

북한의 4월5일댐과 황강댐 건설에 따른 임진강 유역의 유출량 평가

김동필* · 김경호¹⁾ · 김주훈

한국건설기술연구원 수자원연구실, ¹⁾충북대학교 토목공학과
(2011년 10월 21일 접수; 2011년 11월 9일 수정; 2011년 11월 29일 채택)

Runoff Estimation of Imjin River Basin through April 5th Dam and Hwanggang Dam Construction of North Korea

Dong-Phil Kim*, Kyoung-Ho Kim¹⁾, Joo-Hun Kim

Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

¹⁾Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheong-Ju 361-763, Korea

(Manuscript received 21 October, 2011; revised 9 November, 2011; accepted 29 November, 2011)

Abstract

This April 5th dam and Hwanggang dam, which are located in Imjin river, North Korea, become the main causes of water shortages and damages in Imjin river downstream. April 5th dam is assumed a small or medium-sized dam, its total storage volume reaches about 88 million m³. And Hwanggang dam, multi-purposed dam of total storage volume approximately 0.3 billion m³ to 0.4 billion m³ is used as source of residential or industrial water in Gaeseong Industrial Complex, North Korea, which has April 5th dam and Hwanggang dam in Imjin river, manages water of approximately 0.39 billion m³ to 0.49 billion m³ directly. As water is stored or discharged through dam, it causes a severe damage to areas in Yeoncheon-gun and Paju city, South Korea. Therefore, this study intends to analyze and estimate runoff through dam construction by using hydrological observation data and artificial data such as service water supply and agricultural water in Imjin river, water shortage and damage correctly.

Key Words : April 5th dam, Hwanggang dam, Imjin river, Hydrological observation data, Water shortage, Water damage

1. 서론

물은 국가의 경제발전, 삶의 질 향상에 기여하는 바가 매우 크다. 물을 확보하는 과정에서 지역간, 국가간 발생하는 물 문제는 첨예한 상황에 직면해 있다. 특히 협력과 조정에 한계가 있는 국제하천의 분쟁은 더욱 심각하며, 내륙운하, 하천관리, 홍수조절, 수력발전 그리고 수리권 문제 등 다양한 원인들이 작용하고 있다.

1953년 이스라엘, 요르단, 시리아가 관련된 요르단 도수계획과 1974년 리비아의 A1-Thawra 댐 영향에 의한 유프라데스강 물 부족 등의 군사적 충돌, 1992년 슬로바키아와 헝가리의 댐을 이용한 유역변경의 국제사법재판소 소송제기 사건 등 국제하천 분쟁은 끊임 없이 발생하였다. 한반도에서도 남·북한이 공동으로 점유하는 공유하천인 임진강의 수자원의 이용과 관련된 갈등은 계속되는 상황이다(이 등, 2008).

*Corresponding author : Dong-Phil Kim, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea
Phone: +82-31-9100-192
E-mail: dpkim@kict.re.kr

공유하천의 특징 중 하나는 상류를 점유하고 있는 국가의 하천 사용 방법에 따라 하류측에 있는 국가의 하천이 지대한 영향을 받는다는 것이다. 더욱이 우호적이지 못한 국가관계인 남·북한의 특수성에 기인하

여 공유하천의 상류측(북한지역)의 기초적인 정보조차 알기 어려운 상황이다. 임진강의 경우 유역면적의 2/3 정도가 북한에 위치해 있어 불확실성이 상당하므로 하천관리가 더욱 어려운 실정이다. 따라서 임진강 유역의 수해방지를 위해 2004년에 남·북한이 합의한 '임진강 수해방지 실무협의회'가 지속적이고 실질적인 역할을 수행하여야 할 것이다(경기개발연구원, 2010).

한반도에서 공유하천인 임진강 유역은 북한의 4월 5일댐과 황강댐 건설에 따라 그 하류 유역은 댐의 저류와 방류의 영향으로 물 부족과 피해가 발생하고 있는 상황으로 효율적인 하천유역 관리를 위해서는 명확한 유출량 평가가 수반되어야 할 것이며, 유출량 분석을 위해서는 장기 유출모형의 적용이 타당할 것이다. 자연하천 유역에 대한 장기 유출모형으로는 우량으로부터 하천 유량을 추정하는 유출 계산법으로 계획 유량을 추정하거나 홍수나 갈수의 예측에 활용되는 TANK 모형이 있으며(Sugawara 등, 1983), 연속강수량과 증발량 자료를 입력하여 유역출구에서 연속 수문곡선을 계산하는 HSPF(Hydrological Simulation Program Fortran) 모형이 있다(Bicknell 등, 1977). 또한 미공병단에서 수자원 설계 및 운영에 필요한 수자원 시스템의 해석을 위해 개발한 SSARR(Stream flow Synthesis and Reservoir Regulation) 모형과 홍수량 산정을 위한 HEC series 모형 등이 있다(US Army Corps of Engineers, 2011). 미국 국립 기상국(NWS)에 의해 개발된 HEC-1의 kinematic wave 하도추적 모형을 결합하여 만든 NWS-PC(National Weather Service-Personal Computer) 모형이 있으며(Tabios 등, 1986), 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에 의해 개발된 분포형 장기 유출모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형이 있다(Arnold 등, 1993). SWAT 모형을 개선하여 우리나라 특성에 맞도록 인위적, 자연적인 물순환 구조변화와 지표수-지하수 연계 해석 등을 개선하여 강우, 증발산, 토양수분, 지표수, 지하수의 사-공간적 분포를 정량적으로 산정하는 장기유출 해석 모형인 SWAT-K(Korea) 모형 등이 있다(김 등, 2008).

따라서 본 연구에서는 한반도의 공유하천인 임진강 유역의 효율적인 하천유역 관리를 위하여 남한의 군남 수위관측소를 유역출구로 하는 북한의 4월5일댐과 황강댐 건설 전·후의 유출량 산정 및 평가를 통하여 댐 건설 이후의 물 부족량(댐 저류량) 및 피해량(댐 방류량)을 명확히 분석함에 있다.

