

고해상도 RCM 자료를 이용한 기후변화가 한강유역의 수자원 (이수적 측면)에 미치는 영향 평가

The Evaluation of Climate Change Impacts on the Water Scarcity of the Han River Basin in South Korea Using High Resolution RCM Data

김수전 * / 김병식 ** / 전환돈 *** / 김형수 ****

Kim, Soo Jun / Kim, Byung Sik / Jun, Hwan Don / Kim, Hung Soo

Abstract

As an attempt to explore the impact of droughts which may be worse by the climate change, the change in the water balance of the Han-river basin is analyzed. To accomplish it, we suggest a procedure consisting of three successive sub-procedures: daily rainfall generation for 70 years by the RegCM3 RCM (27 × 27 km) with the A2 scenario, daily discharge simulations by SLURP using the generated daily rainfall data, and monthly water balance analysis by K-WEAP (Korean Water Evaluation and Planning System) based on the SLURP simulation. Since significant uncertainty is involved in forecasting the future water consumption and water yields, we assumed three water consumption scenarios and fifty water yields scenarios. Three water consumption scenarios are, namely, "LOW", "MEDIUM", and "HIGH" according to the expected amount of water consumption. The fifty daily discharges are obtained from the SLURP simulations during the drought period. Finally, water balance analysis is performed by K-WEAP based on 150 combinations from three water consumption scenarios and the fifty daily discharges. Analysis of water scarcity in small basins of the Han River basin showed concentration of water scarcity in some small basins. It was also found that water scarcity would increase in all small basins of the Han River basin.

Keywords : Climatic change, SLURP model, K-WEAP, Water balance analysis, Water scarcity

요 지

본 논문에서는 기후변화가 수자원의 이수측면에서 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 검토하고자 한강유역에 대한 물수지 변화를 분석하였다. 이를 위하여, 우선 RegCM3 RCM (27 × 27 km)의 A2 기후변화 시나리오를 이용하여 모의된 70년의 일강우량을 강우유출모형인 SLURP 모형의 입력자료로 활용하여 70년의 일유출량을 모의하였다. 다음으로 수자원평가계획모형인 K-WEAP 모형을 이용하여 한강유역의 월별 물수지 분석을 실시하였다. 하지만, 미래의 물수요와 기후변화에 의한 유출량을 예측하는 데는 많은 불확실성을 내포하기 때문에 3개의 물수요와 50개의 유출 시나리오를 가정하여 검토하였다. 여기에서, 3개의 물수요 시나리오는 예상되는 물수요에 따라 저수요, 기준수요, 고수요로 구분되며, 50개의 유출 시나리오는 70년 기간 동안 50 set씩 모의된 유출량계열을 의미한다. 따라서 3

* 인하대학교 토목공학과 박사과정

PhD Student, Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do, Korea

*** 교신저자, 서울산업대학교 토목공학과 조교수

Assistant Professor, School of Civil Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea
(e-mail: hwjun@snut.ac.kr)

**** 인하대학교 토목공학과 부교수

Associate Pfor., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

개의 기후변화 시나리오와 50개의 유출량 시나리오를 조합하여 150 Set의 입력자료를 구성하고 K-WEAP 모형을 이용하여 분석하였다. 검토 결과 미래에 한강유역의 물부족량은 장기적으로 증가하는 것으로 예상되었다. 그리고 한강유역의 소유역별 물부족량을 검토한 결과 특정 소유역에서 물부족이 가중되고 장기적으로 한강유역 전체로 물부족이 예상되는 소유역이 증가함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 기후변화, SLURP 모형, K-WEAP, 물수지, 물부족

1. 서 론

기후시스템의 온난화는 현재 관찰되는 지구 평균기온과 해수면 상승, 광범위한 눈과 빙하의 용해 및 지구 평균 해수면 상승의 관측 자료에서 명백히 나타나고 있으며 2050년까지 중앙아시아, 남아시아, 동아시아, 동남아시아에서 특히 대하천 부근에서는 사용 가능한 담수가 줄어들 것으로 예측된다 (the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report, 2007). 세계 곳곳에서 지난 수십년 동안 기후변화의 증거가 있으며 홍수와 가뭄의 발생빈도와 크기가 증가되고 있음이 많은 연구에서 밝혀지고 있다. 이러한 연구의 일환으로 기후변화에 의한 수자원의 영향 평가를 위하여 세계적으로 각국의 수자원시스템에 기후변화가 미치는 영향을 분석하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있으며, 또한 범국가적인 차원에서 기후변화의 영향을 검토하고 대응 및 적응 전략을 마련하고자 협력하고 있다.

기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 연구는 1980년대 중반 이후 활발히 진행되었다. Gleick (1986)은 전지구적인 기후변화가 지역의 수자원에 미치는 영향을 검토하고자 미국의 세크라멘토 유역을 대상으로 검토하였다. 이후 기후변화가 유출량 및 용수공급에 미치는 영향을 평가하는 연구 (Miller *et al.* (1992), Cooley *et al.* (1992))가 진행되었고 Bronstert *et al.* (1999)은 독일의 사례를 통하여 유출량 모의에 기후변화의 영향을 검토하였다. McCabe and Wolock (1999)은 기후변화가 미국 서부지역의 용설에 미치는 영향을 분석하였으며 Hamlet and Lettenmaier (1999)은 콜롬비아강 유역을 대상으로 수자원의 영향을 검토하였다. 또한 Roald *et al.* (2003)은 노르웨이에 대하여 기후변화 시나리오를 바탕으로 연평균 유출량과 계절평균 유출량을 모의하였다. Jha *et al.* (2003, 2004)은 기후변화가 미시시피강 상류유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유출량에 미치는 영향을 분석하였으며 Stewart *et al.* (2005)은 기후변화의 영향에 의하여 미국 서북부의 유출특성의 시간적 변화에 대하여 검토하였고 Andersson (2006) 등은 기후변화와 개발 시나리오에 따른 유출 변화의 영향을 분석하는 등 기후변화

의 영향에 의한 유출특성 변화를 검토는 많이 진행되고 있다. 그리고 기후변화에 의한 유출특성의 변화와 함께 물수지 개념으로 기후변화 영향에 의한 이수부문을 평가한 사례는 다음과 같다. Gleick (1987)은 미국의 세크라멘토 유역을 대상으로 물수지 모형을 개발하고 기후변화의 영향을 검토하였으며, Yates and Strzepek (1998) 이집트 나일강에 물수지 모형을 적용하여 기후변화 영향을 분석하였고 Guo *et al.* (2002)은 월단위 물수지모형을 이용하여 기후변화 영향에 의한 중국의 유량변화에 대하여 연구하였다. Purkey *et al.* (2008)은 미국 세크라멘토강 유역을 대상으로 기후변화의 영향을 검토하고자 WEAP (Water Evaluation and Planning System) 모형을 이용하고 적용성을 확인하였다.

우리나라의 경우도 안재현 등 (2001)은 대청댐 유역을 대상으로 기후변화 영향에 의한 수문환경변화를 검토하였으며, 김병식 등 (2004)은 YONU GCM과 축소기법을 이용하여 기후변화가 용담댐 유역에 미치는 영향을 평가하였고 이동률 등 (2004)은 기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 그리고 기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향을 평가하고자 기후모형인 SNURCM을 개발한 사례 (환경부, 2006)가 있으며, 21세기 프론티어 연구개발사업 (과학기술부, 2007)의 일환으로 기후변화에 의한 수자원 영향 평가체계를 구축한 바 있다. 배덕호 등 (2007)은 SRES A2 시나리오를 이용하여 기후변화에 따른 우리나라 수자원의 시공간 변화를 평가하였고 황준식 등 (2007)은 금강유역을 대상으로 기후변화 영향을 평가하기 위하여 물수지 모형을 검토하고 abcd 모형의 적용성을 확인하였다. 안소라 등 (2008)은 기후변화뿐만 아니라 미래 토지이용변화를 함께 고려하여 유출분석을 실시하였다. 하지만, 수자원분야에서 대부분 국내 연구는 기후변화에 의한 수문학적인 유출특성 분석에 초점이 맞추어져 있어 기후변화가 실질적으로 강우-유출에 미치는 영향과 이에 따른 물수지 분석을 통하여 수자원시스템에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가가 미흡한 실정이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 한강유역을 대상으로 기후변화를 고려하여 미래 물부족 정도를 평가하고자 기후변화와 물

수요를 조합하여 시나리오를 구성하고 장기 강우유출 모형 (SLURP 모형)과 물수지 기반의 수자원계획평가 모형 (K-WEAP 모형)을 이용하여 각 시나리오별로 미래 물부족 정도를 예측하고 평가하였다.

