

RCP 기후변화 시나리오를 고려한 금강유역의 미래 용수공급 변화전망

Water Supply Change Outlook for Geum River Basin Considering RCP Climate Change Scenario

노 선 희* / 정 관 수** / 박 진 혁*** / 류 경 식****

No, Sun-Hee / Jung, Kwan Sue / Park, Jin Hyeog / Ryoo, Kyong Sik

Abstract

In this study, water supply for Geum River Basin was calculated by regulating the future water supply of Dam with the future expected discharges. HadGEM2-AO, which is the climate change prediction model that KMA (Korea Meteorological Administration) recently introduced was used for this study. The data of weather stations within the Geum River basin was extracted with the new Greenhouse Gas RCP scenario. The runoff of Geum river basin was simulated using the ArcSWAT for the 1988~2010 period. After validating the model, the similarity of results between simulation and observation at the Yongdam Dam and Daecheong Dam was 92.25% and 95.40%, respectively, which shows a good agreement with observed data. As the result of analysis for the discharges, the discharges would increase 47.76% under the RCP4.5 scenario and 36.52% under the RCP8.5 scenario. Water balance analysis was conducted by the KModSim for predicting the water supply under the runoff variation. We analyzed the volume of water intake with national standard of water supply 95% by Dam Operation Manual. By the analysis under RCP4.5 scenario, 9.41 m³/s, 24.82 m³/s of additional water supply is available on Yongdam Dam and Daecheong Dam. By the analysis under the RCP8.5 scenario, 6.48 m³/s, 21.08 m³/s of additional water supply is available on Yongdam Dam and Daecheong Dam.

Keywords : climate change, SWAT, KModSim, discharge, GCM, RCP scenario

요 지

본 연구에서는 기후변화에 따른 금강유역의 미래 유출량을 산정해 댐별 용수공급 변화량을 산정하였다. GCM은 최근 국립기상연구소가 도입한 영국 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO를 사용하였고 새로운 온실가스 시나리오인 RCP시나리오를 금강유역내 기상관측소로 추출하였다. ArcSWAT모형을 이용해 1988년부터 2011년까지의 과거 유출모의를 수행하였으며 금강권역 내 대표 지점인 용담댐 및 대청댐 지점의 유입량과 최종 방류부의 유출량 분석값을 비교한 결과 모의치와 실측치가 각각 92.25%, 95.40%로 일치하는 것으로 나타나 모형의 적용성을 확인하였다. 또한 새로운 온실가스 시나리오 하에서의 미래 유출량을 분석한 결과 RCP4.5 시나리오 하에서 평균 47.76%, RCP8.5 시나리오 하에서 평균 36.52%가량 유출증가가 일어날 것으로 예측되었으며 특히 가을철과 겨울철에 증가율이 높았다. 유출변화에 따른 용수공급 변화를 전망하기 위하여 KModSim으로 물수지 모형을 구축하여 추가 취수량 변화를 분석하였다. 이수안전도 95% 유지조건 하에서 취수가능량을 분석한 결과, RCP4.5 시나리오 하에서 용담댐과 대청댐 각각 9.41 m³/s, 24.82 m³/s가 더 취수가능하며 RCP8.5

* 충남대학교 공과대학 토목공학과 석사 (e-mail: tjsgm12022@hanmail.net)
Graduated Student, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea
** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)
Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea
*** 교신저자, K-water 수자원연구소 책임연구원 (e-mail: park5103@kwater.or.kr, Tel: 042-870-7434)
Corresponding Author, Principal Researcher, KIWE, K-water, Daejeon, Korea
**** K-water 수자원연구소 선임연구원 (e-mail: ksryoo@kwater.or.kr)
Senior Researcher, KIWE, K-water, Daejeon, Korea

시나리오 하에서는 6.48 m³/s, 21.08 m³/s가 더 취수 가능한 것으로 전망되었다.

