



A study on the measures to use Gunnam flood control reservoir through a reservoir simulation model

Yang, Wonseok^a · Ahn, Jaehwang^a · Yi, Jaeung^{b*}

^aDepartment of Civil and Transportation Engineering, Ajou University

^bDepartment of Civil Systems Engineering, Ajou University

Paper number: 17-022

Received: 28 February 2017; Revised: 5 April 2017 / 11 May 2017; Accepted: 11 May 2017

Abstract

Due to geographical features of being close to DPRK (Democratic People's Republic of Korea), the Imjin River basin has difficulties in hydrological observation, and is vulnerable to unexpected flood occurrence. As a countermeasure, Gunnam Flood Control Reservoir construction was planned in 2005. Despite such a structural measure, damages by DPRK's illegal release continues to occur. Furthermore the Imjin River's flow has been decreased due to the effect of continuous drought in the Korean Peninsula since 2012 and DPRK's unilateral storage of water. A new operation method is derived for the Gunnam Flood Control Reservoir in order to cope with drought damages on the Imjin River basin and to ensure efficient response time upon flooding. The operation method maintaining Gunnam Flood Control Reservoir's water level by raising from EL.23.0 m to EL.31.0 m during the flood season for securing reservoir capacity enables to secure additional 14,000,000 m³ water compared to the existing operation methods. The operation method to store inflow by controlling release to 250 m³/s in the early stage of flood has increased 2.66% on average in terms of detention effect of reservoir compared to the existing operation methods. The method enables to secure 19 hours to prepare flood compared to the existing methods.

Keywords: Gunnam flood control reservoir, Reservoir operation, HEC-ResSim, Flood control

저수지 모의 모형을 통한 군남홍수조절지의 활용방안에 관한 연구

양원석^a · 안재황^a · 이재웅^{b*}

^a아주대학교 건설교통공학과, ^b아주대학교 건설시스템공학과

요 지

임진강 유역은 북한과 인접해 있는 지리적 특성 때문에 수문관측에 어려움이 있고 급작스러운 홍수발생 시 대응측면에서 취약하다. 이에 따른 대책으로 2005년 군남홍수조절지 건설이 계획되었다. 그러나 이러한 구조적 대책에도 불구하고 북한의 무단방류에 의한 피해가 계속 발생되고 있고, 2012년부터 지속된 한반도 가뭄의 영향과 북측댐의 일방적인 저수로 임진강 유량이 급격히 감소하여 임진강 하류에서 가뭄 피해가 발생하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 임진강유역의 가뭄피해를 대비하고 홍수발생 시 효율적인 대응시간을 확보하기 위하여 군남홍수조절지의 새로운 운영방법을 도출하였다. 먼저 가뭄피해 대비를 위해 저수용량을 확보하는 방안으로서 홍수기 군남홍수조절지 운영수위를 EL.23.0 m에서 EL.31.0 m로 상향하여 유지하는 운영방법은 기존운영방법과 비교·분석 시 약 14백만 m³의 용수를 추가 확보할 수 있다. 또한, 홍수발생 시 초기 250 m³/s로 조절방류를 하여 유입량을 일부 저류시키는 운영방법은 기존운영방법과 비교·분석 시 저수지 저류효과가 평균 2.66% 증가한 것으로 나타났다. 이는 기존의 운영방법과 비교하였을 때 평균 약 19시간의 대응시간 확보가 가능한 것으로 분석되었다.

핵심용어: 군남홍수조절지, 저수지운영, HEC-ResSim, 홍수조절

*Corresponding Author. Tel: +82-31-219-2507

E-mail: jeyi@ajou.ac.kr (J. Yi)

1. 서론

임진강 유역이 위치한 경기도 북부 지역은 북한지역에 인접해 있는 지리적 특성으로 수자원 개발, 하천보수와 같은 하천 정비 및 개발 사업이 쉽지 않아 1996년, 1998년, 1999년 총 3번에 걸친 대홍수로 약 1조원의 재산피해와 128명의 인명피해가 발생하였다. 또한, 2000년대 초반부터는 북측의 황강댐, 4월5일댐 등의 건설로 임진강 유량이 감소하고 북한의 무단 방류로 인한 인명 및 재산피해가 발생되고 있다. 북한의 무단 방류 발생에 따른 피해를 줄이고 홍수조절을 목적으로 군남홍수조절지 건설사업이 2005년 계획되었고 2011년 완공되어 운영중에 있다. 그러나 홍수조절시설물 건설과 같은 구조적 대책에도 불구하고 북한과의 접경지역과 미계측 유역이 있는 임진강 상류지역은 수문관측이 어려워 무단방류와 같은 긴급 상황 시 대응에 취약하다. 2009년 9월 6일 북측 황강댐에서 남한 정부에 사전 통보 없이 최대 약 4,000 m³/s에 해당하는 물을 무단으로 방류하여 임진강 하류에서 야영하던 야영객 6명이 사망하였고 18명이 경상을 입었으며, 약 1억 원의 재산피해가 발생하였다. 최근에도 2016년 5월 북측의 무단방류로 약 1억 원의 재산피해가 발생하였다.

또한, 이와는 대조적으로 임진강 하류 지역의 가뭄 피해가 지속적으로 보고되고 있으며 대표적인 사례로는 2014~2015년에 발생한 가뭄 피해 사례가 있다. 2012년도부터 지속되고 있는 가뭄에 의한 강수량감소와 북측 댐의 저수영향으로 임진강 유역의 유량이 감소한 것이 주요 원인이며, 이로 인해 2014~2015년 임진강 하류 지역의 농업용수 부족과 임진강 유량감소로 인한 하구 해수의 유입으로 염분농도가 생·공용수의 사용기준치를 초과하여 하류부 급수 불량 등 이수 측면 피해사례가 있다.