2. 기본 이론

2.1 RegCM3 RCM

RegCM3 모형은 ICTP (international center for theoretical physics)에서 개발하여 보급한 가장 최신의 중규모 기후모델이며, 2004년 그 방법론의 이론과 사용법이 공개되었다. RegCM3 모형은 MM5 (Mesoscale Model version 5th) Hydrostatic 모형을 기반으로 개발되었으며, 시그마 좌표계와 Arakawa B 격자 좌표계를 연직 및 수평 좌표계로 각각 이용한다. 모형의 주요 모듈의 물리적인 매개변수 추정방안으로는 Grell 적운모수화 방법 (Grell, 1993), CCM3 복사과정 (Kiehl *et al.*, 1996), 마지막으로 비국지적 연직 Diffusion (Holtslag *et al.*, 1990) 방법이 행성 경계층 과정을 위해 도입되었다. 기후변화 시나리오는 1971년부터 2000년을 참조기간 (reference period)으로 모형이 구축되었으며 90년 (2001~2090년)까지의 강수량을 검토대상으로 하였다. 일반적으로 GCM자료가 초기조건으로 이용되며, 시간에 따라 변하는 측면 기상조건, 지표 경계조건으로 사용된다. GCM자료에는 온실기체와 에어러솔 강제력이 포함되는 반면, RCM 모형에서는 복잡한 지형특색, 지표 특성의 반영, 대기순환과 기후변수들의 모의 능력을 증대하는 역할을 한다. RCM 모의 영역 내에

주어지는 대규모 기후성분에 지역적인 강제력을 주는 것으로, 모델 영역크기, 분해능에 따라 많은 계산량이 요구된다 (권현한 등, 2008). 본 기후모형을 이용한 국립기상연구소의 A2 시나리오에 의한 한반도 장기 미래 전망에 따르면 평년 (1971~2000)에 대해 21세기말 (2071~2100) 우리나라의 기온은 약 4℃ 상승하고, 강수량은 17% 증가할 것으로 전망된다. 호우 빈도 증가가 예상되며, 열대야 횟수는 약 3배 증가할 것으로 전망하였다. 본 연구에서는 RegCM3 모형의 기후자료를 기상청으로부터 제공 받아 이용하였다. RegCM3 RCM에 대한 구체적인 이해와 내용은 권현한 등 (2008)의 연구를 참고할 수 있다.

2.2 비정상성 Markov Chain 모형에 의한 Downscaling

권현한과 김병식 (2009)은 추계학적 모형인 Markov Chain과 통계학적 Downscaling 모형을 결합하여 비정상성 Markov Chain 모형을 개발하였다. 비정상성 Markov Chain 모형에서는 비조건부 Markov Chain 모형의 4개의 매개변수의 외부인자를 연결하기 위해서 회귀분석이 이용된다. 여기에서는 4개의 추계학적 매개변수들 즉, 무강수에서 강수로 진행되는 천이확률 (p_{01}), 강수에서 강수로 진행되는 천이확률 (p_{11}), 그리고 강우량을 모의하기 위한 Gamma 확률분포의 축척매개변수 (α)와 형상매개변수 (β)는 계절 강수량의 특성을 가지고 매년 동적으로 추정되게 된다. 이렇게 추정된 4개의 매개변수는 강수량을 모의하기 위해서 이용된다. 비정상성 Markov Chain 모형에 의한 Downscaling 과정은 Fig. 1과 같다.

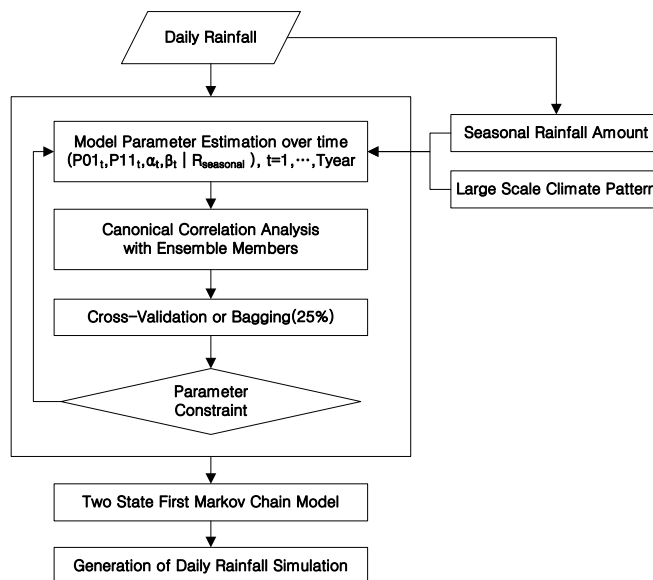


Fig. 1. Flowchart of Nonstationary Markov Chain Model (by Kwon and Kim, 2009)

2.3 기후변화-물수요 시나리오

본 연구에서는 RegCM3 RCM의 A2 기후변화 시나리오를 바탕으로 수자원장기종합계획 보완(2006)에서 제시한 미래 전망에 대한 물 수요 시나리오(고수요, 기준수요, 저수요)를 구성하여 Table 1과 같이 기후변화와 미래 물 수급 전망에 따른 3개의 기후변화-물수요 시나리오를 재구성하였다. IPCC에서 제시하고 있는 A2 기후변화 시나리오는 인구증가율이 높고 경제발전은 느리고 기술변화도 느린 매우 이질적인 세계를 가정하여 독립적 행동과 지역의 독자성을 보관·유지하는 다원화 사회 시나리오로서 미래 기온의 증가를 가장 높게 예측(IPCC, 2001)하고 있는 시나리오이다.

수자원장기종합계획에서는 생활용수, 공업용수, 농업용수에 따른 물 수요의 용도별로 기준(건설교통부(2006)참고)에 따라 시나리오를 작성하였는데 본 연구에서는 이를 참고하여 용도별 증감에 따른 수요별 증감을 검토하였으며 이렇게 재구성한 기후변화-물수요 시나리오에 의한 용수이용량의 증감을 Table 1과 같이 개념적으로 제시하였다.

2.4 적용 모형의 개요

2.4.1 장기 유출 모형(SLURP 모형)

기후변화를 고려한 대상 유역의 수자원 영향을 분석하기 위해서는 GCM이나 RCM과 같은 기후변화 시나리오를 반영할 수 있고 장기 유출 분석에 중요한 증발산량, 토지피복 변화와 GIS 자료를 활용함으로써 유역에 대한 물리적 특성 변화를 고려할 수 있어야 한다. 과학기술부(2007)는 이러한 사실을 고려할 때 PRMS 모

형, SLURP 모형, SWAT 모형이 국내에 적용성이 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 다수의 댐을 포함하여 기후변화 요소와 토지피복과 식생변화를 고려하는데 장점이 있는 SLURP 모형을 선정하였다.

SLURP 모형은 일 단위 유출 모형으로 지상학적 매개변수, 시계열 자료, 그리고 물리적 매개변수를 입력자료로 활용한다. SLURP 모형의 유출모의는 ASA라는 소유역별로 연직방향 물수지 분석을 실시한 후 각각의 ASA들에 대하여 하도추적을 통해 전체유역의 출구지점에서 유출량을 얻게 된다(Kim *et al.*, 2007). 본 연구에서는 한강 유역에 대하여 모형 구축과 보정이 완료된 SLURP 모형에 미래 토지이용과 식생 변화 자료를 반영하고, RegCM3 RCM과 축소기법으로 추출한 강우와 온도 등의 기상자료 총 50 sets을 입력하여 기후변화시나리오에 따른 미래 일단위 유출량을 산정하였다.

