnam Dam	
			Required reservoir water level (EL, m)	Available water supply (million m <sup>3</sup> )	Required reservoir water level (EL, m)	Available water supply (million m <sup>3</sup> )
Normal	I+W	59.6 (365-day)	maximum 85.0	45.2	31.0	13.3
	I+W	12.2 (75-day)	-	-	31.0	13.3
Emergency (2014's)	I	389.5 (365-day)	120.0	365.6	31.0	13.3
		80 (75-day)	90.0	61	31.0	13.3
	I+W	701 (365-day)	125.0	464.7	31.0	13.3
		144 (75-day)	100.0	114.3	31.0	13.3

(b) low level in Gunnam Dam: EL. 31.0m

Condition	Content	Water deficit (million m <sup>3</sup> )	Hantangang Dam		Gunnam Dam	
			Required reservoir water level (EL, m)	Available water supply (million m <sup>3</sup> )	Required reservoir water level (EL, m)	Available water supply (million m <sup>3</sup> )
Normal	I+W	59.6 (365-day)	maximum 90.0	61.0	25	1.8
	I+W	12.2 (75-day)	maximum 65.0	10.8	25	1.8
Emergency (2014's)	I	389.5 (365-day)	maximum 125.0	464.7	25	1.8
		80 (75-day)	maximum 95.0	83.1	25	1.8
	I+W	701 (365-day)	125.0	464.7	25	1.8
		144 (75-day)	maximum 105.0	156.4	25	1.8

수조절지 연계 운영에 의해 물 부족량보다 여유롭게 수량확보가 가능하다. 하지만 군남홍수조절지 저수위인 EL.25.0 m에 의한 저수확보량이 매우 작기 때문에 한탄강홍수조절댐 단독 운영 조건과 동일한 것으로 계산되었다.

하지만 본 논문에서 제안한 댐 운영 조건 변경은 군남댐과 한탄강댐의 본 목적이 치수이므로 이를 변경해야 하는 절차가 필요하며, 사회적 합의과정이 선행되어야 한다. 이를 위해 강원도, 경기도 각 지역의 이해당사자, 전문가 집단, 사회단체들의 의견과 논의과정이 필요하다고 판단된다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 임진강 유역의 물 부족 발생 원인을 분석하고 이에 대응할 수 있는 방안을 제안하고자 하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

임진강 유역의 물 부족 원인을 분석하기 위해 강수량 감소와 북한댐 운영에 의한 영향으로 나누어 분석하였다. 강수량 감소에 의한 영향을 분석한 결과, 최근 10년

간 강수량은 평균 1554.4 mm이나 2014년에는 680.6 mm (평균 대비 54.7%)로 매우 적게 발생하였고, 특히, 여름철(6월~9월) 강수는 마른 장마에 의해 최근 10년 대비 37.5% 밖에 되지 않는 것으로 분석되었다. 이에 따라 연 유출량(유출율)도 군남, 전곡, 적성관측소 각각 기존 기간 대비 4.91%(15.15%), 32.61%(46.15%), 5.45%(28.95%)로서 매우 감소하였다. 2014~2015년 연강수량의 감소는 임진강 유역 물 부족의 중요한 원인 중 하나로 분석되었다. 또한 북한 황강댐 운영에 따른 우리나라 임진강 유역 내 유량변동을 파악하기 위하여 북한 황강댐이 운영되기 시작한 2007년을 기준으로 하여 군남, 적성, 전곡관측소의 유량자료의 변화를 분석하였다. 분석 결과, 담수 이전 대비 담수 이후 평균유량이 군남, 전곡, 적성관측소 각각 51.98%, 84.58%, 46.48%로 모두 감소한 것으로 분석되어 북한댐 운영이 임진강 하류까지 영향을 주는 것으로 분석되었다.

다음으로 임진강 유역의 하천유지유량 검토를 위해 평균갈수량과 빈도별 평균갈수량을 산정하였다. 군남, 적성, 전곡관측소 모두 2014년과 2015년 355일 유지유량이 전체기간 평균갈수량보다 매우 감소하는 것으로