Lee (1997)는 1996년 7월 경기 북부지역에서의 호우로 인한 연천댐의 붕괴와 이로 인한 하류 지역의 영향을 분석하였으며 한탄강의 지류인 차탄천과 임진강 본류에 대한 홍수파를 분석하였다. 그리고 문산천에서의 홍수피해 원인과 조석영향을 분석하였다. Park (2000)은 임진강 유역의 집중호우에 대응하기 위해 유출특성 분석과 홍수 저감방안에 대하여 검토하였다. Lim (2001)은 임진강 유역에서의 1996년, 1999년 홍수사상을 선정하여 HEC-RAS, UNET 모형을 이용하여 피해를 분석하였으며 중·하류부 농경지를 가상저류지로 선정하여 홍수위 저감 효과를 분석하였다. Kwak et al. (2015)는 임진강 유역의 미계측 지역을 중심으로 돌발홍수 지수를 산정하여 홍수 위험도를 검토하였다. 그리고 Yu (2016)는 미계측 지역을 포함한 임진강 유역의 홍수기 신속한 홍수 방제를 위해

RAR (RADAR-AWS Rain Rate)자료와 LDAPS (국지 예보 모델)자료를 쉽게 활용할 수 있는 프로그램을 개발하여 검증하였다.

최근 들어서는 임진강 유역의 가뭄피해 대응 및 분석에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. Kim et al. (2011)는 임진강 유역의 효율적인 하천유역 관리를 위하여 남한의 횡산수 위관측소를 유역 출구로 하는 북한의 4월5일댐과 황강댐 건설 전·후의 유출량 산정 및 평가를 통하여 댐 건설 이후의 물 부족량 및 피해량을 분석하였다. Song et al. (2015)에서는 임진강 본류의 유량감소 원인을 추적하였으며, 그 영향에 대한 인근 주민들의 설문을 통하여 체감조사를 하였다. Jang et al. (2016)는 2014~2015년 임진강 유역의 물 부족 발생 원인을 파악하고 대응방안을 제시하였다. 그동안의 선행 연구들을 살펴보면 임진강 유역의 홍수 및 가뭄 피해를 극복하기 위한 연구들이 많이 진행되었지만 임진강 유역 상류에 위치한 군남홍수조절지를 효과적으로 운영하여 하류의 피해를 경감시키기 위한 연구는 현재 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 임진강의 유량감소로 발생하는 하류 피해대응과 홍수기 북한의 무단방류와 같은 긴급상황 발생 시 신속한 대응을 위해 군남홍수조절지의 새로운 운영규칙을 제시하여 가뭄 및 급작스러운 홍수에 대응하는 방안을 수립하고 이에 대한 효과를 분석하고자 한다.

2. 연구범위 및 방법

2.1 군남홍수조절지

2.1.1 유역현황

본 연구의 대상인 군남홍수조절지는 Fig. 1과 같이 임진강 본류 중·하류부인 한탄강 합류점으로부터 약 12 km 상류에 위치하고 있으며 경기도 연천군 군남면 선곡리, 우안부는 경기도 연천군 왕징면 강내리에 속한다. 그리고 군남홍수조절지 유역내 유일한 유량관측소인 횡산수위국은 군남홍수조절지로부터 약 10.6 km 떨어진 상류지역에 위치하고 있다. Table 1과 같이 군남홍수조절지의 총 유역면적은 4,190.9 km²이며 이중 남한의 유역면적은 108 km²로 전체 유역면적의 약 2.6%이다. 총 유로연장은 178.9 km이며, 남한에 속해 있는 유로 연장은 약 14.8 km로 전체 유로 연장의 약 8.3%를 차지하고 있다.

2.1.2 군남홍수조절지 제원

군남홍수조절지의 제원은 Table 2와 같다. 군남홍수조절

지의 형식은 콘크리트 중력식 댐이며, 댐 마루고는 EL.45.0 m, 계획홍수위는 EL.40.0 m, 댐 바닥고는 EL.23.0 m 이다. 그리고 총 저수용량은 약 71백만 m³이다. 여수로는 롤러게이트 7문, 레디얼게이트 6문, 자유월류식 2조가 설치되어 있으며 각각 EL.23.0 m, EL.26.0 m, EL.31.0 m에 위치해 있다. 설계 시 수립된 군남홍수조절지의 계획방류량은 총 2단계로 설계되

었다. 1단계는 문산지점을 기준으로 100년 빈도 홍수량인 10,400 m³/s가 군남홍수조절지로 유입 시 9,100 m³/s로 조절방류를 실시한다. 2단계는 군남지점을 기준으로 100년 빈도 홍수량인 11,300 m³/s이 군남홍수조절지로 유입 시 11,000 m³/s로 조절방류를 실시한다.

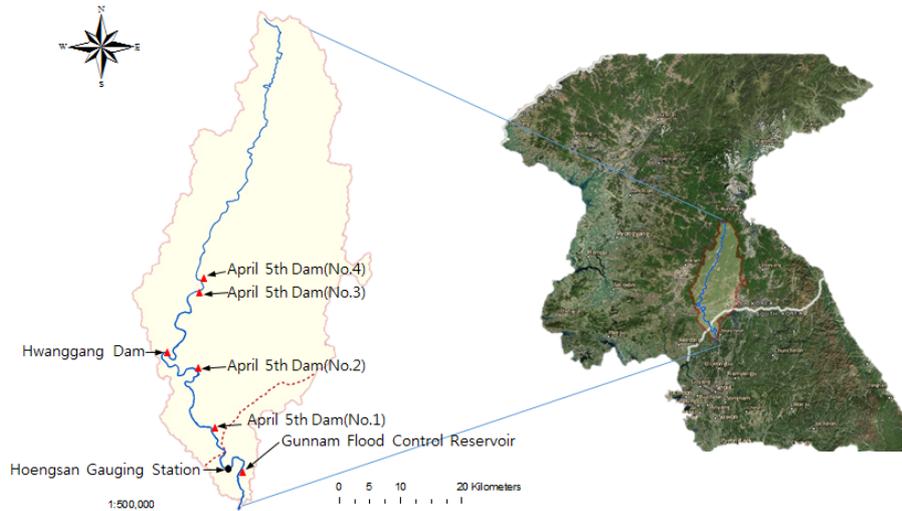


Fig. 1. Gunnam flood control reservoir basin

Table 1. Area and river length for Gunnam flood control reservoir basin

Basin	Area (km ²)	Proportion (%)	River length (km)	Proportion (%)
Republic of Korea	108.0	2.6	14.8	8.3
DPRK	4,082.9	97.4	164.1	91.7
Total	4,190.9	100	178.9	100

Table 2. Physical characteristics of Gunnam flood control reservoir

		Unit	Gunnam flood control reservoir
Dam	Type	-	Concrete gravity dam
	Crest elevation	EL.m	45.0
	Length	m	658.0
	Height	m	26.0
Reservoir	Design flood discharge	m ³ /s	Step 1. : 10,400 Step 2. : 11,300
	Design effluent flow	m ³ /s	Step 1. : 9,100 Step 2. : 11,000
	Flood water level	EL.m	40.0
	Total storage	106 m ³	71.6
	Effective storage	106 m ³	70.6
Spillway	Gate	EA	Roller gate : 7 Radial gate : 6 Uncontrol gate : 2

2.1.3 군남홍수조절지 기존운영방법

군남홍수조절지의 기존운영방법은 풍수해재난대책 기간(5월 15일~10월 15일)과 풍수해재난대책 이외 기간(10월 16일~5월 14일)으로 구분하여 정해진 운영규칙에 의해 운영된다.