핵심용어 : 기후변화, SWAT, KModSim, 금강유역, GCM, RCP시나리오

1. 서 론

지구온난화로 인해 지구의 평균기온이 상승하여 기후가 변하고 있으며 전 세계적으로 극심한 가뭄과 예측 불가능한 국지성 집중호우가 증가함에 따라 홍수로 인한 피해가 증가하고 있다. 향후 100년간 평균기온은 섭씨 평균 1°C에서 6°C까지 오를 수 있다는 과학자들의 연구결과(Lee (a Translator), 2008)가 보고되고 있다. 아직은 구조적 및 비구조적 대책으로 인해 피해를 최소화하고 있지만 언제까지 이 상태가 지속될지 모르는 시점이다. 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴이 변함으로써 물순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어지는 최근 경향에 맞추어 기후변화에 의한 신뢰성 있는 수자원 변화를 평가하는 것이 필요하다.

기후변화가 수문현상에 미치는 영향에 관해 현재 대기, 수자원, 농업, 생태계, 해양 등 다양한 분야에 걸쳐 연구가 이루어지고 있다. 다양한 GCM의 동시 적용을 통한 불확실성 분석 및 미래 유출변화에 관한 연구는 전 세계적으로 이슈화되어 다양한 GCM별로 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구의 대상유역을 대상으로 한 과거 기후변화 관련 연구를 보면, Kim et al. (2004a)은 과거 CO₂의 농도를 매년 1%씩 증가시켜 70년 후에 CO₂가 배증되도록 적분해 2031년부터 2050년의 2CO₂ GCM을 생성하였으며, SLURP모형을 이용하여 기후변화가 용담댐유역의 유출량과 수자원에 미치는 영향을 평가하였다. Kim et al. (2004b)은 5종류의 GCM 2CO₂ 시나리오 하에서 대청댐을 대상으로 NWS-PC 강우-유출모형을 이용하여 미래 100년간의 일유출량을 모의하였으며 시나리오에 따라 -14~7%의 변화가 예측되었다. Bae et al. (2007)은 A2 시나리오 하에서의 GCM결과를 역학적으로 다운스케일링한 해상도 27×27 km의 미래(2001~2090년)자료를 이용하여 국내 유역을 대상으로 PRMS를 통해 기후변화에 따른 유출량을 모의하였다. Ahn et al. (2009b)은 경안천 상류유역을 대상으로 2개 GCM의 A2, A1B, B1시나리오에 의한 하천유역의 수문요소 변동을 분석하여 SLURP를 통한 유출량을 모의하였다. Park et al. (2011)은 용담댐유역을 포함하는 대청댐유역을 대상으로 기상청에서 제공하는 공간해상도 27 km 지역규모의 A1B시나리오 기반의 RCM

모형과 SWAT 모형을 이용하여 미래 유출량을 전망한 결과 2011~2030년 사이 유출량이 6% 증가하는 것으로 예측되었다. 기후변화로 인한 미래 유출변화에 관한 연구는 동일유역이라 하더라도 매우 다른 결과들을 제시하고 있어 기후변화 영향평가에 대한 불확실성이 크고 상이한 결과로 인하여 관련 정책에 적용되지 못하고 연구에만 그치고 있는 실정이다.

수자원 계획 및 물수급 전망에 관한 연구를 보면, Kang (2007)은 금강유역 내 과거 1980년부터 1999년까지의 기준 시나리오로부터 2030년부터 2049년까지의 미래 기후변화 시나리오에 대한 5개 GCM의 미래 시나리오를 예측하여 abcd모형을 이용하여 미래 유출량을 모의하였으며 STELLA모형에 따른 용수부족량을 산정하였다. Kang et al. (2007)은 KModSim을 사용하여 생·공·농업, 하천유지 용수와 금강권역의 기존 및 계획 광역상수도를 고려한 물수지 네트워킹을 작성하여 2006년 기준수위에 대한 물부족량을 추정하였다. Ahn et al. (2009a)은 금강권역을 대상으로 탱크모형을 이용하여 중권역 단위로 산정한 유출량 자료를 농업용 저수지유역의 유출량으로 분리하여 MODSIM을 이용한 농업용수공급 가능량을 평가하였다.