2.4.2 K-WEAP 모형

K-WEAP 모형은 21세기 프론티어 연구개발사업인 「수자원의 지속적 확보개발사업」의 일환으로 「유역통합물수지 및 수자원계획기술개발 연구」에서 개발된 한국형 수자원평가계획 모형이다. 특히, 수자원장기종합계획 보완(2006)의 작성 시에 우리나라 5개 대권역 및 117개 중권역에 대한 물수지를 분석하였으며 그 적용성을 확인한 바 있다.

물수지 분석의 기본 원리를 기반으로 운영되는 K-WEAP은 분석대상 지역으로서 도시 지역과 농업 지역, 단일 소유역이나 복잡한 하천 유역의 물 수요-공급 시스템에 적용할 수 있다. 또한 K-WEAP은 용수목적별 수요량 분석, 물 절약, 수리권과 배분 우선순위, 지하수와 하천유량 모의, 저수지 운영, 수력발전, 오염물질 추적, 생

Table 1. The Developed Scenarios under Consideration of Climate Change and Future Water Demand

Climate change scenario	Water demand scenarios				Climate change-water demand scenarios
	Scenarios	Demand categories	by Categories	by Demand	
A2	High demand	Domestic use	↓	↑↑	A2-High demand (↑)
		Industrial water	↑↑↑		
		Agricultural water	-		
	Middle demand	Domestic use	↓↓	↓	A2-Middle demand (-)
		Industrial water	↑↑		
		Agricultural water	↓		
	Low demand	Domestic use	↓↓↓	↓↓↓	A2-Low demand (↓)
		Industrial water	↑		
		Agricultural water	↓↓		

태계 필요수량 분석과 같은 광범위한 부문의 문제 (Fig. 2 참고)들을 다룰 수 있다 (과학기술부 2006). 특히 통합적인 계획, 시나리오 분석, 수요관리 능력 등에 타 물수지 모형과 비교하여 장점이 있기 때문에 본 연구에서는 K-WEAP 모형을 채택하고 시나리오별 물부족 정도를 분석하였다.

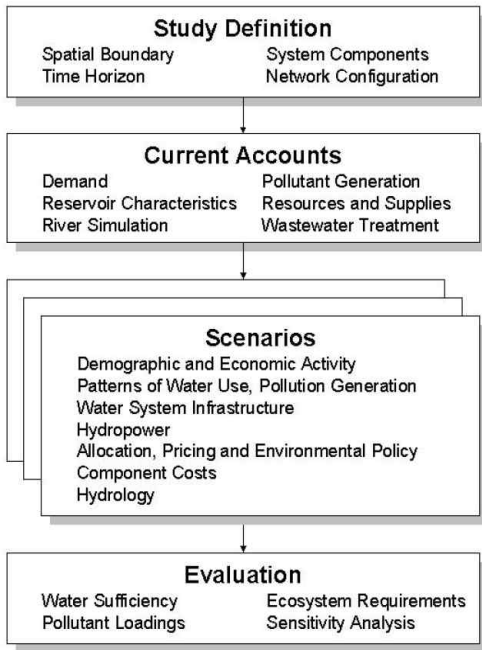


Fig. 2. Water Resources Planning and Evaluation Processes in K-WEAP Model

3. 적용 및 분석

본 연구에서는 기후변화에 의한 한강유역에 대한 가뭄 및 이수부문의 취약성 평가를 위하여 기상청에서 제공받은 RegCM3 RCM의 A2 시나리오에 의한 기후자료를 축소기법 (비정상성 Markov Chain 모형)으로 일단위 기상자료를 생성하였다. 기후변화에 의한 불확실성의 한계를 극복하기 위하여 기상자료는 50 Sets를 생성하였고 장기 강우-유출모형인 SLURP 모형으로 2020-2090년까지의 일유출량을 모의하였다. 그리고 A2 시나리오에 따른 SLURP 모형의 일유출량 결과와 수자원장기종합계획 보완 (2006)을 참고하여 생성한 3개의 물수요 시나리오 (고수요, 기준수요, 저수요)를 조합하여 150 Sets를 구성하였으며, SLURP 모형으로부터 모의된 일단위 유출량 자료와 함께 수자원평가 및 계획 모형인 K-WEAP 모형에 적용하여 시나리오별-목표기간별 물부족량을 검토하였다. 그리고 수자원장기종합계획 보완 (2006)에서는 미래 물 수요에 대한 예측을 2020년까지 제시하고 있기 때문에 2020~2090년의 물 수요는 2020년의 물 수요 기준으로 일정하다고 가정하였다. 또한 댐 운영은 수자원장기종합계획에서 사용된 가정사항을 반영하여 댐 운영률을 설정하였다. 각 다목적 댐에서 운영되고 있는 운영률을 기반으로 홍수기 가변수위를 적용하고 상시만수위를 기준으로 10월부터 새로운 수문년도가 시작하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로 한강유역의 전체와 소유역 (수자원단위지도상의 중권역)별로 시나리오별-목표기간별로 물부족량을 검토함으로써 이수부문에 대한 수자원 평가를 실시하였다.

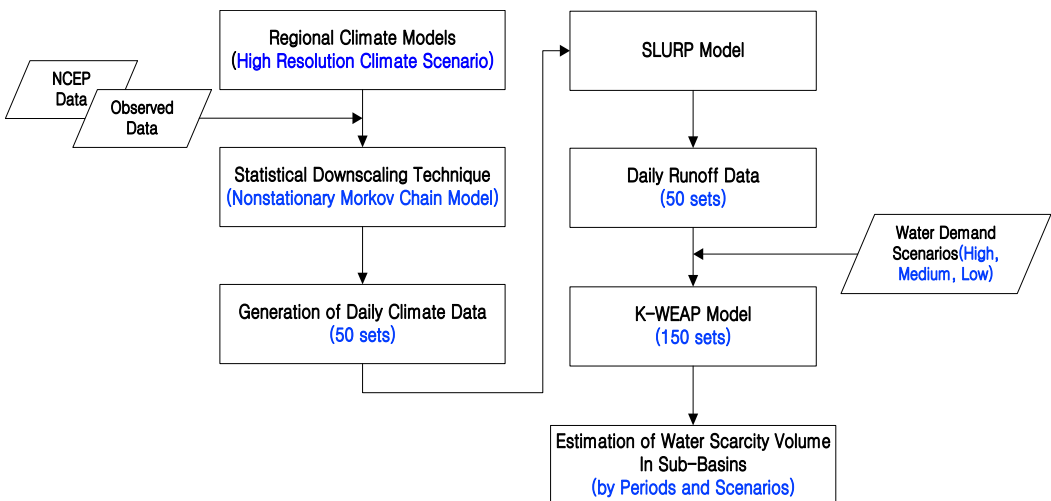


Fig. 3. A Schematic Drawing of the Analysis Procedures for this Study

3.1 축소기법의 적용과 유출량 모의

3.1.1 대상유역의 설정

본 연구에서는 한강유역을 대상유역으로 설정하였다. 한강유역은 북위 36°30′~38°55′, 동경 126°24′~129°02′에 걸쳐 한반도 중앙부에 위치하고 있으며, 수도 서울을 관통하는 우리나라 중부의 최대하천으로서 크게 북한강수계와 남한강수계로 구성되어 있다. 유역면적은 26,356 km² (북한지역 8,455 km² 포함)이고, 유역연장은 481.7 km, 유역 평균은 55.8 km, 유역형상계수는 0.119인 남한 제1의 하천이다.