(1) 풍수해재난대책기간(5월 15일~10월 15일)

Fig. 2와 같이 군남홍수조절지 풍수해재난대책기간 운영방법은 총 4단계로 구분할 수 있다.

- 1단계는 풍수해재난대책 이외 기간 동안 저수하였던 물을 모두 비워 EL.23.0 m로 저수지 수위를 유지한다. 유입량 증가로 저수지 수위가 EL.24.5 m를 초과하게 되면 홍수조절을 시작하여 EL.36.5 m에 도달하기 전까지 수문 조절을 통해 9,100 m³/s 이하로 방류를 한다.
- 2단계는 조절방류했음에도 군남홍수조절지 수위가 EL.36.5 m를 초과하게 되면 1단계 계획방류량 9,100 m³/s로 유지하며 홍수조절을 실시한다.
- 3단계는 9,100 m³/s로 유지하며 조절방류를 했음에도 수위가 지속적으로 증가하여 EL.39.5 m를 초과하게 되면 2단계 계획방류량 11,000 m³/s로 조절방류를 한다.
- 4단계는 조절방류를 했음에도 수위가 증가하여 계획홍수위 EL.40.0 m를 초과하게 되면 모든 수문을 개도하여 유입량 전량을 방류한다.

(2) 풍수해재난대책 이외 기간 (10월 16일~5월 14일)

Fig. 3과 같이 군남홍수조절지의 풍수해재난대책 이외 기간 운영방법은 총 4단계로 구분할 수 있다.

- 1단계는 풍수해재난대책 기간 동안 비워두었던 저수지를 EL.31.0 m까지 저수한다.

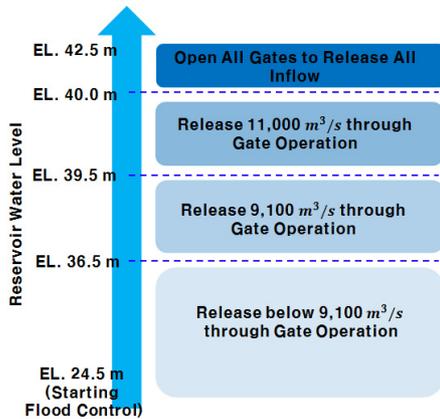


Fig. 2. Operating method for wind and flood damage measure period

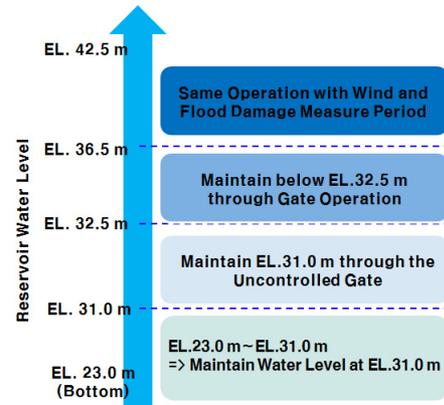


Fig. 3. Operating method by other than wind and flood damage measure period

- 2단계는 유입량의 증가로 저수지 수위가 EL.31.0 m를 초과하게 되면 자유유통부를 통해 유입량을 자연방류 시키면서 저수지 수위를 EL.31.0 m로 유지한다.
- 3단계는 유입량 증가로 EL.32.5 m를 초과하게 되면 수문 조작을 통해 EL.32.5 m 이하로 저수지 수위를 유지한다.
- 4단계는 조절방류를 했음에도 저수지 수위가 EL.36.5 m를 초과하여 수위가 증가하게 되면 풍수해재난대책기간 운영방법과 동일하게 운영을 하여 홍수조절을 실시한다.

2.2 운영대안 선정

본 연구에서는 새로운 운영대안에 대하여 홍수사상 발생 시 군남홍수조절지의 운영효과를 평가하기 위해 Fig. 4와 같이 3가지 경우에 대해 분석하였다. Case 1은 기존운영방법, Case 2는 가뭄피해 대비 운영방법, Case 3은 긴급상황 발생 시 대응시간 확보 운영방법이다.

- Case 1 (기존운영)은 기존에 수립된 군남홍수조절지의 운영방법이다. 본 연구에서 구축한 HEC-ResSim 모형의 적합성을 평가하기 위한 Case이며, 본 연구에서 선정한 Case 2, Case 3의 운영 효과를 분석 및 평가시 기준이 되는 Case 이다.
- Case 2 (운영대안 1)는 Fig. 4와 같이 풍수해재난대책기간에도 군남홍수조절지의 수위를 EL.31.0 m까지 저수를 시켜 용수를 확보하는 방법으로서 북측댐의 일방적인 저수와 가뭄에 따른 임진강 유량 감소로 인한 가뭄피해 발생 시 임진강 유량을 일정량 유지하기 위한 운영대안이다. 「Basic and Detailed Design Report of Gunnam Flood Control Dam Construction Project (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2007)」를 참고하여 분석한 결과 운영수위를 EL.31.0 m로 상향하여 운영하