2. 대상유역 현황

2.1. 일반현황

임진강은 북한에서 발원하여 남한으로 흐르는 대표적인 하천으로 강원도 문천군에 위치한 마시령의 남쪽경계에서 발원하여 남쪽으로 유하하면서 강원도 이천군을 통과하여 황해도로 거쳐 경기도로 유입되어 한탄강과 합류한 후 다시 파주 서측의 한강과 합류하여 강화만을 통해 서해로 유입된다. 임진강은 국가하천으로 유역면적은 8,117.5 km² 이고, 총 유로연장은 254.6 km 이다. 그 중 군사분계선(DMZ)을 기준으로 볼 때, 남한지역의 유역면적은 3,008.7 km²로 전체 유역면적의 약 1/3(37.1%)에 불과하며, 나머지 2/3(62.9%)는 북한지역에 위치하고 있다. 유역 전체의 평균폭은 33.3 km로서 임진강 상류의 22.4 km로부터 한탄강 유역을 제외한 합류후의 유역 평균폭은 21.9 km로 대체적으로 균일하며 유역면적에 따라 5.1~13.9 km의 분포를 보이고 있다. 임진강 전체유역의 형상계수는 0.126으로 하도연장에 비해 유역폭이 작은 형태로서, 유역형상은 지천이 작고 본류가 유역의 중앙을 관통하고 있으며, 우측으로부터 고미탄천, 평안천, 역곡천 및 한탄강 등이 차례로 합류하는 유상형태를 나타내고 있다. 임진강 유역의 지세는 험준한 산악구릉지대이며, 일부 하류구간을 제외한 본류 및 지류는 협곡을 형성하고 있다. 본류의 상류 및 중류부는 험준하여 고도 500~800 m 이상의 고산고봉이 연속되어 있으며 하천은 그 계곡을 따라 유하한다. 유로는 굴곡이 많이 발달된 편이며 대체로 하폭이 일정하고 연안지가 협소하다. 하상경사를 보면 상류부 구간은 매우 급하지만 고미탄천 합류부 이후부터는 점차적으로 완만해지며 하류부에서는 현저하게 완경사를 이루고 있다. 하구에서부터 연천군 장남면 고량포 지점까지 약 40 km 구간은 조위의 영향을 받는 구간으로써 곳곳에 천주

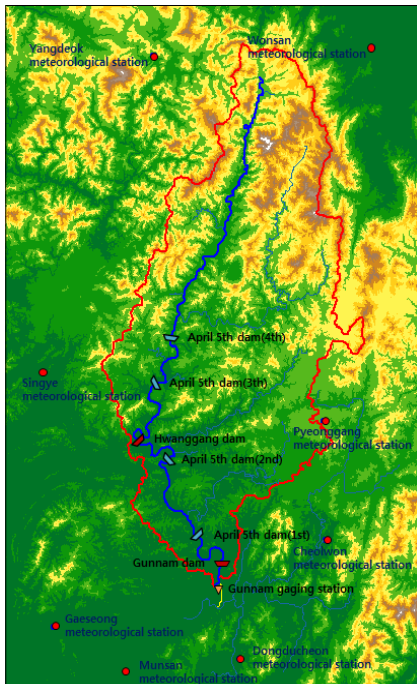


Fig. 1. The topographic map of Imjin river basin.

가 형성되어 있다. 따라서 인구밀집지, 농경지 및 기반 시설들이 집중된 하류부에서 홍수시 상대적으로 수해가 심해가 발생할 개연성이 높은 유역이다(경기개발연구원, 2010).

본 연구의 대상유역 출구인 군남 수위관측소의 유역면적은 4,260.0 km²이며, 유로연장은 193.1 km이다. 1989년 관측개시일 이후부터 수위관측을 지속적으로 해오고 있으며, 유량자료의 생성은 2000년부터 시작되었다. 한탄강 합류점으로부터 7.02 km, 한탄강 합류 이전 임진강 본류에 위치한 지점으로 4월5일댐과 황강댐의 저류 및 방류시 직접적인 피해를 입는 지역으로 댐 건설 영향에 따른 유출량 평가를 위한 최적의 지점으로 볼 수 있다.

2.2. 댐 건설 현황

임진강 중상류에 위치한 4월5일댐은 중소형 발전용 댐으로 총 4호기로 되어 있으며, 1호기, 2호기는 2001년에 완공된 것으로 추정되며, 저수용량은 각각 20백만 m³과 7.7백만 m³이다. 1호기는 개성시 장풍군

금현동에 위치하고 있는 콘크리트 댐으로 높이 약 13 m, 길이 385 m이며(군사분계선 북쪽 4.6 km), 2호기는 강원도 토산군 다리골에 위치하고 있는 콘크리트 댐으로 높이 약 10 m, 길이 500 m 규모이다(군사분계선 북쪽 27.7 km). 그 이후 2002년에 3호기 및 4호기가 완공되었으며, 저수용량은 각각 30백만 m³으로 추정된다.

2007년 12월경 완공되어 담수가 시작된 것으로 확인된 황강댐은 군사분계선으로부터 42.3 km 북쪽에 위치하며, 저수용량 3~4억 m³ 규모의 다목적댐으로 저류된 물을 예성강으로 돌려 개성공단에 공업용수와 생활용수를 공급할 것으로 알려져 있다. 황강댐은 콘크리트 중력식댐과 중심코아형 석괴댐으로 이루어진 복합댐으로 댐 총길이 880 m로 추정되는 댐이다. 황강댐 유역면적은 2,822.4 km²으로 임진강 유역면적 8,117.5 km²의 35%에 달하며, 2010년 6월에 완공된 연천의 근남댐 유역면적 4,190.9 km²의 약 67%에 해당된다. 황강댐 저수용량은 임진강 유역 수량의 20% 가량 차지하고 있는 것으로 추산되므로 임진강 하류의 용수수급에 심각한 영향을 미치는 규모이다. 임진강 수계에 4월5일댐과 황강댐을 보유한 북한은 임진강 상류에서 약 3.9~4.9억 m³에 이르는 물을 직접 관리할 수 있으므로, 댐의 저류와 방류시 임진강 하류에 위치한 연천군 및 파주시에 직접적인 피해를 발생시키고 있는 상황이다.

3. 수문자료의 수집, 검토 및 분석

3.1. 수문자료 수집 및 검토

북한의 4월5일댐과 황강댐 건설에 따른 임진강 하류 유역의 유출량 평가를 위한 수문자료는 Table 1과 같다. 댐 건설 전·후의 영향을 평가하기 위하여 가용기간의 자료를 모두 수집하였다. 수문분석을 위한 시간간격은 일단위로 선정하였으며, 수집된 자료 중 일단위 자료가 아닌 일부의 자료는 일단위로 환산하여 유출분석에 이용하였다.