나타났으며, 특히 북한댐 운영에 직접적인 영향을 받는 군남과 적성관측소의 평균갈수량이 운영 이전에는 각각 20.81 m<sup>3</sup>/s와 46.84 m<sup>3</sup>/s이었으나 운영 이후 각각 12.74 m<sup>3</sup>/s와 27.99 m<sup>3</sup>/s로 감소하였다. 이를 기반으로 임진강 유역의 물 부족량을 산정하였으며, 평균갈수량은 33.37 m<sup>3</sup>/s로 추정되었으나 각 기관별 제안된 하천 유지유량과 비교한 결과 10.37 m<sup>3</sup>/s에서 14.67 m<sup>3</sup>/s까지 많게 산정되었다. 황강댐 담수 이전과 이후로 나누어 평균갈수량을 비교한 결과, 담수 이전과 이후 평균갈수량이 각각 46.84 m<sup>3</sup>/s와 27.99 m<sup>3</sup>/s로 기존 제안된 하천유지유량보다 많아 용수부족이 발생하지 않았다. 하지만 임진강 유역에 필요한 생공농용수 필요수량인 9.88 m<sup>3</sup>/s를 합한 값과 비교한 결과, 기존 대비 0.59~4.89 m<sup>3</sup>/s(연간 환산 18.6~154.2백만 m<sup>3</sup>)까지 물 부족량이 발생하는 것으로 나타났다. 임진강 유역의 유량이 최소 6.98 m<sup>3</sup>/s에서 최대 11.18 m<sup>3</sup>/s까지 추가적으로 확보되어야만 하천유지와 생공농용수 필요수량을 충족할 수 있는 것으로 분석되었다. 특히 강수부족으로 인한 비상시인 2014년을 살펴보면, 하천유지유량만을 위해서는 봄철 갈수기 기간인 75일 기준으로 80백만 m<sup>3</sup>의 물이 확보되어야 하며, 하천유지유량과 생공농용수를 모두 공급하기 위해서 갈수기 기간 기준으로 최소 144백만 m<sup>3</sup>의 물이 확보되어야 하는 것으로 산정되었다.

이에 대한 대응방안으로 본 논문에서는 부족한 수량을 확보하기 위해 기존 수공구조물인 군남홍수조절지와 한탄강홍수조절댐을 활용하는 방안을 제안하였으며, 한탄강홍수조절댐만을 단독으로 활용하는 방안과 한탄강홍수조절댐과 군남홍수조절지를 연계하여 운영하는 방안으로 나누어 살펴보았다. 한탄강홍수조절댐과 군남홍수조절지를 연계 운영하여 용수공급을 한다면 먼저 2014~2015년과 같은 기상학적 가뭄이 아닌 경우에 평시 봄철 갈수기 기간인 75일을 기준으로 하는 경우 황강댐 담수 이후 물 부족량은 12.2백만 m<sup>3</sup>으로 군남홍수조절지 EL, 31.0 m로 확보할 수 있는 유효저수량인 13.3백만 m<sup>3</sup>만으로도 유량 확보가 가능할 것으로 산정되었다. 또한, 평시에 365일 동안 하천유지유량과

생공농용수를 같이 공급하기 위해서는 임진강 유역에서 59.6백만 m<sup>3</sup> 정도의 물을 확보하여야 하며, 이를 위해서는 한탄강댐 저수위는 최대 EL, 85.0 m, 군남댐은 EL, 31.0 m로 운영하는 경우 확보 가능한 저수량은 약 58.5백만 m<sup>3</sup>으로 용수 부족량을 만족하는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 매년 반복되는 임진강 유역의 물 부족 위기를 해결할 수 있도록 임진강 유역의 물 부족 원인 분석과 임진강 유역의 원활한 수자원 활용을 통한 대응 방안을 제안하였으며, 이는 관련 연구들에 대한 기초적 연구가 될 것으로 사료된다.

## References

- Choi, Hyuk Joon, Won Kim, and Min Ho Lee. 2007. Improvement of Flood Forecasting System for Imjin River. 2007 *Proceeding of Korea Water Resources Association*: 712-716.
- Gyeonggi Resarch Institute. 2015. *Preliminary Assessment of Decreased River Flow and Its Adaptive Management in Imjin Basin*.
- Go, Hye Young, Kyung Yeub Nam, Ki Ho Jang, Young Jin Choi, and Sang Beom Ryu. 2010. Accuracy Analysis of Radar-AWS Accumulated Precipitation Amounts. 2010 *Proceeding of the Autumn Meeting of KWS*: 414-415.
- Korea Meteorological Administration. 2014. *2014 Yearbook of Weather in North Korea*.
- Kwak, Chang Jae, Woo Jung Choi, and Jae Woong Cho. 2015. An Assessment of Flooding Risk using Flash Flood Index in North Korea - Focus on Imjin Basin. *Journal of Korea Water Resources Association*. 48(12): 1037-1049.
- K-water. 2015. *Report on the Adaptive Management for the Dry Season in Hantangang Dam*.
- Ministry of Construction & Transportation. 2006. *WaterVision (2006 ~2010)*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2002. *Report on a Cause Investigation of Flood Damages and a Permanent Measures Establishment I: Cause Investigation of Flood Damages and Permanent Measures*.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. 2011. *Imjin River Master Plan (Supplementation) Report*. Seoul Regional Office of Construction Management.