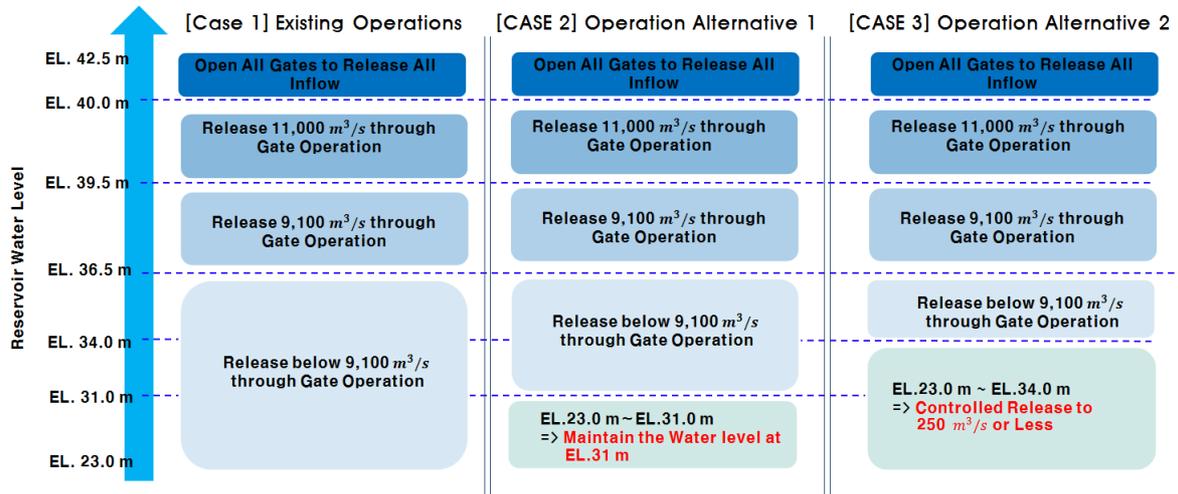


Fig. 4. Operation alternative according to reservoir water level change

Table 3. Flood event selection

Flood event	Selection of period	Note
1	Gunnam flood control dam 100 year frequency	Imjin river master plan (Ministry of land, Infrastructure, and Transport, 2011)
2	July 08, 2013 - July 20, 2013	General flood event
3	July 26, 2011 - July 29, 2011	General flood event
4	July 05, 2016 - July 08, 2016	Illegality release event
5	June 26, 2011 - June 29, 2011	Illegality release event

계 되면 북측의 침수피해방지와 인근 군부대의 훈련장을 계속 사용할 수 있으며 임진강 유역의 가뭄 해갈 및 하류 지역의 가뭄 피해를 줄일 수 있는 약 14.0백만 m³의 용수를 확보할 수 있다.

- Case 3 (운영대안 2)은 Fig. 4와 같이 풍수해재난대책기간 무단방류와 같은 긴급상황 발생 시 저수지 수위가 EL.34.0 m에 도달하기 전까지 최대 250 m³/s로 조절방류를 하며 EL.34.0 m를 초과 시 기존운영방법을 따르는 운영대안이다. 「Disaster Status Management information (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2014)」을 참조하여 운영대안을 도출한 결과 횡산수위국 수위가 1 m를 초과하여 인명대피 경보가 발생하여도 250 m³/s 이하로 조절방류를 한다면 댐 운영자의 대처 시간 및 임진강 하류 지역의 인명대피 시간을 확보할 수 있을 것으로 판단되어 이를 조절방류기준으로 삼아 모형에 적용하여 기존운영과 비교분석하였다.

2.3 기간선정

본 연구에서 도출한 운영방안에 대해 저수지 운영효과를

분석하기 위해 군남홍수조절지 완공 이후로 관측된 홍수사상을 10분 단위로 조사하였다. 다만, 2014년 홍수사상은 1992년 이후 22년 만의 발생한 마른장마에 의하여 재난대책기간에도 작은 유입량이 지속되었기 때문에 운영 효과를 판단하기 어려워 제외하였다. 홍수사상은 Table 3과 같이 선정하였으며 대안별 운영효과 분석과 북측 항강댐으로부터 무단방류 발생 시 홍수조절 효과를 평가하고자 하였다. 북한의 무단방류에 의한 홍수사상은 정부의 발표, 기사, 보고서 등을 활용해 홍수사상을 선정하였다.

2.4 저수지 모형 선정 및 HEC-ResSim 모형구축

2.4.1 저수지 모형 선정

컴퓨터기술의 발전으로 최근에 개발된 저수지 모형들은 다양해지는 각종 요구를 대부분 적용이 가능하도록 개발이 되고 있다. 또한, 다양한 결과분석능력으로 높은 수준의 저수지 모의 및 분석이 가능해졌다. 그리고 GUI (Graphic User Interface)를 통해 간단한 조작으로 다양한 제약조건들의 사결정에 반영할 수 있어 복잡하고 현실적인 저수지모의가 가능해졌다. 따라서, 사용자가 사용 목적에 알맞은 저수지 모

형을 선택하는 것 또한 연구에 있어 매우 중요한 요소이다. 최근 개발되어진 대표적인 모형으로는 HEC-ResSim, CWMS, RiverWare, MODSIM, WEAP 등이 있으며, 본 연구에서는 여러 가지 제약조건을 쉽게 구성할 수 있는 HEC-ResSim (USACE, 2013) 모형을 선정하였다. HEC-ResSim 모형은 미 공병단 수문연구센터에서 차세대 프로그램 개발사업 목적으로 1996년 저수지 모의운영 소프트웨어인 HEC-5의 후속으로 처음 개발되었다. HEC-ResSim은 사용자의 편의를 위해 GUI를 도입하여 제원, 초기 상황, 유입량, 제약조건 등의 정보를 쉽게 구성하고 모의할 수 있도록 개발되었다.

2.4.2 HEC-ResSim 모형 구축

HEC-ResSim 모형은 총 세 가지의 Module을 제공하고 있다. 세 가지의 Module을 살펴보면 먼저 유역에 대한 전반적인 구축을 하는 WaterShed Module과 저수지의 수위-저수용량 관계, 댐, 발전소 등의 각종 제원과 여러 가지 제약조건들을 고려한 운영규칙을 구성하는 Reservoir Network Module 그리고 구축된 모형을 실행 및 분석하는 Simulation Module이 있다.

(1) 유역설정

유역설정은 모형구축 시 기초가 되는 단계로 WaterShed Module에서 구성한다. 유역설정의 목적은 저수지 및 수공구조물의 배치를 모델링하고 유역에 대한 정보가 포함된 Data를 준비하는 과정으로 유역에 대한 정보는 「Basic and Detailed Design Report of Gunnam Flood Control Dam Construction Project (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2007)」를 참고하여 구성하였다.

(2) 운영방법 및 홍수사상 적용

HEC-ResSim 모형 구축에서 가장 중요한 요소인 운영방법, 제약조건, 홍수사상을 입력하는 단계로 Reservoir Network Module에서 구성한다. 본 연구에서는 「Basic and Detailed Design Report of Gunnam Flood Control Dam Construction Project (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2007)」를 참고하여 댐 제원, 수문 제원, 운영방법 등을 참고하여 구성하였으며, 본 연구에서 도출한 운영대안을 입력해주었다. 그리고 홍수사상 입력은 HEC-DSS 프로그램을 이용하여 입력하였다.