강우량 자료의 경우 북한 지점의 자료 중 2008년 이전까지는 부분적인 결측이 대다수 존재하므로, RDS 방법(reciprocal distance squared method)을 적용하여 결측자료를 보완하였다. 1일 강우량의 시간간격은 전

일 21시부터 당일 21시까지의 값이므로 정시 시간간격과는 다소 차이를 보이고 있다. 8개 강우량 관측소의 보완된 자료를 이용하여 지점우량을 확정하였으며, 티센가중법(Thiessen weighting method)을 적용하여 유역평균우량을 산정하였다. 군남 수위관측소의 수위자료는 일부 동절기 자료의 부재와 1999년, 2002년, 2004년 및 2007년에는 결측일수가 100일을 초과하는 관측현황을 보이고 있다. 또한, 수위-유량관계곡선식은 2000년부터 개발되었으며, 2010년까지 8개년의 자료가 있으므로 수위자료로부터 환산우량을 전 기간에 걸쳐 얻을 수 있었다. 다만, 수위-유량관계곡선식이 개발되지 않은 년도에 대해서는 년 유출률을 검토하여 인근년도에 개발된 곡선식을 적용하였다.

유역의 증발산량 산정을 위한 최소한의 기상자료로는 일기온(최고, 최저), 일상대습도(최대, 평균, 최소), 일평균 풍속, 일조시간, 관측소 고도, 위도자료 등이다. 북한의 기상자료 경우 일조시간 자료가 없으므로 남한의 철원, 동두천, 문산 지점의 월평균 일조시간과 위도자료로부터 평균 지점계수를 산출하였으며, 이를 북한의 5개 지점에 적용하여 월별 지점계수를 산

정하였다. 그리고 남한의 3개 지점의 일평균상대습도와 일조시간과의 상관식을 월별로 도출하여 북한의 5개 지점에 대해 지점계수와 곱으로 일조시간을 추정하였다.

생성된 기상자료를 활용하여 FAO Penman- Monteith 공식에 적용하여 일증발산량을 산정하였으며, 유역평균우량 산정방법과 동일한 방법을 적용하여 유역증발산량을 산정하였다(한국건설기술연구원, 2010). 특히 비 홍수기 동안 4월5일댐과 황강댐의 댐 저류에 의한 영향으로 군남 상수도 취수장의 하천수 사용 허가량 취수 가능 여부, 하천관리를 위한 최소유량인 기준갈수량(군남 : 6.297 m³/s)과의 관계를 역학적으로 분석하기 위한 자료로 상수 및 농업용수 취수량을 조사 수집하였다.

3.2. 수문분석

3.2.1. 수문분석 모형

연구 대상유역의 유출량을 모의하기 위한 분석 모형으로는 NWS-PC 모형을 선정하였다. 미국 국립 기상국(NWS)의 수문예측 사업 그룹은 강수, 눈의 축적

Table 1. Status of hydrological data collection

Item	Station	Duration	Remark
Rainfall	North Korea : Wonsan, Yangdeok, Singye, Pyeonggang, Gaeseong	1999 ~	○ North Korea rainfall data - unit : day(the day before 21 o'clock ~ the day 21 o'clock) - GTS message formation data of KMA
	South Korea : Cheolwon, Dongducheon, Munsan	2010	○ South Korea rainfall data - http://www.kma.go.kr
Water-level (Discharge)	Gunnam	1999 ~	○ Water-level(Discharge) data - hydrological survey annual report of MLTM
		2010	○ Start of water-level gauging : 1989 year ○ Formation of discharge data : since 2000 year
Rating curve	Gunnam	2000 ~	○ Rating curve data - hydrological survey annual report of MLTM
		2010	○ Application of rating curve(except 2001, 2008 and 2009 year)
Meteorological data	North Korea : Wonsan, Yangdeok, Singye, Pyeonggang, Gaeseong	1999 ~	○ North Korea meteorological data - item : temperature, windspeed, humidity(unit : 3 hour) - GTS message formation data of KMA
	South Korea : Cheolwon, Dongducheon, Munsan	2010	○ South Korea meteorological data - item : temperature(max, min), windspeed, humidity, daylight hour - http://www.kma.go.kr
Water supply /agricultural water	Gunnam(water supply intake station)	1999 ~	○ Water supply and agricultural water data - http://www.hrfco.go.kr
	Yeoncheon-gun, Yeoncheon-eub, Chatan-ri(agricultural water)	2010	○ Permission quantity for water use

과 용해, 토양 함수상태의 계산, 흐름에 대한 매개변수 최적화 등의 유출 예측 체계를 컴퓨터 프로그램화하여 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System) 모형을 개발하였다. NWS-PC 모형은 NWSRFS의 축소 모형으로 크게 토양함수 상태계산(SAC-SMA, Sacramento-Soil Moisture Accounting) 부모형(Fig. 2)과 흐름에 대한 추적 부모형으로 구분된다. 토양함수 상태계산의 모형 분류는 확정론적 집중형 입력(lumped input), 집중형 매개변수(lumped parameter) 모형에 속하며, 이는 수문순환 과정의 토지부분에서 입력된 강우를 하도 흐름의 유입량으로 변환시킨다. 흐름에 대한 추적 모형의 기능은 하도 유입량의 유역 또는 소유역 출구의 유출로 추적하며 운동파 추적법(kinematic wave method)이나 단위도 Muskingm 방법의 조합을 사용한다(김, 1997).

NWS-PC 모형은 1시간단위 또는 일단위의 장기 유출 분석에 적합한 모형으로 입력되는 자료는 유역에 적용할 토양함수 상태 관련 매개변수 및 하도추적을 위한 유역특성 자료가 포함된 주 입력 파일과 강우량, 증발산량, 유출량 등이 입력되어 있는 총 4개의 입력화일이 요구된다. 토양함수 상태 부모형의 매개

변수 보정은 수문곡선을 분석하여 추정하는 수동보정과 제약 Rosendrock 최적화 알고리즘을 이용하여 추정하는 자동보정이 있다. 본 연구에서는 수동보정과 자동보정의 조합 시 발생하는 불이익을 극복하기 위하여 제안한 3단계, 즉 초기는 수동보정으로, 중간은 자동보정으로, 최종은 두 방법을 조합하여 보정절차를 수행하였다(Brazil과 Hudlow, 1980). 초기 모형의 매개변수를 얻기 위하여 NWS-PC 모형의 매뉴얼에 기술된 절차에 따라 관측 수문곡선과 전 유역의 토양특성과 모형 매개변수간의 관계를 분석하였다. 수동보정은 관측과 모의발생 흐름간의 오차를 시행착오법으로 수행하며, 자동보정은 식 1과 같이 관측 및 모의 발생 흐름간의 시간대별 편차제곱합을 최소화하는 목적함수를 설정하여 직접탐색법에 의해 최적치를 구하는 최적화 기법에 의해 수행되고, 자동보정되는 매개변수는 사용자가 임의로 선정하도록 되어있다.

$$Min \sum (Q_{obs} - Q_{cal})^{2.0} \quad (1)$$

여기서, Q_{obs} 는 관측유량, $Q_{cal} = Q(\Pi, \theta)$ 는 계산유량을 나타낸다.