3.1.2 축소기법의 적용 결과

RegCM3 RCM의 A2 시나리오에 의한 기후자료를 비정상성 Markov Chain 모형에 의하여 한강유역 규모로 축소하였고 그 중에서 강수량에 대한 적용결과를 연강수량으로 정리하여 한강유역 내 소유역별-기간별로 나타내었다 (Fig. 5 참고). 기후변화에 의하여 연강수량

은 증가하였으며 강수의 공간분포 특성은 소유역별로 편차가 심화되는 것으로 나타났다. 특히, 연강수량의 변화는 과거 대비 -2.4~3.0%이나 월별 변동 폭은 -30~70%로 커져 수자원 관리의 취약성이 매우 증가할 것으로 예측되었다 (Table 2 참고).

3.1.3 유출량 모의 결과

한강유역 규모로 축소된 기상자료는 SLURP 모형의 입력자료로 활용하여 2020년에서 2090년까지 약 70년 동안 일유출량을 모의하였다. 일유출량을 연유출총량 (mm)로 정리하여 기간별로 소유역별 유출용량을 비교한 결과 강수량의 변화 특성과 마찬가지로 소유역별로 유출량의 편차가 심화되는 것으로 나타났다 (Fig. 6 참고). 특히 남한강과 비교하여 북한강의 유출량이 큰 것으로 예측되었으며 남한강 중하류의 유출량은 늘어나는 것으로 나타났다.

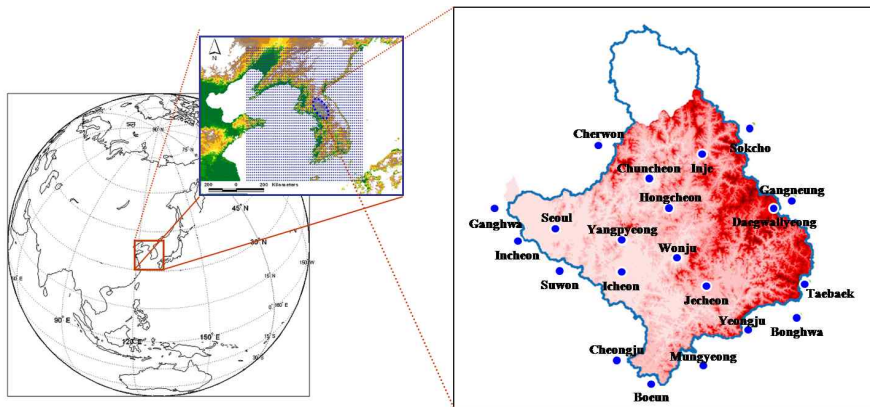


Fig. 4. Study Area (Han River Basin)

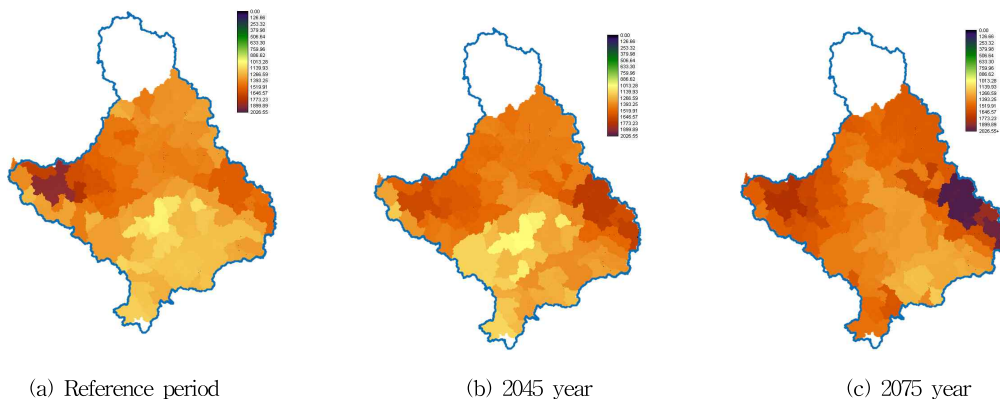


Fig. 5. Precipitation Change Due to Climate Change (unit : mm)

Table 2. The Variance of Monthly Rainfall Due to the Impacts of Climate Change (unit: mm)

	Reference	2031~2060	Variance	2061~2090	Variance
Jan	22.8	38.5	15.7 (+69%)	36.7	14.0 (+61%)
Feb	31.3	35.2	3.9 (+1%)	33.2	1.9 (+6%)
Mar	50.8	39.3	-11.5 (-23%)	37.9	-12.8 (-25%)
Apr	75.1	108.2	33.1 (+44%)	103.1	28.1 (+37%)
May	89.7	114.1	24.4 (+27%)	109.3	19.6 (+22%)
June	150.5	110.2	-40.3 (-27%)	105.8	-44.8 (-30%)
July	253.5	194.1	-59.4 (-23%)	221.1	-32.4 (-13%)
Aug	241.6	187.1	-54.4 (-23%)	211.9	-29.6 (-12%)
Sept	125.9	179.2	53.3 (+42%)	203.9	78.0 (+62%)
Oct	41.3	38.6	-2.7 (-7%)	40.5	-0.8 (-2%)
Nov	39.3	36.3	-3.0 (-8%)	37.7	-1.6 (-4%)
Dec	23.3	37.9	14.6 (+63%)	38.8	15.6 (+67%)
Annual rainfall	1,144.8	1118.5	-26.3 (-2%)	1,179.8	35.0 (+3%)

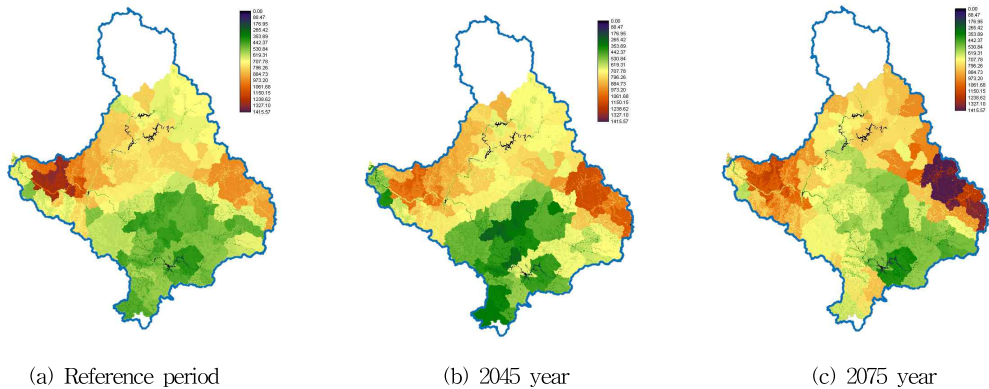


Fig. 6. Simulated Runoff by SLURP Model (unit : mm)

3.2 K-WEAP 모형의 적용

기후변화-물수요 시나리오에 따라 SLURP 모형으로 모의된 유출량 자료는 시나리오별 (A2-고수요, A2-기준수요, A2-저수요)로 50 Sets씩 총 150 Sets으로 구성되었다. 그리고 물수지 기반의 K-WEAP 모형을 이용하여 한강유역에 대한 이수부문의 장기적인 영향을 검토하기 위하여 월 단위 모의를 수행하였다.

3.2.1 모의 범위의 설정

K-WEAP 모형을 구축하기 위해서는 한강유역의 미래 물 수급 예측을 위한 범위 설정이 필요하다. 본 연구에서는 국가 표준지도인 수자원단위지도를 사용하였는

데 한강유역(대권역)은 크게 한강, 안성천, 한강서해, 한강동해의 4개 유역으로 구분이 가능하다.

본 연구에서는 한강 유역(분류 유역)에 대한 범위를 설정하고 모의단위로는 수자원단위지도상의 중권역(19개 권역, Fig. 7 참고)으로 설정하여 한강 유역을 구분하였다.

3.2.2 K-WEAP의 물수급 네트워크

K-WEAP 모형에 의한 한강 유역의 물 수급 네트워크는 수자원장기종합계획 보완(건설교통부, 2006)의 작성의 결과를 활용하였으며, 각 요소별로 하천(17개), 도수(38개), 저수지(4개), 수요처(67개), 취입수로(100개), 회귀수(63개) 등의 기타 자료로 구성되어 Fig. 8과 같다.