(3) 모의운영 기간 입력 및 결과확인

모의운영 기간 설정 및 결과확인인 Simulation Module에

서 수행한다. Simulation Module은 모의 운영 기간 설정 및 저수지 제원, 운영규칙 등의 수정 및 평가를 할 수 있으며, 모의 운영 중 발생한 오류 및 문제점들을 확인 및 수정할 수 있다. 본 연구에서는 Table 3에서 선정한 기간을 입력하여 모의 운영을 실시 및 결과를 분석하였다.

2.5 운영평가 방법

선정한 새로운 운영대안의 목적은 군남홍수조절지의 한정된 저류공간을 최대한 활용하고 적절한 방류를 통해 임진강 하류부의 홍수 피해 및 가뭄 피해를 최소화시키는 것이다. 운영대안별 평가방법은 본 연구에서 구축한 HEC-ResSim 모형을 이용하여 모의 운영 후 운영의 적합성과 운영실적을 평가할 수 있는 항목인 침투수위(EL.m), 침투방류량(m^3/s), 유량조절률(%), 저수지방류율(%), 저수지저류율(%)을 지표로 하여 각 모형 결과에 대해 비교·검토하였다.

(1) 유량조절률(%)

유량조절률은 침투유입량에 대한 조절효과를 나타내는 것으로 홍수조절능력을 의미하며 100%에 가까울수록 좋은 결과를 나타낸다.

$$\text{유량 조절률 (\%)} = \frac{I_{\text{Max}} - D_{\text{Max}}}{I_{\text{Max}}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, I_{Max} 는 최대유입량(m^3/s), D_{Max} 는 최대방류량(m^3/s)이다.

(2) 저수지방류율(%), 저수지저류율(%)

저수지방류율(%)과 저수지저류율(%)은 유입된 총량에 대한 저수지의 홍수조절효과를 나타낸다. 그리고 운영효율은 방류율이 작을수록, 저류율이 클수록 좋은 결과를 보이는 것으로 평가한다.

$$\text{저수지 방류율 (\%)} = \frac{D_{\text{Total}}}{I_{\text{Total}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{저수지 저류율 (\%)} = \frac{R_{\text{Total}}}{I_{\text{Total}}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, I_{Total} 은 총유입량(m^3), D_{Total} 은 총방류량(m^3), R_{Total} 은 총저류량(m^3)이다.

3. 군남홍수조절지 운영효율 평가·분석

Table 4와 같이 본 연구에서 선정한 Case의 초기조건 및 운영방법은 다음과 같다.

먼저 본 연구에서 비교·분석 시 기준이 되는 Case 1은 기존 운영방법으로서 초기수위는 EL.23.0 m, 운영방법은 「Basic and Detailed Design Report of Gunnam Flood Control Dam Construction Project (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2007)」에서 수립된 기존운영방법을 따른다. 그리고 Case 2의 운영방법은 Case 1과 동일하며 초기수위는 가뭄 피해 대비에 따른 용량확보를 위해 EL.31.0 m 까지 저수를 유지한 상태를 가정하여 모의하였다. 그리고 Case 3은 조절방류를 통한 댐 관리자의 대응 및 인명대피 시간 확보를 위한 운영 방안으로서 초기 저수지 수위조건은 EL.23.0 m이며, 운영방법은 EL.34.0 m까지 250 m³/s로 조절방류를 하며 EL.34.0 m 이상부터는 기존운영방법을 적용하여 모의하였다. 그리고 모든 Case는 적합성 검증을 위해 홍수사상 1을 적용한 결과값을 「Basic and Detailed Design Report of Gunnam Flood Control Dam Construction Project (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2007)」에서 기수립된 기존운영방법의 결과값과 비교하였다. 그리고 새로운 운영대안의 운영평가를 위해 일반홍수사상, 홍수사상 2, 홍수사상 3과 무단방류와 같은 긴급상황에 대한 홍수사상 4, 홍수사상 5를 적용하여 기존운영방법과 비교·분석하였다.

3.1 적합성 검증

본 연구에서 구축한 HEC-ResSim 모형의 적합성 검증을 위해 홍수사상 1을 적용하였으며, 군남홍수조절지 건설을 위해 수립된 「Basic and Detailed Design Report of Gunnam Flood Control Dam Construction Project (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2007)」와 비교하였다. 비교 결과 Table 5와 같이 Case 1 (기존운영)의 경우 첨두수위 오차는 0.1 m, 첨두방류량은 15.6 m³/s으로 기수립된 보고서에 비하여 약간 높게 나왔다. 그리고 Case 2의 경우 첨두수위는 0.1 m, 첨두방류량은 15.6 m³/s 높게 나타났다. 마지막으로 Case 3의 경우 첨두수위는 0.2 m 작게 나타났으며, 첨두방류량은 58.7 m³/s 높게 나타났지만 그 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. Case 1~3을 종합 분석한 결과 본 연구에서 구축한 모형은 「Basic and Detailed Design Report of Gunnam Flood Control Dam Construction Project (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2007)」에서 제시한 제약조건에 적합하게 모의되었으며, 계획홍수위 EL.40.0 m를 초과하지 않았다. 그다음으로 기존운영방법(Case 1)으로 구축된 HEC-ResSim 모형의 결과값을 본 연구에서 선정한 홍수사상 2~홍수사상 5에 대한 군남홍수조절지의 실제운영 결과값과 비교·분석하였다. 비교·분석을 위해 저수지 운영실적을 평가할 수 있는 항목인 유량조절률(%), 저수지방류율(%), 저수지저류율(%)을 산정하였다.