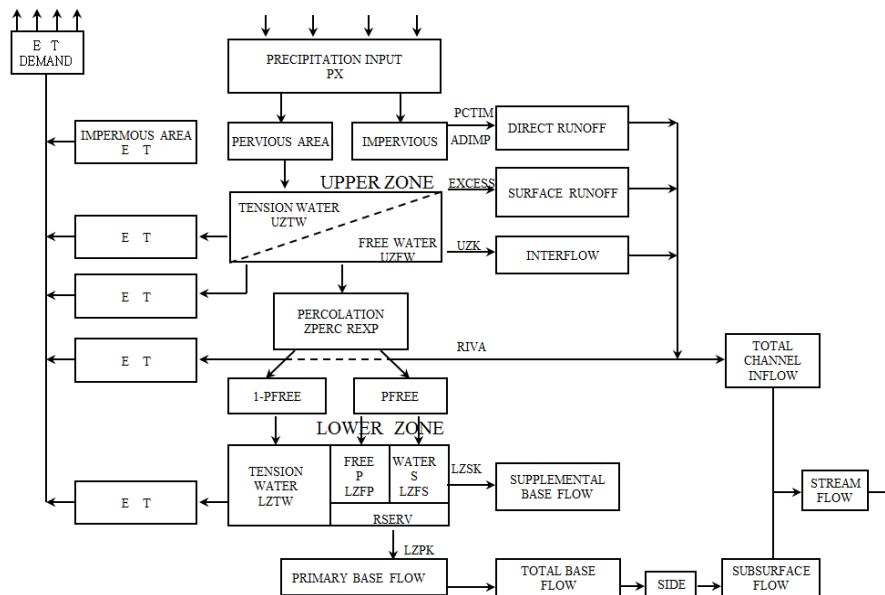


Fig. 2. Flow chart of sacramento soil moisture accounting model.

제약조건으로는

$$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$$

(2)

여기서, θ_{\min} 과 θ_{\max} 는 각 매개변수의 상·하한값을 나타내고, Π 는 입력자료, 즉 강우량을 나타낸다. NWS-PC 모형의 매개변수 초기값 추정과 보정은 댐 건설 이전인 1999~2000년 수문자료를 이용하여

Table 2. Parameter range, calibrated values and description(SAC-SMA model)

Soil moisture phase	Parameter	Range		Value	Description
		Lower	Upper		
Upper zone	UZTWM	-	-	105.0000	Upper zone tension water storage capacity
	UZFWM	-	-	30.0000	Upper zone free water storage capacity
	UZK	0.1000	1.0000	0.1800	Upper zone free water storage depletion coefficient
	ADIMP	0.0010	1.0000	0.0100	Fraction of impervious area when all tension storage water requirements are met
Percolation	ZPERC	0.0000	20.0000	8.7000	Proportionality constant in increasing percolation from saturated to dry condition
	REXP	0.0000	1.0000	0.6000	Exponent defining curvature in percolation curve with changes in the lower zone soil moisture deficiency
Lower zone	LZTWM	-	-	420.0000	Lower zone tension water storage capacity
	LZFSM	-	-	298.5000	Lower zone supplementary water storage capacity
	LZFPM	-	-	300.0000	Lower zone primary water storage capacity
	LZSK	-	-	0.0930	Lower zone supplementary storage depletion coefficient
	LZPK	-	-	0.2569	Lower zone primary storage depletion coefficient
	PFREE	-	-	0.1000	Fraction of percolated water transmitted directly to the lower zone free water
	RSERV	-	-	0.3000	Fraction of lower zone free water unavailable for transpiration purposes
Initial water	UZTWC	-	-	21.0000	Upper zone tension water storage content
	UZFWC	-	-	6.0000	Upper zone free water storage content
	LZTWC	-	-	84.0000	Lower zone tension water storage content
	LZFSC	-	-	59.7000	Lower zone supplementary water storage content
	LZFPC	-	-	60.0000	Lower zone primary water storage content
	ADIMC	-	-	525.0000	Temporary impervious area storage content
Etc	PXADJ	-	-	0.8000	Precipitation adjustment factor
	PEADJ	-	-	0.6000	Evapotranspiration demand adjustment factor
	RIVA	-	-	0.8000	Fraction of basin covered by streams, lakes and riparian vegetation
	PCTIM	-	-	0.2400	Fraction of permanent impervious area
	SIDE	0.0000	10.0000	1.0000	Portion of base flow not observed in the channel

Table 3. Parameter range, calibrated values and description(kinematic wave model)

Kinematic wave phase	Parameter	Value		Description
		Overland Flow Element	Main Channel	
	TAREA	4,268.0000		Total flow plane area
	CHLNG	11,049.7000	193,127.0000	Overland flow length or channel length
	SLOPE	0.1327	0.0020	Overland flow plane or channel slope
	RCMAN	1.0000	0.0400	Roughness coefficient
-	PAREA	100.0000	-	Fraction of area serviced by overland flow plane
	SAREA	-	4,268.0000	Contributing area to a collector channel
	ISHAPE	-	5.0000	Shape of channel
	CHWDT	-	117.3000	Channel width
	ZLNG	-	2.3000	Channel side slope

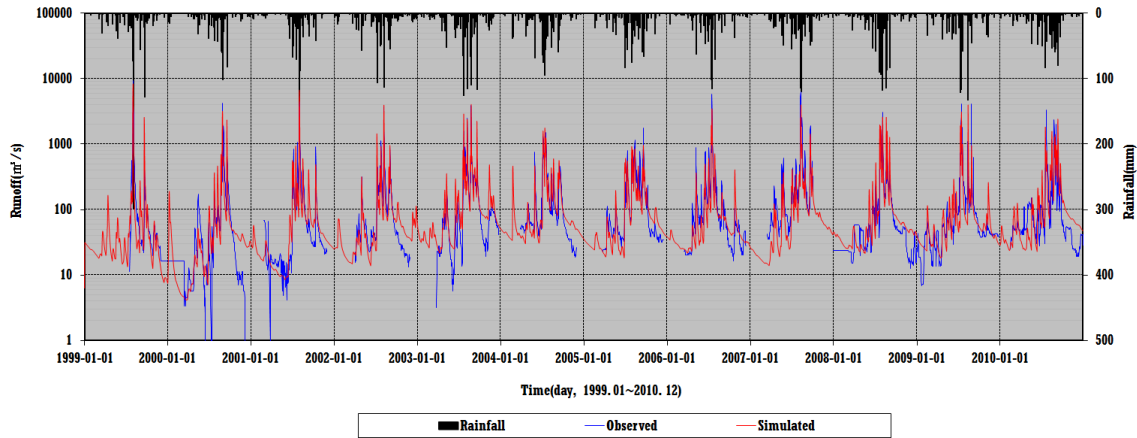


Fig. 3. Status of rainfall-runoff(Gunnam gauging station, 1999~2010).