3.3 기후변화를 고려한 미래 물부족량 예측

미래 물부족량을 검토하기 위하여 2020년부터 2090년까지 약 70년 동안의 기간을 모의하였다. 아래의 물부족량 추이 그래프를 통하여 모의 시작년도인 2020년부터 2090년까지의 물부족량의 변화 추이와 편차의 범위, 평균을 확인할 수 있다. 여기에서 범위(Range)는 물부족량 50 Set에 의해서 산정된 물부족량 범위라고 할 수 있으며 평균(Average)은 매년 50 Set의 물부족량을 평균하여 산정한 값이다. 물부족량이 기준년도와 비교하여 장기적인 변동추세가 있는지 확인하기 위하여 모의된 물부족량의 매년 평균값에 대하여 이동평균 방법을 고려하였다. 점진적으로 10년씩 이동평균한 결과 모든 기후변화-물수요 시나리오에서 한강 유역의 물부족량은 장기적으로 증가하는 추세에 있는 것으로 나타났다 (Fig. 9).

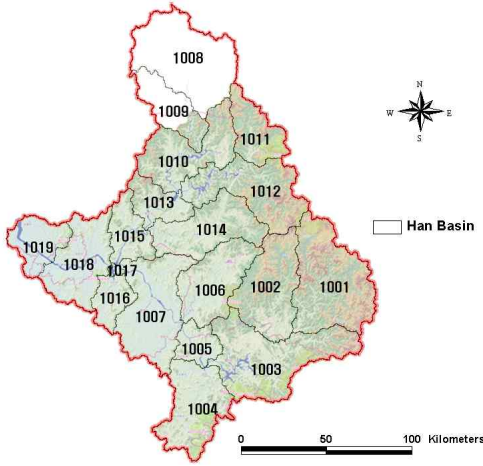


Fig. 7. Subbasins Analyzed for the Evaluation of Water Scarcity

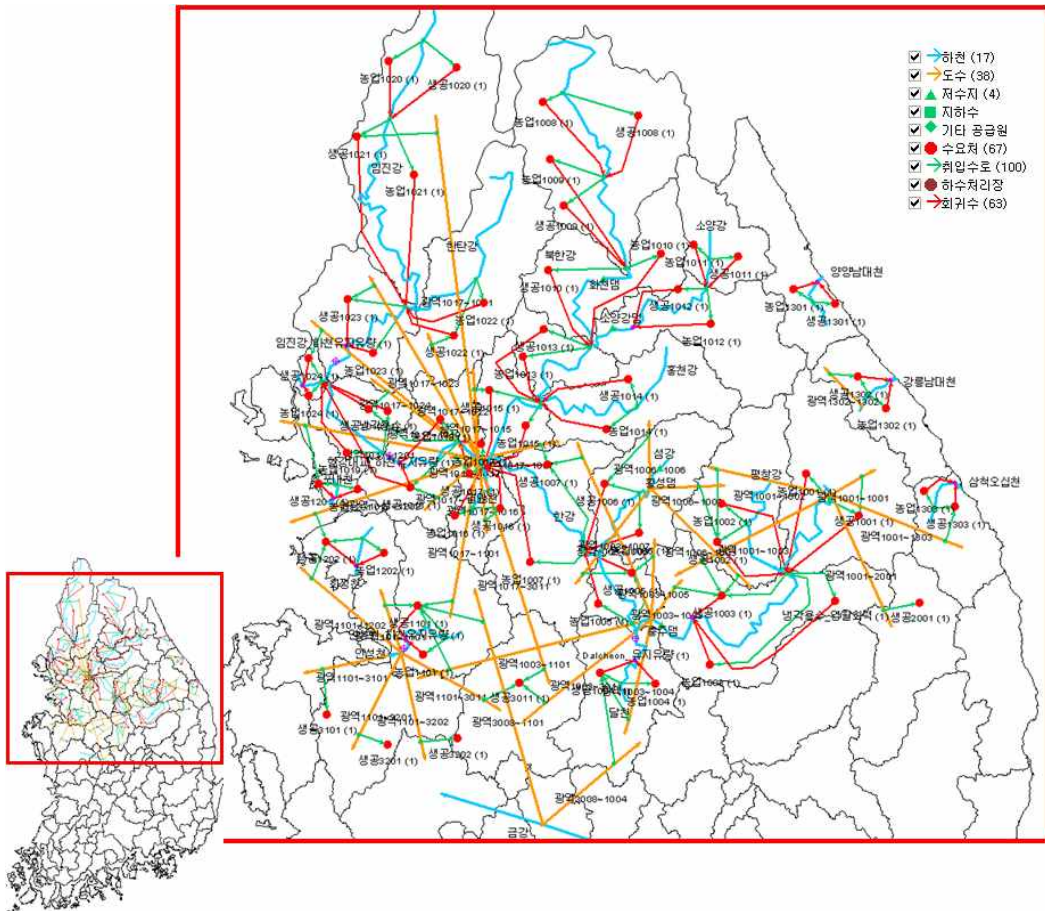
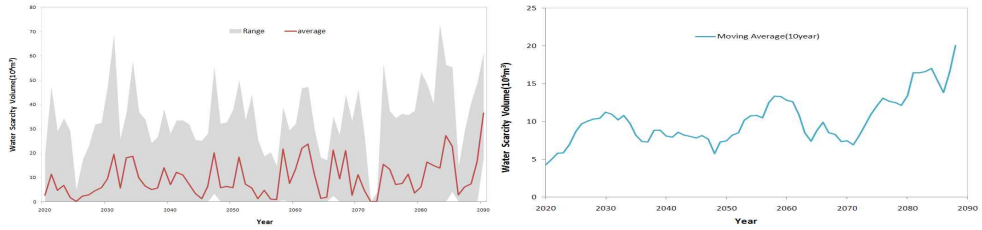
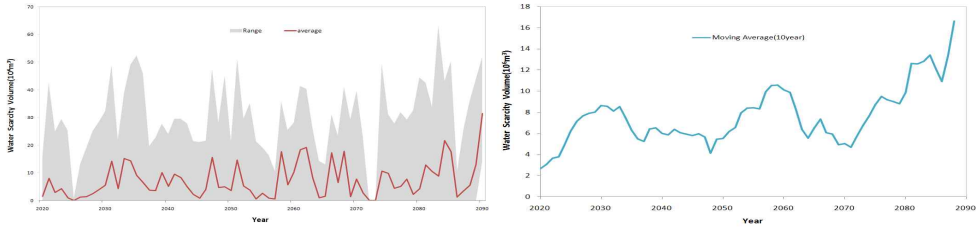


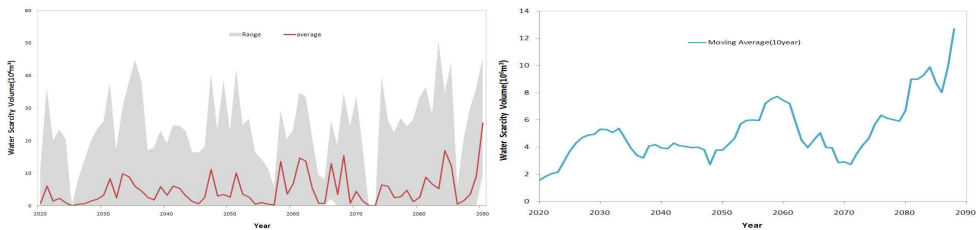
Fig. 8. The Water Supply Network of the Han River Basin Built in K-WEAP



(a) A2-High Demand Scenario

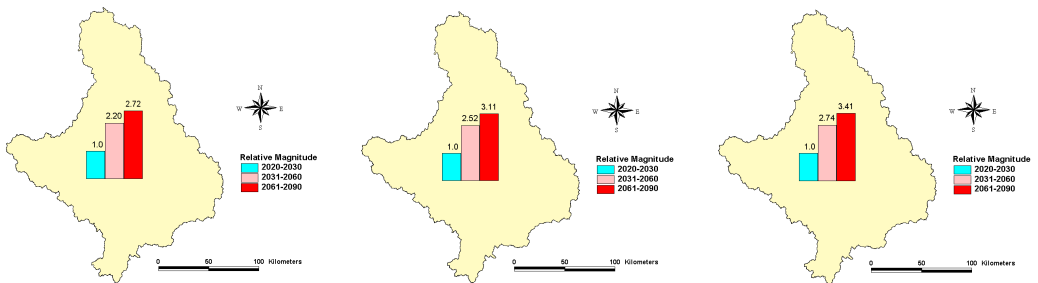


(b) A2-Medium Demand Scenario



(c) A2-Low Demand Scenario

Fig. 9. Water Scarcity and Moving Average Trends (from 50 sets of daily runoff data)