Table 4. Application of operating condition and flood event

Case	Gunnam flood control dam		Flood event
	Initial water level (EL.m)	Operation method	
Case 1	23	Existing operations	<ul style="list-style-type: none"> • Model fit test - Event 1: 100 year frequency • General flood event - Event 2, Event 3 • Illegality release Event - Event 4, Event 5
Case 2	31	Existing operations	
Case 3	23	<ul style="list-style-type: none"> • EL.23 m ~ EL.34 m : Max 250 m³/s release • Exceed EL.34 m : Existing operations 	

Table 5. Simulation results for operational alternatives (Flood event 1)

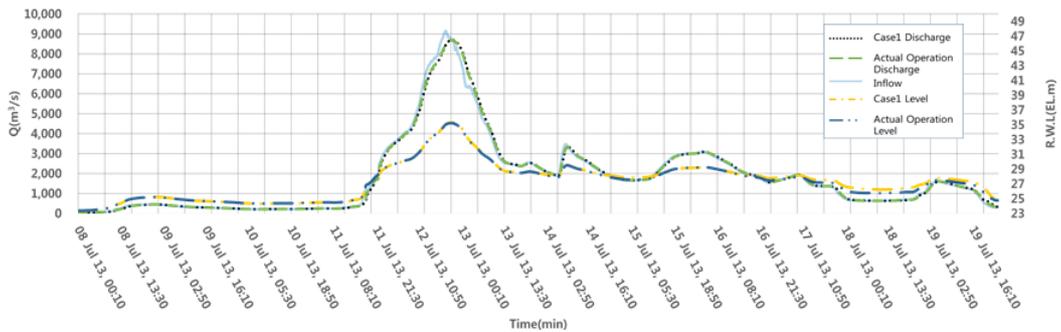
Case		Peak inflow (m ³ /s)	Peak stage	Peak flow (m ³ /s)
Report	①	11,339	EL.40.0 m	11,000.0
Case 1	②	11,339	EL.40.1 m	11,015.6
① - ②		-	-0.1 m	-15.6
Case 2	③	11,339	EL.40.1 m	11,015.6
① - ③		-	-0.1 m	-15.6
Case 3	④	11,339	EL.39.8 m	11,059.7
① - ④		-	0.2 m	-59.7

Table 6과 같이 기존운영방법(Case 1)을 적용하여 모의한 결과 실제운영과 모의운영에서 모든 홍수사상은 EL.36.5 m를 초과하지 않았고, 9,100 m³/s로 일정량 조절방류를 수행하지 않았다. 그 결과 저수지방류율은 약 100%, 저수지저류율은 약 0%에 근사한 값을 갖는 것으로 분석되었다. 유량조절률은 홍수사상 3을 제외하고는 실제운영보다 최대 8.9%, 첨두 유입량에 대한 홍수조절효과는 평균 약 4% 정도 높았다. 이것

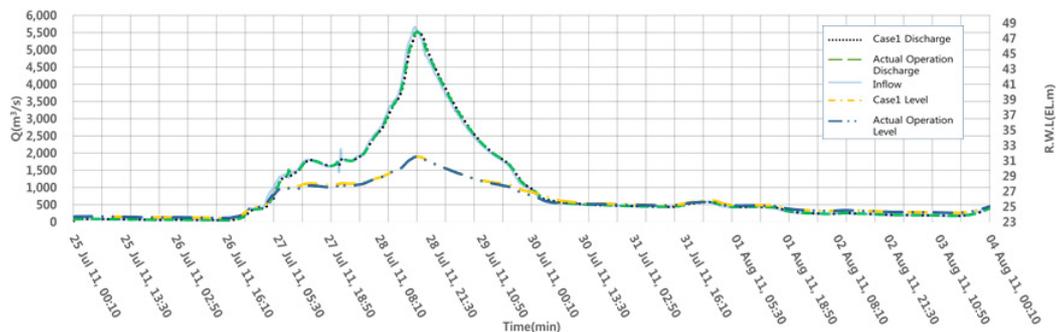
은 실제운영에서 수문조작 수행 시 여러 제약조건을 고려해서 운영된 것으로 판단되며, 본 연구에서 구축한 모형은 실제상황을 잘 반영하고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, Fig. 5와 같이 모의운영의 방류패턴은 실제운영과 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 구축한 모형은 실제운영과 매우 유사하게 모의가 되는 것으로 나타나 본 연구를 위한 모형으로 적합한 것으로 판단되었다.

Table 6. Analysis of case 1 simulation results

Case	Flood event	Peak stage	Flow control ratio (%)	Reservoir	
				Discharge ratio (%)	Storage ratio (%)
Actual operation ①	2	EL.35.2 m	5.0	99.9	0.1
Case 1 ②	2	EL.35.3 m	5.1	99.9	0.1
① - ②		-0.1 m	-0.1	-	-
Actual operation ①	3	EL.31.52 m	2.5	99.9	0.1
Case 1 ②	3	EL.31.54 m	2.4	99.8	0.2
① - ②		-0.02 m	0.1	0.1	-0.1
Actual operation ①	4	EL.27.9 m	6.1	100	-
Case 1 ②	4	EL.27.4 m	9.5	100	-
① - ②		0.5 m	-3.4	-	-
Actual operation ①	5	EL.27.5 m	-1.0	100	-
Case 1 ②	5	EL.27.4 m	7.9	100	-
① - ②		0.1 m	-8.9	-	-