NWS-PC 모형의 매뉴얼 지침에 따라 첨두유량 및 첨두유량 발생시간의 관측값과 모의값의 오차를 최소화하는 방법으로 수행하였으며, 결정된 매개변수는 Table 2~3과 같다. 그리고 운동파 추적 부모형의 매개변수는 대부분 지리정보시스템(GIS) 도구를 이용하여 추출한 값을 사용하였다.

3.2.2. 모의 분석 결과

북한의 4월5일댐과 황강댐은 각각 2001년(1, 2호기), 2002년(3, 4호기) 및 2007년에 완공되었으므로, 2001년 이전 기간을 자연상태의 유출 발생기간으로 볼 수 있다. 따라서 댐 건설 이전 기간인 2001년 이전 즉, 1999~2000년을 모형 모의의 보정기간으로 설정하였으며, 그 이후 기간을 댐 영향을 받는 기간으로 설정하여 일별 유출량을 모의함으로써 댐 하류 유역출구인 군남 수위관측소의 관측유량과 비교 평가할 수 있다. Fig. 3 및 Table 4와 같이 모의값은 관측값과 수문곡선 형상이 유사하고, 총 유효 유출량에서도 유사한 값을 보이는 것으로 분석되었다. 그리고 관측유량

과 모의유량에 대하여 통계값을 계산하였으며 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서 보는 바와 같이 보정기간인 1999~2000년(평균)의 통계값은 E(0.595), RMSE(381.408 m³/s), MAE(192.248 m³/s), RE(16.73%), R²(0.649)로 대체로 양호한 결과를 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 2001년 이후의 평균 통계값에서는 E를 제외하고는 적은 오차 및 결정성이 다소 높은 것으로 분석되었다. 그러나 2001~2010년의 통계값은 모형의 모의 정도 개선 결과에 초점이 맞추어진 것이 아님을 주의해야 한다. 즉 관측유량과 모의유량의 차이는 댐 운영 조작에 의해 발생한 양으로 댐 하류 유역인 남한 지역에 물 부족 및 피해를 보여주는 결과를 제공하는 수치인 것이다.

Table 6은 각 년도별 유출률을 산정한 것으로, 1999년부터 2010년까지의 관측값 평균 유출률(유효)은 67.1%로 모의값의 64.8%보다는 다소 높으나 전체적으로 양호한 결과로 보인다. 다만 2003년, 2006~

Table 4. Comparison of observed discharge with simulated discharge

Item	1999~2000		2001~2010		Remark
	Total	Available	Total	Available	
Observed value	Total runoff(10 ⁸ m ³)	-	54.889	-	386.373
	Depth of runoff(mm)	-	1,286.1	-	9,052.8
Simulated value	Total runoff(10 ⁸ m ³)	64.359	58.667	397.521	370.040
	Depth of runoff(mm)	1,507.9	1,374.6	9,314.0	8,670.1

○ Number of missing days
 - 1999~2000 year : 227 days
 - 2001~2010 year : 810 days

Table 5. Result of statistical analysis

Item	E (Nash-Sutcliffe efficiency)	RMSE(m ³ /s) (Root mean square error)	MAE(m ³ /s) (Mean absolute error)	RE(%) (Relative error)	R ² (Coefficient of determination)
1999	0.554	582.559	274.625	22.29	0.637
2000	0.635	180.256	109.870	11.17	0.660
2001	0.685	230.771	160.713	10.57	0.811
2002	0.436	220.698	133.777	10.68	0.574
2003	0.384	260.110	160.328	9.90	0.628
2004	0.838	92.545	147.204	3.71	0.836
2005	0.651	133.039	150.951	5.09	0.694
2006	0.750	214.226	168.133	8.07	0.767
2007	0.631	430.305	321.886	9.23	0.769
2008	0.665	156.185	127.196	7.03	0.761
2009	0.335	316.756	139.314	12.75	0.379
2010	0.369	275.194	159.559	9.41	0.411
Average 1999~2000	0.595	381.408	192.248	16.73	0.649
Average 2001~2010	0.574	232.983	166.906	8.64	0.663

Table 6. Comparison of runoff rate

Item	Average rainfall (mm)		Observed value				Simulated value				Remark	
			Depth of runoff(mm)		Runoff rate(%)		Depth of runoff(mm)		Runoff rate(%)		Avail., gap (%)	Missing days
	Total	Avail.	Total	Avail.	Total	Avail.	Total	Avail.	Total	Avail.		
1999	1,486.4	1,161.2	-	687.9	-	59.2	879.8	763.2	59.2	65.7	-6.5	196
2000	1,148.6	1,124.9	-	598.2	-	53.2	628.1	611.4	54.7	54.3	-1.2	31
2001	1,303.1	1,257.5	-	739.6	-	58.8	822.1	775.8	63.1	61.7	-2.9	85
2002	1,266.0	1,132.2	-	650.5	-	57.5	751.0	662.2	59.3	58.5	-1.0	123
2003	1,694.2	1,623.3	-	881.9	-	54.3	1,221.2	1,147.7	72.1	70.7	-16.4	90
2004	1,312.2	1,194.7	-	797.7	-	66.8	950.2	816.3	72.4	68.3	-1.6	117
2005	1,220.9	1,163.8	-	865.8	-	74.4	811.9	750.4	66.5	64.5	+9.9	97
2006	1,206.6	1,160.2	-	887.7	-	76.5	801.7	742.1	66.4	64.0	+12.5	92
2007	1,425.5	1,341.1	-	1,350.7	-	100.7	950.2	801.1	66.7	59.7	+41.0	160
2008	1,423.4	1,423.4	860.5	860.5	60.5	60.5	1,014.4	1,014.4	71.3	71.3	-10.8	0
2009	1,315.3	1,315.3	960.9	960.9	73.1	73.1	882.5	882.5	67.1	67.1	+6.0	0
2010	1,539.0	1,503.8	-	1,057.6	-	70.3	1,108.8	1,077.7	72.0	71.7	-1.3	46
Average	1,361.8	1,283.5	-	861.6	-	67.1	901.8	837.1	65.9	64.8	+2.3	86