(a) A2-High Demand Scenario

(b) A2-Medium Demand Scenario

(c) A2-Low Demand Scenario

Fig. 10. Increase in Water Scarcity for the Target Years by the Scenarios

장기적으로 물부족량이 증가 추세에 있다면 기준기간 (2020~2030년)과 비교하여 목표기간 (2031~2060년, 2061~2090년)에 어느 정도의 물부족이 증가하는지에 대하여 다음과 같이 기준기간에 대한 상대적으로 목표기간의 물부족량을 분석하였다. 물부족이 각 시나리오에서 목표기간 1 (2031~2060년)에서는 약 2.2~2.7배 증가하고 목표

기간 2 (2061~2090년)에서는 2.7~3.4배 증가하는 것으로 분석되었다. 여기에서 고수요 시나리오의 물부족 증가용량이 가장 큼에도 불구하고 증가비율이 작게 산정된 이유는 기준기간에서 추정된 물부족 용량이 고수요 시나리오에서 가장 크게 산정되었기 때문에 상대적으로 증가비율이 작게 산정된 것으로 판단되었다 (Fig. 10).

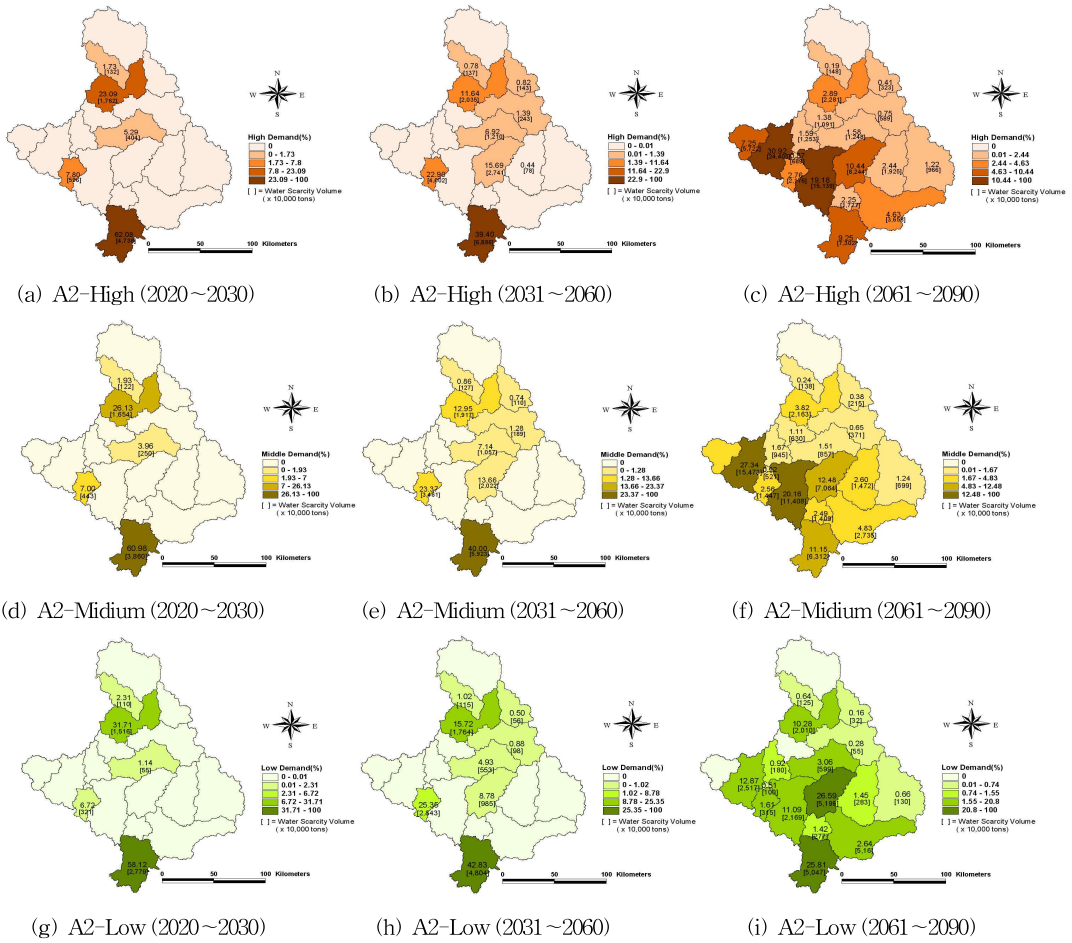


Fig. 11. The Share of Water Scarcity by Each Sub-Basin

한강유역의 각 소유역 별 물부족량을 검토한 결과는 Fig. 11과 같다. 목표기간의 한강유역에 대한 총 물부족량을 100%로 보았을 때 각 소유역이 차지하는 비율을 나타내었고 각 소유역별 물부족 용량을 []로 표시하였다.

기후변화-물수요 시나리오에 따라 목표기간별로 한강유역에 대한 소유역별 물부족을 검토한 결과 한강유역은 기준기간 (2020~2030년)과 비교하여 목표기간 1 (2031~2060년)에서 북한강 수계를 중심으로 물부족을 일으키는 소유역이 증가하였으며 소유역별 물부족 용량도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 목표기간 2 (2061~2090년)에서는 한강유역 내 대부분의 소유역에서 물부족이 심화되는 것으로 나타났다. 특히 물부족이 한강유역의 상류유역 보다는 중하류 유역에서 더욱 심화되는 것으로 나타났으며 저수요 보다는 물수요를 많이 요구하는 고수요 시나리오에서 극심한 물부족이 발생하는

것으로 전망되었다.

3.4 물부족의 원인 검토

물부족의 원인을 확인하기 위하여 각 목표기간별 유출량과 용도별 (농업용수, 생공용수) 물 수요량을 검토하였다. 검토결과 미래 월 강우량의 변동 (Table 2 참고)이 Fig. 12와 같이 특정 월 (6월)에서 물부족에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 연중 일정하게 공급이 요구되는 생공용수 보다는 특정 월 (6월)에 물 공급을 가장 많이 필요로 하는 농업용수의 과부족 현상에 의하여 물부족이 심화되는 것으로 나타났다. 여기에서 농업용수는 논농사와 밭농사에 필요한 용수로 구분을 하였는데, 논농사는 4월과 5월 모내기 이후 벼의 생장을 위하여 일정량 이상의 물이 지속적으로 필요하고 밭농사의 경우 6월에 가장 많은 용수를 필요로 하

기 때문에 연중 6월에 농업용수가 가장 많이 필요한 것으로 나타났다. Table 3에서와 같이 목표기간에 따라 월별로 유출용량과 물 수요량의 평균을 비교한 결과 기후변화의 영향으로 6월에 물 수급 문제가 발생할 가능성이 큼을 확인할 수 있었다.

한강유역의 각 소유역별로 모의 기간 (2020~2030, 2031~2060, 2061~2090)에 따라 기후변화를 고려하여 모의한 SLURP 모형의 유출량이 어떻게 변화하는지에 대하여 검토하였다. 검토결과 기후변화가 예상되는 미래에 물부족을 심화시키는 3가지 원인을 찾아 볼 수 있었다.

① 홍수기의 유출특성이 7, 8, 9에서 8, 9, 10월로 이동됨

에 따라 상대적으로 6월에 물부족량이 증가하였다.

② 특정 기간 (2031~2060년)에는 유출량이 전반적으로 감소 (Fig. 13 (우)의 상자그림 중간값이 전반적으로 감소하고 있음)됨에 따라 물부족이 증가되는 현상을 나타내었다.