(a) Flood event 2



(b) Flood event 3

Fig. 5. Analysis of case 1 simulation results

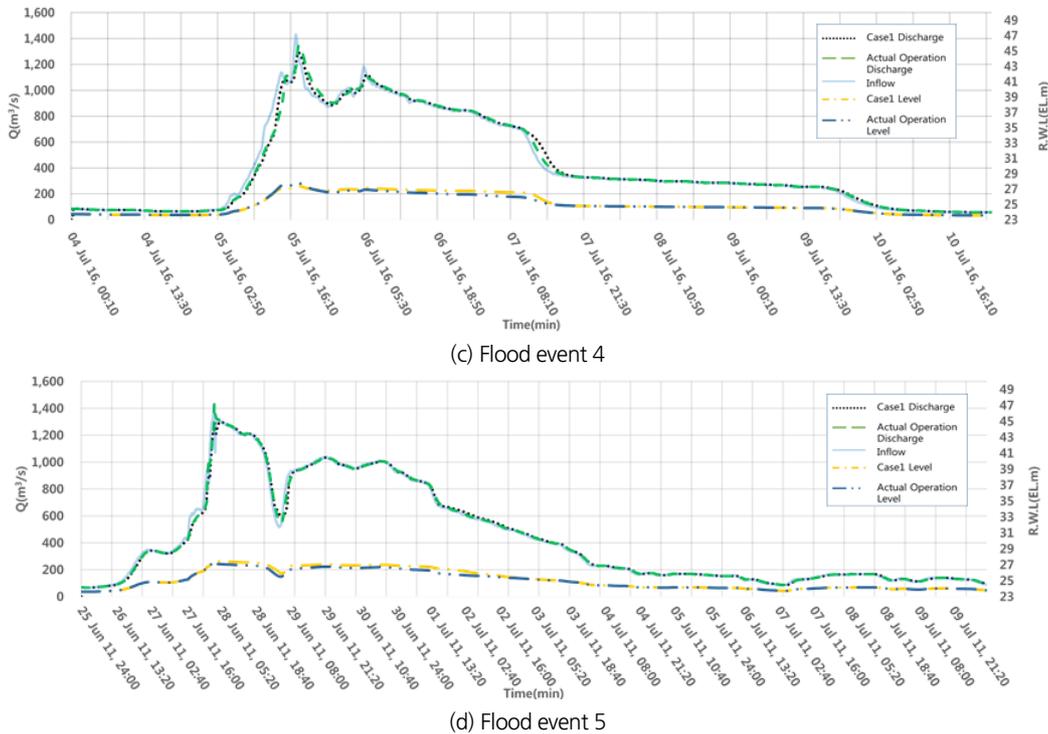


Fig. 5. Analysis of case 1 simulation results (Continue)

3.2 Case 2 (운영대안 1) 결과

Table 7과 같이 Case 2 종합분석 결과 Case 1 보다 저수지 운영효율은 낮은 것으로 분석되었지만 저수지 방류율과 저류율의 차이가 최대 0.2%, 최소 0.1%로 크지 않아 기존운영방법과 유사하게 모의되는 것으로 판단되어 충분히 적용 가능한 것으로 분석되었다. 그러나 북측의 무단방류 사상인 홍수사상 4, 홍수사상 5에서 Case 2의 유량조절률은 0%인 것으로 분석되었지만 계획 홍수위 EL.40.0 m를 초과하지 않았다.

Table 8과 같이 Case 2의 운영방법을 적용하게 되면 군남홍수조절지 전체저수용량 중 약 10%에 해당하는 약 14백만 m³에 해당하는 용수를 확보할 수 있다. 「Water Vision 2020 Report, (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2011)」에서 제시한 것처럼 임진강 하천유지용수 18.7 m³/s를 공급한다고 가정하면 약 9일 동안 공급 가능한 용량을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

3.3 Case 3 (운영대안 2) 결과

선정된 홍수사상 기간의 운영실적을 평가할 수 있는 항목인 침투수위, 침투방류량, 유량조절률, 저수지방류율, 저류율을 산정하였으며 Table 9와 같이 Case 1 (기존운영)과 비교·분석하였다.

Case 3 적용 시 홍수사상 2, 홍수사상 3, 홍수사상 4의 경우

저수지저류율은 평균 2.66% 증가한 것으로 나타났으며 기존 운영방법인 Case 1보다 저수지 운영효율은 높게 나타났다. 그러나 초기 조절방류로 인해 침투수위는 증가하였지만 계획방류를 시작하는 수위 EL.36.5 m를 초과하지 않았으며 모든 사상은 계획홍수위 EL.40.0 m를 초과하지 않아 충분히 적용 가능한 것으로 판단된다. 또한 Table 10과 같이 Case 3에서 임진강 인명대피경보 기준인 횡산수위국 수위 1.0 m에 해당되는 250 m³/s 이상의 유량 유입 시 250 m³/s로 조절방류를 수행한 시간을 분석하여 댐 운영 관리자의 대응 가능시간 및 하류 지역 대피 시간 확보 등의 대응 가능한 시간을 Case 1 (기존운영)과 비교·분석하였다. 그 결과 댐 운영자의 대응 및 임진강 하류 인명대피 시간을 최대 2,060분(약 34시간), 최소 610분(약 10시간) 확보 가능했으며, 평균 1,138분(약 19시간) 확보 가능한 것으로 분석되었다. 그리고 하도 유속 및 수위 분석을 위해서 임진강 하천기본계획을 참고하여 1차원 모형인 HEC-RAS를 이용하여 분석한 결과 250 m³/s로 조절방류 시 군남홍수조절지 하류 과거 인명피해 발생 지역 인근의 유속은 1 m/s를 초과하지 않았으며 수위는 저수로 수위를 초과하지 않았다. 이는 급작스러운 홍수 발생 시에도 군남홍수조절지의 하류에서 안전하게 대피할 수 있는 시간을 추가로 확보할 수 있도록 하여 긴급재난관리 측면에서 긍정적인 효과를 기대할 수 있는 운영대안으로 판단된다.

Table 7. Analysis of case 2 simulation results

Case	Flood event	Peak stage	Flow control ratio (%)	Reservoir	
				Discharge ratio (%)	Storage ratio (%)
Case 1 ①	2	EL.35.3 m	5.1	99.9	0.1
Case 2 ②	2	EL.35.3 m	5.1	100	-
① - ②		-	-	-0.1	0.1
Case 1 ①	3	EL.31.5 m	2.4	99.8	0.2
Case 2 ②	3	EL.31.6 m	2.3	100	-
① - ②		-0.1 m	0.1	-0.2	0.2
Case 1 ①	4	EL.27.4 m	9.5	99.8	0.2
Case 2 ②	4	EL.31.0 m	-	100	-
① - ②		-3.6 m	9.5	-0.2	0.2
Case 1 ①	5	EL.27.4 m	7.9	99.9	0.1
Case 2 ②	5	EL.31.0 m	-	100	-
① - ②		-3.6 m	7.9	-0.1	0.1

Table 8. The number of days that Imjin river river instream flow can be supplied

Case	Wind and flood damage measure period (May 14 - October 15)			
	Initial water level (EL.m)	Reservoir capacity (10 ⁶ m ³)	Maintenance flow discharge (m ³ /s)	The number of days that water supply (Assumption of inflow 0 m ³ /s)
Case 1	23	-	18.7	-
Case 2	31	14.0		9 day