2008년에는 많은 유출률 차이를 보이고 있다. 이것은 댐 하류 유역의 유출량 변화폭이 매우 큰 것을 의미하며, 즉 댐의 비정상적인 운영에 기인한 것으로 댐 하류 유역에 미칠 물 부족과 피해의 영향을 고려하지 않은 운영 결과로 볼 수 있다. 특히 2007년에는 100%를 상회하는 비합리적인 유출률을 보이고는 있으나, 당시의 유량측정성과, 수위자료 등 분석자료를 검토한 결과 이상이 없는 것으로 나타났으며, 12월에는 황강댐

완공과 담수가 개시된 시점으로 불안정한 유출이 발생하였을 것으로 사료된다.

3.3. 4월5일댐과 황강댐의 저류 및 방류

3.3.1. 댐 저류 현황

댐 건설에 따른 저류 기간은 대부분 9월부터 그 이듬해 관계기인 6월까지로 보인다. 다만 12월 초 중순부터 이듬해 3월말까지는 대부분 관측소 폐국에 따라

Table 7. Result of dam storage

Item		Average rainfall (mm)	Observed value (=runoff through dam operation) (10^8 m ³) (a)	Simulated value (=natural runoff) (10^8 m ³) (b)	Dam storage (=runoff deficit) (10^8 m ³) (c=a-b)
2001	04. 01 ~ 06. 30	212.4	1.252	1.354	-0.102
	09. 01 ~ 11. 30	204.5	4.521	6.626	-2.105
2002	04. 01 ~ 06. 30	238.5	3.960	3.397	+0.563
	09. 16 ~ 11. 28	96.1	1.969	3.859	-1.890
2003	04. 01 ~ 06. 30	333.8	3.780	5.766	-1.986
	09. 30 ~ 12. 23	163.2	4.478	7.959	-3.481
2004	04. 01 ~ 06. 30	273.9	6.659	4.886	+1.773
	09. 01 ~ 11. 29	213.5	7.027	8.718	-1.691
2005	04. 01 ~ 06. 30	315.7	4.132	4.049	+0.083
	10. 09 ~ 12. 16	55.2	2.529	4.132	-1.603
2006	04. 01 ~ 06. 30	387.2	10.161	5.897	+4.264
	09. 16 ~ 12. 12	125.5	2.863	4.436	-1.573
2007	04. 01 ~ 06. 30	322.5	9.309	4.962	+4.347
	-	-	-	-	-
2008	04. 01 ~ 06. 30	228.8	3.950	3.954	+0.004
	09. 18 ~ 12. 31	92.3	3.416	5.272	-1.856
2009	04. 01 ~ 06. 30	301.0	4.474	5.514	-1.040
	09. 26 ~ 12. 31	132.1	3.642	4.670	-1.028
2010	04. 01 ~ 06. 30	259.5	5.844	4.374	+1.470
	09. 22 ~ 12. 31	60.5	4.048	8.084	-4.036
Average (2001 ~ 2010)	4 ~ 6 month	287.3	5.352	4.415	-0.937
	9 ~ 12 month	127.0	3.833	5.973	-2.140
	Total	211.3	4.820	5.364	-0.544
Average (2001 ~ 2007)	4 ~ 6 month	297.7	5.608	4.330	+1.278
	9 ~ 12 month	143.0	3.898	5.955	-2.057
	Total	226.0	4.818	5.080	-0.262
Average (2008 ~ 2010)	4 ~ 6 month	263.1	4.756	4.614	+0.142
	9 ~ 12 month	95.0	3.702	6.009	-2.307
	Total	179.0	4.229	5.311	-1.082

관측자료의 부재로 저류 여부를 판단하기에는 무리가 있으며, 자료가 있다 하더라도 자료의 신뢰성이 부족한 경우가 많아 제외하기로 한다. 3.2.2절의 모의 분석 결과를 바탕으로 댐 저류량을 산정하면 Table 7 과 같다.

앞서 설명한 바와 같이 모형의 모의값은 자연유출량이며, 관측값은 댐 운영에 의해 영향을 받는 유출량으로 간주할 수 있다. 2001년부터 2010년까지 홍수기간을 제외한, 뚜렷하게 댐 저류의 영향을 받는 기간으로 나타나는 4~6월, 9~12월 기간의 댐 저류량을 산정한 결과 -4.036~+4.347억 m³의 범위를 갖는 것으

로 분석되었다. 전 기간에 대해서는 평균 0.544억 m³/년의 유출 부족량이 발생하는 것으로 분석되었다. 세부적으로 살펴보면, 황강댐 건설 완공 이전인 2007년 12월 이전은 4월5일댐만의 영향을 받는 기간으로 평균 0.262억 m³/년, 2007년 이후에는 평균 1.082억 m³/년의 저류량이 발생하였다. 대규모 다목적댐인 황강댐의 건설 이후에는 연간 저류량이 증가하였음을 알 수 있다.

3.1절에서 언급한 상수량(군남 상수도 취수장)과 농업용수 취수량(연천군 연천읍 차탄리)은 군남 수위 관측소의 기준갈수량 6.297 m³/s 이하의 범위내에서

가능한 공급량이다. 특히 Fig. 4와 같이 2001년 봄철인 3월 22~26일(0.760~6.030 m³/s), 5월 17일(5.620 m³/s), 5월 23일(4.870 m³/s), 6월 6일(4.190 m³/s)에는 기준갈수량 이하의 유출량을 보인 기간으로 취수장에서는 상수원 확보를 위해 임시 물막이보를 세 차레나 긴급 설치한 상황이 발생한 경우가 있었다(중부일보, 2001). 그러나 2001년 3월 15일~6월 6일까지의 총 강우량은 19.0 mm로 나타났으며, 관측값은 0.760~66.810 m³/s(평균 15.134 m³/s), 모의값은 8.426~23.031 m³/s(평균 8.426 m³/s)의 유출량을 보이므로 매우 극심한 가뭄상황이 지속되었음을 알 수 있다. 따라서 2001년 봄철의 적은 유출량은 매우 적은 강우량과 2001년 3월의 4월5일댐 1, 2호기 완공 전·후의 불안정한 댐 운영(댐 저류 포함) 등의 영향으로 볼 수 있다.