③ 목표기간 2031~2060년과 2061~2090년은 유사한 유출특성 (Fig. 13 (a) 참고)을 나타내지만 목표기간 2061~2090년에 유출량의 불확실성 (편차정도)의 정도가 커짐에 따라 물부족이 심화되는 경우가 있었다. Fig. 13 (우)의 상자그림을 통하여 목표기간 2061~2090의 편차가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었다.

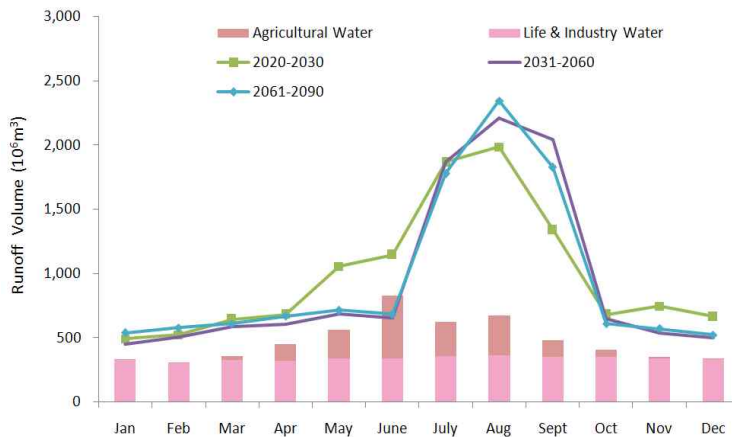
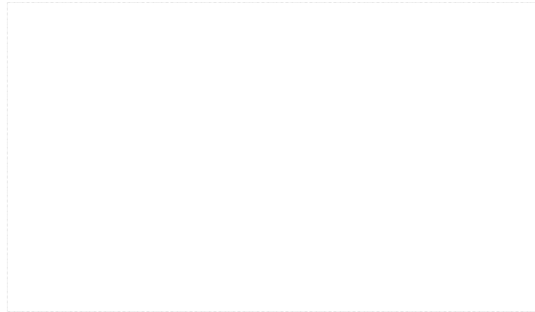
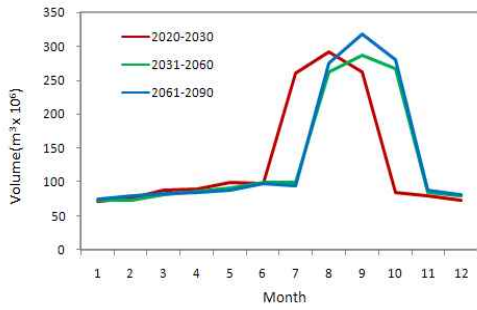


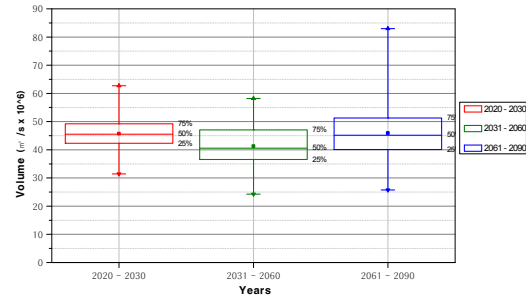
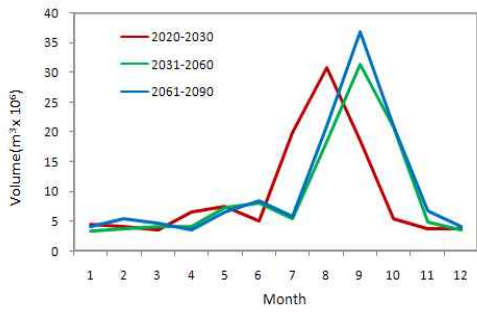
Fig. 12. Change in Monthly Runoff and Demand with Respect to the Target Periods

Table 3. The Comparison of Monthly Volume of Runoff and Water Demand During the Target Periods

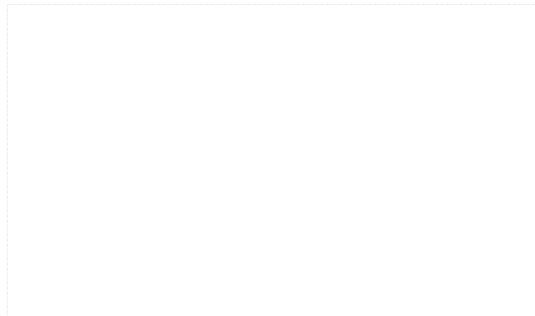
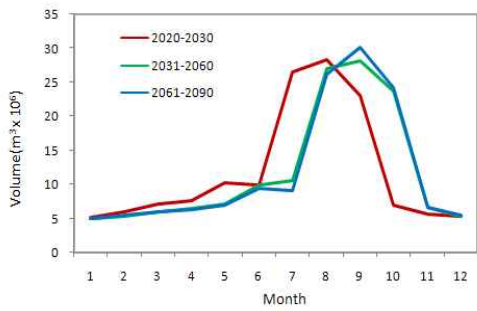
	Runoff volume (10^6m^3)			Water demand volume (10^6m^3)		Marginal volume (10^6m^3)		
	2020~2030	2031~2060	2061~2090	Agriculture	Life & Industry	2020~2030	2031~2060	2061~2090
Jan	492.5	452.0	537.3	0.8	331.1	160.6	120.0	205.4
Feb	522.9	504.5	579.0	1.3	308.4	213.2	194.8	269.2
Mar	642.6	587.7	609.5	25.2	328.7	288.7	233.8	255.6
Apr	682.1	603.5	668.8	126.6	321.4	234.1	155.5	220.9
May	1,056.9	686.7	713.8	221.9	338.4	496.6	126.4	153.5
June	1,144.1	654.3	682.9	490.2	338.4	315.5	-174.3	-145.7
July	1,867.2	1,871.0	1,779.9	265.5	355.5	1,246.2	1,250.1	1,159.0
Aug	1,985.8	2,209.0	2,345.6	310.2	362.8	1,312.8	1,536.0	1,672.6
Sept	1,339.5	2,045.9	1,828.3	132.6	350.6	856.3	1,562.7	1,345.1
Oct	680.3	649.7	610.6	56.5	348.2	275.7	245.1	206.0
Nov	745.4	537.0	569.4	11.6	336.0	397.7	189.4	221.8
Dec	664.6	497.3	523.2	0.3	338.4	325.9	158.6	184.5



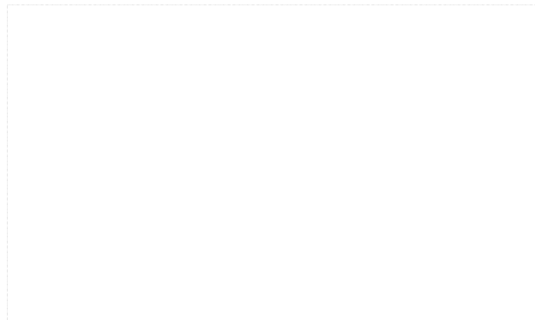
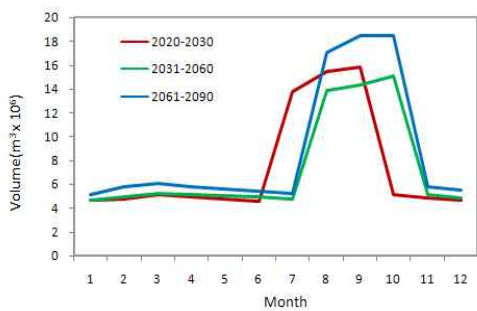
(a) Han river basin (1001-1019)



(b) Choonchun dam basin (1010 basin)



(c) Namhan river basin (1007 basin)



(d) Joongrang stream basin (1018 basin)

Fig. 13. Comparison of Monthly Inflow Data (left) and Inflow Box Plot (right)

4. 결 론

본 연구에서는 기후변화를 고려하여 한강유역의 미래 물부족 정도를 평가하였다. RegCM3의 A2 시나리오에 의한 기후자료를 비정상성 Markov Chain 모형으로 유역규모로 축소하여 일기상자료를 발생하였으며, 장기강우유출모형인 SLURP 모형으로 2020~2090년간의 일 유출량을 모의하였다. 기후변화-물수요 시나리오를 구성하고 기후변화 시나리오에 따라 SLURP 모형으로부터 모의된 유출량 자료를 이용하여 수자원평가 및 계획 모형인 K-WEAP 모형에 적용하였다. 모형의 결과를 통하여 한강유역의 물부족량을 정량적으로 예측하였으며 소유역별로 물부족 정도를 검토하였다.