Office for Government Policy Coordination. 2006. *Report on Verification and Evaluation of the Flood Projection in Imjin Basin*.

Park, Jin Hyeog and Young Teck Hur. 2009. Flood Runoff Simulation using Physical based Distributed Model for Imjin-River Basin. *Journal of Korea Water Resources Association*. 42(1): 51-60.

*Korean References Translated from the English*

건설교통부. 2006. 수자원장기종합계획(2006~2010). 건설교통부.

경기개발연구원. 2015. 임진강유량감소 실태와 대응방안.

고혜영, 남경엽, 장기호, 최영진, 류상범. 2010. 황강댐 방류기간 북한지역에 대한 레이더-AWS 누적 강수량 정확도 분석. 2010년 한국기상학회 가을 학술대회 논문집:

414-415.

곽창재, 최우정, 조재웅. 2015. 돌발홍수 지수를 이용한 북한 홍수 위험도 평가-임진강 유역을 중심으로. 한국수자원학회논문집. 48(12): 1037-1049.

국무조정실. 2006. 임진강 유역 홍수대책 검증·평가보고서.

국토교통부. 2002. 임진강유역 홍수피해원인조사 및 항구대책 수립보고서 I: 홍수피해 원인조사 및 대책. 서울지방국토관리청.

국토해양부. 2011. 임진강 하천기본계획(보완) 보고서. 서울지방국토관리청.

기상청. 2014. 2014년 북한기상연보.

박진혁, 허영택. 2009. 물리적기반의 분포형모형을 활용한 임진강유역 홍수유출모의. 한국수자원학회논문집. 42(1): 51-60.

최혁준, 김원, 이민호. 2007. 임진강 홍수예보시스템 개선. 한국수자원학회 2007년도 학술발표회 논문집: 712-716.

한국수자원공사. 2015. 한탄강댐 갈수기 대응 방안 수립 보고서.

---

Received: Mar. 16, 2016 / Revised: May. 09, 2016 / Accepted: May. 16, 2016

## 2014-2015년 임진강 유역의 가뭄 및 수자원 변화분석

국문초록 최근 경기북부를 포함한 임진강 유역의 강수와 유량의 감소로 인해 2014~2015년 임진강 하류 지역의 농업용수 부족, 조위 영향 등이 발생하고 있다. 이에 본 논문에서는 임진강 유역의 물 부족 원인을 분석하고 대응방안을 제시하였다. 우선 임진강 유역의 물 부족 원인 파악을 위해 강수와 유량 경향성과 북한댐 운영에 의한 영향에 대해 분석하였다. 분석 결과 임진강 유역의 유량은 감소추세에 있고 북한댐 운영의 영향이 있는 것으로 파악되었으며, 최근 2014년과 2015년의 유량 감소는 강수량의 감소 영향이 큰 것으로 나타났다. 다음으로 임진강 유역의 평균갈수량을 추정하고 물 부족량 및 필요수량을 분석하였다. 북한댐 운영 이전에는 평균갈수량이 46.84 m<sup>3</sup>/s로서 물 부족이 발생하지 않았으나 운영 이후 평균갈수량이 27.99 m<sup>3</sup>/s로서 필요수량인 29.88 m<sup>3</sup>/s보다 작아 물 부족이 발생하는 것으로 나타났다. 마지막으로 군남홍수조절지와 한탄강 홍수조절용댐을 활용하여 갈수기 동안 필요수량을 확보할 수 있는 방안을 제안하였다.

주제어 : 임진강, 물 부족, 갈수량, 가뭄

- 
- 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 Kyong 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).
- Ji Hwan Oh** : He received his Master of Engineering from Daejin University, Korea in 2014. He is a Ph.D Candidate student of department of Civil engineering at Daejin University since 2014. His interesting subject are water resources management and operation contain the Dam.(ojh4525@naver.com).
- Hyo Sang Lee** : He received his Ph.D. from Imperial College London, UK in 2006. He is an associate professor of School of Civil engineering at Chungbuk National University. His interesting subject and area of research are hydrology, water resources engineering and regionalization of rainfall runoff model for unguaged catchments(hyosanglee@chungbuk.ac.kr).