Table 9. Analysis of case 3 simulation results

Case	Flood event	Peak stage	Flow control ratio (%)	Reservoir	
				Discharge ratio (%)	Storage ratio (%)
Case 1 ①	2	EL.35.3 m	5.1	99.9	0.1
Case 3 ②	2	EL.36.5 m	1.0	97.6	2.4
① - ②		-1.2 m	4.1	2.3	-2.3
Case 1 ①	3	EL.31.5 m	2.4	99.8	0.2
Case 3 ②	3	EL.35.5 m	1.1	97.4	2.6
① - ②		-4.0 m	1.2	2.4	-2.4
Case 1 ①	4	EL.27.4 m	9.5	99.8	0.2
Case 3 ②	4	EL.34.3 m	19.7	96.5	3.5
① - ②		-6.9 m	-10.2	3.3	-3.3
Case 1 ①	5	EL.27.4 m	7.9	99.9	0.1
Case 3 ②	5	EL.34.3 m	7.8	99.9	0.1
① - ②		-6.9 m	0.1	-	-

Table 10. Emergency response time

Case	Flood event	Evacuation alarm occur time (Hoengsan gauging station (1 m) Reaching)	Controlled discharge end time	Available time (min)
Case 3	2	08. Jul. 2013, 14:20	10. Jul. 2013, 00:30	2,060
	2	11. Jul. 2013, 10:20	11. Jul. 2013, 20:20	610
Case 3	3	26. Jul. 2011, 22:00	27. Jul. 2011, 09:10	680
Case 3	4	05. Jul. 2016, 08:30	05. Jul. 2016, 18:50	630
Case 3	5	26. Jun. 2011, 21:50	28. Jun. 2011, 02:10	1,710
Average		-	-	1,138

4. 결론

본 연구는 풍수해재난대책 기간에 군남홍수조절지의 운영 기준을 검토하여 급작스러운 홍수발생 시 임진강 하류의 홍수 피해를 최소화하고 가뭄에 의한 피해를 최소화하는 효율적인 운영대안을 제시하는데 목적이 있다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 구축한 HEC-ResSim 모형의 신뢰도 및 적합성검정을 위해 기존운영과 실제운영을 비교하였다. 비교 결과 유량조절률은 약 3% 정도 차이가 발생하였으며, 저수지 방류율과 저류율 차이는 약 0.15% 정도로 실제운영과 비교·분석 시 매우 유사하게 모의되는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 군남홍수조절지의 풍수해재난대책 기간에 기존운영 수위를 EL.31.0 m까지 상향하여 운영하는 Case 2를 평가한 결과 100년 빈도에 해당하는 침투유입량 발생 시 Case 1 (기존운영)과 유사하게 운영되는 결과를 나타내었다. 군남지점 기준 100년 빈도 이하의 유입량 발생 시 Case 1 (기존운영)보다 저수지운영효율은 Case 2에서 낮은 것으로 확인되었지만, 그 차이가 유량조절률은 약 4.3%, 저수지 방류율과 저류율은 약 0.1%로 차이가 크지 않아 적용 가능하다고 판단되었다. 따라서, 유량감소로 인한 하류의 염해피해 방지 및 가뭄대비를 위한 용수 약 14.0백만 m³의 확보가 가능하며, 가뭄 상황 발생 시 「Water Vision 2020 Report (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2011)」에서 제시한 임진강 하천유지용수 18.7 m³/s를 기준으로 지속적으로 하천의 유지용수를 공급한다면 약 9일간 추가공급할 수 있어 가뭄 피해를 일부 경감할 수 있는 효과적 대안으로 판단되었다.
- 3) 홍수발생 시 저수지 수위 EL.34.0 m 까지 유입량 일부를 저류하면서 250 m³/s로 조절방류하는 운영대안 Case 3의 운영결과 모든 홍수사상에 대해서 Case 1 (기존운영) 보다 저수지 저류율은 증가하였으며, 저수지 방류율은 감소하여 저수지 운영효율이 증가한 것으로 나타났다. 또한, EL.34.0 m 까지 250 m³/s로 조절방류를 실시하여 댐 운영자의 대응시간 및 하류지역 인명대피 시간 등 긴급상황 발생 시 대응시간 확보측면에서 기존운영방법보다 약 19시간을 추가 확보할 수 있는 것으로 확인되어 긴급상황 발생 시 적용할 수 있는 효과적인 운영대안으로 판단되었다.
- 4) 본 연구에서 사용된 자료는 군남홍수조절지 건설 이후의 자료만을 대상으로 하여 2011~2016년 총 6개년 자료에 불

과하다. 이는 모든 이수 및 치수에 관련한 상황을 대표할 수 없는 한계를 보이므로 다양한 홍수사상을 반영할 수 있도록 향후 추가적인 자료획득이 가능하다면 보다 신뢰성 높은 연구수행이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 17AWMP-B083066-04).

References

- Hydrologic Engineering Center (2013). *HEC-ResSim: reservoir system simulation use's manual (version 3.1)*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Jang, S. H., Lee, J. K., Oh, J. H., and Lee, H. S. (2016). "Drought and water deficit analysis in Imjin river basin: focusing on influence of Hwanggang dam in North Korea." *Crisionomy, Crisis and Emergency Management: Theory and Praxis*, Vol. 12, No. 5, pp. 79-95.
- Kim, D. P., Kim, K. H., and Kim, J. H. (2011). "Runoff estimation of Imjin river basin through april 5th dam and Hwanggang dam construction of North Korea." *Journal of the Environmental Sciences, Korea Environmental Sciences, Association*, Vol. 20, No. 12, pp. 1635-1646.
- Kwak, C. J., Choi, W. J., and Cho, J. W. (2015). "An assessment of flooding risk using flash flood index in North Korea -focus on Imjin basin-." *Journal of Korea Water Resources Association, Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 12, pp. 1037-1049.
- Lee, C. S. (1997). *A study of flood propagation analysis and Yunchun dam failure in the Imjin river basin*, Kyonggi University.
- Lim, H. T. (2001). *The study on effects to lower basin water surface elevation by the flood in watershed of the Imjin river*, Kyonggi University.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2007). *Basic and detailed design report of Gunnam flood control dam construction project*.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2011). *Imjin river master plan*.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2011). *Water vision 2020 report*.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2014). *Disaster status management information*.
- Park, S. S. (2000). *The study on estimating flood discharge & measurement for flood disaster control in watershed of the Imjin river*. Kyonggi University.

Song, M. Y., Lee, G. Y., Baek, K. O., and Han, S. H. (2015). "Preliminary assessment of decreased river flow and its adaptive management in Imjin basin." *Gyeonggi Research Institute*, Vol. 2015, pp. 1-105.

Yu, M. S. (2016). *Development of observed and forecasted rainfall application technique to improve the reliability of flood prediction for ungaged watershed*. Ajou University.