기후변화가 한강유역의 수자원에 미치는 영향에 대한 본 연구에 의한 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- 1) 시나리오별로 불확실성을 고려하여 한강유역에 대한 미래 물부족량의 장기적인 변화추세를 확인한 결과 한강유역은 장기적으로 물부족이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 기준기간과 비교하여 목표기간 1(2031~2060년)에서는 물부족이 약 2.2~2.7배 증가하고 목표기간 2(2061~2090년)에서는 2.7~3.4배 증가하는 것으로 분석되었다.
- 3) 한강유역의 소유역별 물부족량을 검토한 결과 특정 소유역에서 물부족이 가중되고 장기적으로 한강유역 전체로 물부족이 예상되는 소유역이 증가함을 확인할 수 있었다.
- 4) 물부족의 증가는 기후변화로 인하여 홍수기의 유출 특성이 이동되는 현상과 유출량의 불확실성 정도가 증가하여 농업용수의 과부족으로 인한 영향인 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과에 의하면 미래에는 한강유역의 물부족이 가중될 것이다. 따라서 기후변화에 의하여 예상되는 한강유역의 유출특성 변화에 대응할 수 있는 구조적 또는 비구조적인 대책이 요구된다고 할 수 있겠다. 그리고 이러한 결과와 같이 정량적으로 물부족을 검토하여 수자원 정책을 뒷받침할 수 있는 연구들이 더 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 일환인 「기후변화 대비 국가 물 안보 확보 방안」 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 기후변화 자료를 제공해 주신 국립기상연구소 기후연구과 권원태 박사님과 K-WEAP 자료를 제공해 주신 한국건설기술연구원의 이동률 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2006). 수자원장기종합계획(2006-2020) 보고서.
- 과학기술부(2004). 21세기 프론티어연구개발사업-수자원 지속적 확보기술개발사업-유역통합물수지 분석 및 수자원 계획기술개발, 통합수자원평가계획모형 사용자 안내서.
- 과학기술부(2007). 21세기 프론티어연구개발사업-수자원 지속적 확보기술개발사업-기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계구축.
- 권현한, 김병식, 김보경(2008). “기후변화에 따른 수자원 영향 평가를 위한 Regional Climate Model 강수 계열의 특성 분석”. **대한토목학회 논문집**, 제28권 제5B호, pp. 525-533.
- 권현한, 김병식(2009). “비정상성 Markov Chain Model을 이용한 통계학적 Downscaling 기법 개발”. **한국수자원 학회논문집**, 제42권, 제3호, pp. 213-225.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원(2004). “기후변화가 용담 댐 유역의 유출에 미치는 영향”. **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제3호, pp. 185-193.
- 배덕호, 정일원, 이병주(2007). “A2시나리오에 따른 국내 수자원의 변동성 전망”. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 921-930.
- 안재현, 유철상, 윤용남(2001). “GCM 결과를 이용한 지구 온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석”. **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제4호, pp. 335-345.
- 안소라, 이용준, 박근애, 김성준(2008). “미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석”. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 215-224.
- 이동률, 김웅태, 유철상(2004). “기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향”. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 315-328.
- 환경부(2006). **국제환경현안 대응·해결기술, 기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향 평가**.
- 황준식, 정대일, 이재경, 김영오(2007). “기후변화 영향평가를 위한 월 물수지모형의 적용성 검토”. **한국수자원 학회논문집**, 제40권, 제2호, pp. 147-158.
- Andersson, L., Wilk, J., Todd, M.C., Hughes, D.A., Earle, A., Kniveton, D., Layberry, R., and Savenije, H.G. (2006). “Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River”. *Journal of Hydrology*; Vol. 331, pp. 43-57.
- Bronstert, A., Burger, G., Heidenreich, M., Katzenmaier, D., and Kohler, B. (1999). “Effect of climate change influencing storm runoff generation: Basic considera-

- tions and a pilot study in Germany". *Proceedings of the International RIBAMOD Workshop*, Wallingford.
- Cooley, K.R., Flerchinger, G.N., Wight, J.R., and Hanson, C.L. (1992). "Effect of Climate Changes On Water Supplies Managing Water Resources During Change". *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 28, pp. 185-194.
- Gleick, P.H. (1986). "Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes". *Journal of Hydrology*. Vol. 88, pp. 97-116.
- Gleick, P.H. (1987). "The development and testing of a water-balance model for climate impact assessment: Modeling the Sacramento Basin". *Water Resources Research* Vol. 23, pp. 1049-1061.
- Grell, G.A. (1993). "Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations". *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 121, pp. 764-787.
- Guo, S., Wang, J., Xiong, L., Ying, A., and Li, D. (2002). "A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China". *Journal of Hydrology*, Vol 268, pp. 1-15.
- Hamlet, A.F., and Lettenmaier, D.P. (1999). "Effects of climate change on hydrology and water resources objectives in the Columbia River basin". *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, pp. 1597-1624.
- Holtzlag, A.A.M., de Bruijin, E.I.F., and Pan, H.L. (1990). "A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting". *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 118, pp. 1561-1575.
- IPCC (2001). *Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC (2007). *"Climate Change 2007", the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jha, M., Arnold, J.G., Gassman, P.W., and Gu, R. (2004). "Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT.", *Working Paper 04-WP 353*, Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University.
- Jha, M., Pan, Z., Takle, E.S., and Gu, R. (2003). "The impacts of climate change on stream flow in the upper Mississippi river basin: A regional climate model perspective". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109.
- Jonathan, I.M., Graciana, P., and Kenneth, M.M., (2004). "Evaluation of the impact of climate change on hydrology and water resources in Swaziland: Part I". *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 1181-1191.
- Kiehl, J.T., Hack, J.J., Bonan, G.B., Boville, B.A., Briegleb, B.P., Williamson, D.L., and Rasch, P.J. (1996). "Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3)". *NCAR Technical Note*. Boulder, Colorado.
- Kim, Byung Sik, Kim, Hung Soo, Seoh, Byung Ha, and Kim, Nam Won (2007). "Impact of Climate Change on Water Resources in Yongdam Dam Basin, Korea". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 21 (4), pp. 355-357
- Kite, G.W., (2007). *Manual for the SLURP Hydrologic Model version 12.7*
- McCabe, G.J., and Wolock, D.M. (1999). "General Circulation Model Simulations of Future Snowpack in the Western United States". *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, pp. 1473-1484.
- Miller, J.R., Russell, G.L., Van, B., and Scoott, C., (1992). "The Effects of Climate Change On Monthly River Runoff". *Managing Water Resources During Global Change*, pp. 175-178.
- Purkey, D.R., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M.W., Dale, L.L., Yates, D., and Dracup, J.A., (2008). "Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley". *Climatic Change*, 87 (Suppl 1) : S109-S122.
- Roald L.A., Skaugen, T.E., Beldring, S., Væringstad, T., Engeset, R., and Førland, E. J. (2003). "Scenaris of annual and seasonal runoff for Norway". *European Geophysical Society*, Vol. 5, 10395.
- Stewart, I.T., Cayan, D.R., and Dettinger, M.D. (2005). "Changes towards earlier streamflow timing across Western North America". *Journal of Climate* 18: 1136-1155.
- Yates, D.N., and Strzepek, K.M. (1998). "Modeling the Nile Basin Under Climate Change". *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 98-108.

논문번호: 09-125	접수: 2009.11.10
수정일자: 2010.01.22/2010.02.19	심사완료: 2010.02.19