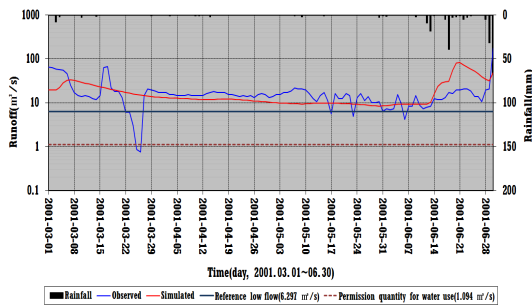


Fig. 4. Runoff deficit(Gunnam gauging station, 2001. 03~06).

3.3.2. 댐 방류 현황

댐 건설 이후 무단방류의 경우는 Table 8과 같이 크게 7차례로 볼 수 있다. 무단방류 시기는 주로 5~10월 사이에 발생하였으며, 강우량의 크기에 관계없이 2010년을 제외하고는 북측의 사전 통보 없이 발생하였다는 것이다. 2001년 10월 9~22일의 경우에는 10월 11일에 관측값 침두유량이 나타났으며, 10월 10일 오후 4월5일댐의 물의 방류로 인하여 연천, 파주지역 어민들의 어구, 어망 유실 등 약 2억원 가량의 재산피해를 발생시켰다. 관측값 침두유량은 모의값(자연유출량) 침두유량의 약 2배에 가까운 912.580 m³/s 이었으며, 댐 방류량은 0.119억 m³로 분석되었다. 2005년 9월 1~7일의 경우에는 9월 3일에 관측값 침두유량이 나타났으며, 9월 2일 4월5일댐의 물의 방류로 인하여

파주시 적성면, 파평면 일대 어민들의 어망과 통발 등의 약 6천만원의 재산피해를 발생시켰다. 관측값 침두유량은 모의값(자연유출량) 침두유량의 약 4배에 가까운 782.560 m³/s 이었으며, 이 기간의 댐 방류량은 1.614억 m³로 분석되었다. 2006년의 경우에는 5월과 6월 2차례 4월5일댐의 무단방류가 있었다. 관측값 침두유량의 발생은 각각 5월 7일과 6월 17일에 나타났으며, 이전의 상황과 유사하게 연천군과 파주시 일대에 수해를 발생시켰다. 이때의 관측값 침두유량은 모의값(자연유출량) 침두유량의 약 2배에 달하는 888.910 m³/s, 750.370 m³/s 이었으며, 2차례의 댐 방류량은 각각 1.441억 m³(5월 5~21일), 1.264억 m³(6월 14~19일)으로 분석되었다.

그리고 2009년, 2010년에도 무단방류 상황은 모두 3차례 발생하였다. 2009년 9월 5~7일의 무단방류량은 단기간이므로 0.5억 m³ 미만의 다소 적은 방류량을 보이나, 나머지 2차례의 방류량은 3.0억 m³ 이상의 매우 큰 방류량을 보인다. 황강댐 건설 완공 이후에 발생한 것으로 황강댐 완공 이전인 4월5일댐 방류량보다 약 3~4배 큰 것으로 분석되었다. 2009년 8월 26일~9월 4일의 강우량은 89.3 mm에 불과하나, 관측값 침두유량은 4,110.230 m³/s로 모의값 침두유량 914.885 m³/s의 약 4배에 달하는 유출량이 발생하였다. 같은 해 9월 5~7일에는 무강우임에도 불구하고 관측값 침두유량은 626.070 m³/s로 모의값 침두유량 102.652 m³/s의 약 6배에 달하는 유출량이 발생하였으며, 이로 인하여 6명의 실종자를 불러일으킨 참사를 맞이하였다. 2010년 7월 16일~8월 5일의 경우에는 7월 18일에 북한당국의 사전 통보가 있었던 경우로 이때는 장마전선의 영향으로 246.2 mm 많은 강우량이 발생하였으며, 모의값 침두유량의 약 2배에 달하는 3,356.010 m³/s의 관측값 침두유량과 4.880억 m³의 많은 댐 방류량을 발생시킨 것으로 분석되었다. 이때의 침두유량 발생시간은 모의값의 경우 2010년 7월 18일, 관측값의 경우에는 7월 23일에 나타나고 있어 댐 운영을 통한 방류시간의 조작이 이루어졌음을 알 수 있다.

임진강 상류에 위치한 북한의 황강댐 방류를 대비해 건설한 연천의 군남댐은 2010년 6월에 완공되었으며, 높이 26 m, 길이 658 m, 총저수량 0.7억 m³ 규모로

Table 8. Result of dam release

Item	Average rainfall (mm)	Observed value (=runoff through dam operation)		Simulated value (=natural runoff)		Dam release (=runoff surplus)		
		(a)		(b)		(c=a-b)		
		Volume (10 ⁸ m ³)	Peak flow (m ³ /s)	Volume (10 ⁸ m ³)	Peak flow (m ³ /s)	Volume (10 ⁸ m ³)	Peak flow (m ³ /s)	
2001	10. 09 ~ 22	65.3	2.207	912.580	2.087	483.712	0.120	428.868
2005	09. 01 ~ 07	26.3	2.554	782.560	0.941	194.723	1.613	587.837
2006	05. 05 ~ 21	70.1	2.854	888.910	1.413	360.367	1.441	528.543
	06. 14 ~ 19	57.7	2.806	750.370	1.542	490.724	1.264	259.646
2009	08. 26 ~ 09. 04	89.3	6.150	4,110.230	2.738	914.885	3.412	3,195.345
	09. 05 ~ 07	0.0	0.742	626.070	0.246	102.652	0.496	523.418
2010	07. 16 ~ 08. 05	246.2	11.764	3,356.010	6.884	1,721.185	4.880	1,634.825
Average		79.3	4.154	1,632.390	2.264	609.750	1.890	1,022.640

13개 수문조작을 통해 운영되는 댐이다. 군남댐의 완공으로 황강댐의 방류에 대비할 수 있는 홍수방어 체계를 구축하였으며, 이전과 같은 사고는 발생하지 않았다.

4. 결론

임진강 유역은 남·북한이 공동으로 점유하는 공유하천으로 수자원의 이용과 관련한 갈등은 계속되고

있으며, 이념적 대립관계에 있는 남·북한의 특수성과 임진강 유역면적의 2/3 정도가 북한에 위치하고 있는 여건 하에 임진강 유역의 하천관리는 매우 어려운 실정이다. 즉 군사분계선 북쪽 4.6~42.3 km에 위치하고 있는 4월5일댐과 황강댐의 건설로 인한 군사분계선 접경지역인 연천군과 파주시는 댐의 저류와 방류시 직접적인 피해를 받고 있다. 북한의 경제 발전과 맞물려 불가피하게 수자원의 이용이 필요하나, 국제하

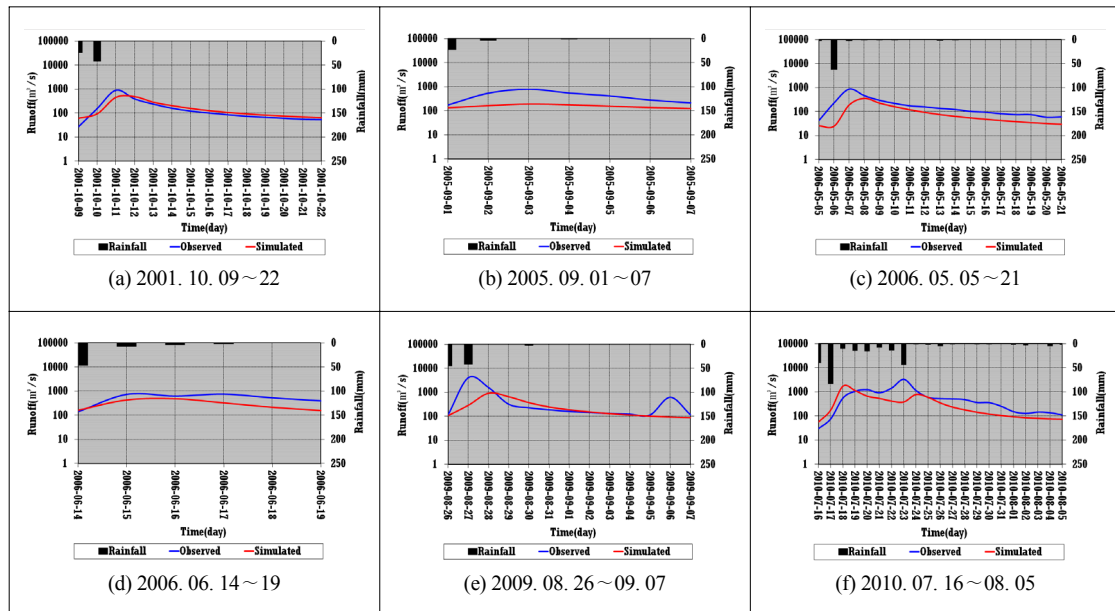


Fig. 5. Result of dam release.

천의 운영관례 미 준수, 남·북한이 합의한 ‘임진강 수해방지 실무협의회’의 실질적인 수행부분의 결여, 댐 운영 및 관리 능력의 부족(추정) 등은 더욱더 하천 관리를 어렵게 하고 있는 부분이다.

본 연구는 임진강 본류인 군남 수위관측소를 기준으로 유출량을 분석하였다. 북한의 4월5일댐, 황강댐 중 최초 완공 이전 년도인 1999~2000년을 자연유출량이 발생기간으로 설정하여 정도 높은 모의를 수행하였으며, 이를 바탕으로 댐 완공 이후의 유출량 변화, 즉 댐 저류량과 댐 방류량의 유출량을 분석, 평가하였다. 댐 저류량은 계절적인 영향과 가용자료를 고려하여 4~6월, 9~12월로 구분하여 평가를 하였다. 4~6월보다는 9~12월과 황강댐 건설 이후인 2008~2010년에 댐 저류량은 증가하였으며, 평균 0.544억 m³/년(2001~2010년)의 댐 저류량(유출 부족량)이 발생하는 것으로 분석되었다. 그리고 댐 방류량은 7차례의 무단방류 상황을 중심으로 살펴본 결과 모의값(자연 유출량)에 비해 0.120~4.880억 m³의 추가의 댐 방류량이 발생하였으며, 침투유량도 약 2~6배 크게 달하는 것으로 분석되었다. 침투유량의 발생시간도 모의값 침투발생 시간과 차이를 보이고 있으므로 댐 운영을 통한 방류시간의 조정이 확실히 된다. 관측자료의 불확실성, 부분적인 자료의 신뢰성 부족, 가용자료의 부족 및 유역특성을 반영하는 최적의 매개변수 적용 여부 등의 한계가 있었으나, 정도 높은 정량적인 유출량 평가를 수행할 수 있었다. 본 연구는 댐 건설에 따른 그 하류 유역의 유출량 평가를 수행한 것으로 향후 이 결과를 바탕으로 보다 구체적인 하천 유역의 수량, 수질관리를 위한 복합적인 분석을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 산지 하천 유역의 홍수예측을 위한 수문조사의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 경기개발연구원, 2010, 임진강 수난사고 방지를 위한 대응체계 구축방안, 정책연구 2009-82.
- 김남원, 이지은, 정일문, 김동필, 2008, SWAT-K 모형을 이용한 설마천 유역의 수문성분 해석, 한국환경과학회지, 17(12), 1363-1372.
- 김동필, 1997, 지리정보시스템을 이용한 강우-유출 모의 모형, 석사학위논문, 충북대학교.
- 이광만, 강부식, 홍일표, 2008, 남북한 공유하천의 갈등 해소와 공동이용을 위한 협력체계, 대한토목학회논문집, 28(5B), 505-514.
- 중부일보, 2001, <http://www.joongboo.com>.
- 한국건설기술연구원, 2010, 시험유역의 운영 및 수문특성 조사, 건기연 2010-089.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., Bernhardt, G., 1993, A comprehensive surface-groundwater flow model, *Journal of Hydrology*, 142, 47-69.
- Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Donigan, A. S., Johanson, R. C., 1997, Hydrological Simulation program-Fortran : User's Manual for version 11. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA, 1-755.
- Brasil, L. E., Hudlow, M. D., 1980, Calibration procedures used with the national weather service river forecast system, water and related land resource systems, Cleveland, Ohio, 1-466.
- Sugawara, M. I., Watanabe, I., Ozaki, E., Katsuyame, Y., 1983, Reference manual for the TANK model report, National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo, Japan.
- Tabios, III. G., Obeysekera, J. T., Salas, J. D., 1986, National weather service model : PC version, program and manual, assembled by the hydrology and water resources program, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1-137.
- US Army Corps of Engineers, 2011, <http://www.hec.usace.army.mil>.