상세화 기법을 사용하여 동일유역이라 하더라도 매우 다른 결과들을 제시하고 있고 여전히 기후변화 영향평가에 대한 불확실성이 존재하고 있다. 기후변화에 효율적으로 대처하기 위해서는 지역에 맞는 상세한 기후변화 정보가 필요하며 가장 중요한 요인중 하나가 기상자료의 전망이다. 기존의 IPCC 제4차 보고서에 사용된 SRES 시나리오는 산출과정의 시간지연과 자료의 노후화 및 해상도 문제로 인해 정확성과 다양성을 필요로 하는 새로운 시나리오가 필요하게 되었다. 대표농도경로로 명명된 RCP 시나리오는 AR5를 위한 새로운 온실가스 배출시나리오로 복사강제력을 먼저 설정하여 기후변화 시나리오가 나오는 과정이 단순화되었고 상세하게 훨씬 최신의 자료를 반영할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 금강유역을 대상으로 새로운 온실가스 시나리오 하에서 미래 유출량의 변화가 수자원에 미치는 변동성을 평가하기 위하여 저수지의 이수안전도 변화에 따른 미래 용수공급 변화량을 전망하였다. 온실가스 시나리오는 기상청 국립기상연구소에서 산출한 새로운 국가표

준 기후변화 시나리오인 RCP (Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오 하에서의 유량을 생성하였으며, 장기 강우-유출모형인 SWAT을 이용해 미래의 유출량을 연, 월, 계절별로 산정하였다. 생성된 유량시나리오로 일반화된 하천유역 네트워크모형인 KModSim으로 물관리 모형을 구축하고 금강유역에 대한 물수지 분석을 시행해 현재 수요량을 기준으로 과거 수요량 분석 및 미래 수요량에 대한 댐별 용수공급 변화량을 전망하였다. Hyun et al. (2012)은 HadGEM2-AO의 결과가 AR4에 참여하였던 CMIP3 모델 결과에 비해 매우 우수하였으며, NCEP/NCAR 재분석 자료보다도 좋은 성능을 보이는 것으로 판단했다. 이에 기존의 기후변화 모델을 통한 시나리오 하에서의 영향평가보다 본 연구에서 사용한 HadGEM2-AO를 통한 새로운 온실가스 시나리오 하에서의 영향을 평가하는 것이 기후위기에 대응하기 위한 예측으로 훨씬 신뢰성이 높을 것으로 판단된다.

2. 기후변화 시나리오

2.1 HadGEM2-AO

GCM은 지구의 대기를 3차원의 불연속 격자시스템으로 구성하고 각 격자점에서의 대기 상태를 지배하는 방정식(운동량, 연속, 정역학, 열역학, 상태 방정식 등)을 시간 적분하여 지구의 대기상태를 재현 및 예측하는 모형이다 (Ahn et al., 2001). GCM을 이용한 수문기상학적 분석을 실시하기 위해서는 통계적인 방법을 통한 상관분석을 이용하여 작은 규모의 유역에 대한 분석을 실시하거나, GCM결과를 경계조건으로 한 후 RCM모형을 사용하여

국지규모에 대한 분석을 실시하는 방법 등이 주로 이용되고 있다(Park et al., 2011).

국립기상연구소에서는 차세대 전지구 예보 시스템 구축을 위해 영국 해들리센터의 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO를 도입하였고 이는 대기-해양-해빙-수문-에어로졸 결합 모델로 구성되어 있다(Fig. 1) (National Institute of Meteorological Research, 2011).

기후변화 시나리오를 산출하는 과정은 먼저, 새로운 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 기초해 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO로 약 135 km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오를 산출한다. 그리고 전지구 기후 변화 시나리오 자료에 기초해 우리나라 지역에 대한 12.5 km 해상도의 지역기후모델인 HadGEM3-RA 즉, 한반도 지역기후변화 시나리오를 산출한다. 지역기후모델을 통해 생산된 한반도 기후변화 시나리오에서 각 격자점별로 계절 변동을 제거한 편차자료를 추출하여 PRIDE (PRISM based Downscaling Estimation Model)에 적용된 관측자료(2000~2010년)에서 얻은 기후값에 지역기후모델의 편차를 더하면 모델 계통오차가 제거된 새로운 1 km 격자형 남한상세 기후변화 시나리오가 생산된다(Fig. 2).

2.2 온실가스 시나리오

본 연구에서는 IPCC는 4차 평가보고서에 사용된 SRES (Special Report on Emission Scenario) 시나리오 대신 5차 평가보고서에 도입한 새로운 온실가스 시나리오인 RCP를 사용하였다. SRES는 인위적인 기후변화 요인 중에서 온실가스와 에어로졸의 영향에 의한 강제력만 포함하였다면 RCP는 토지이용변화에 따른 영향까지 포함하고 있

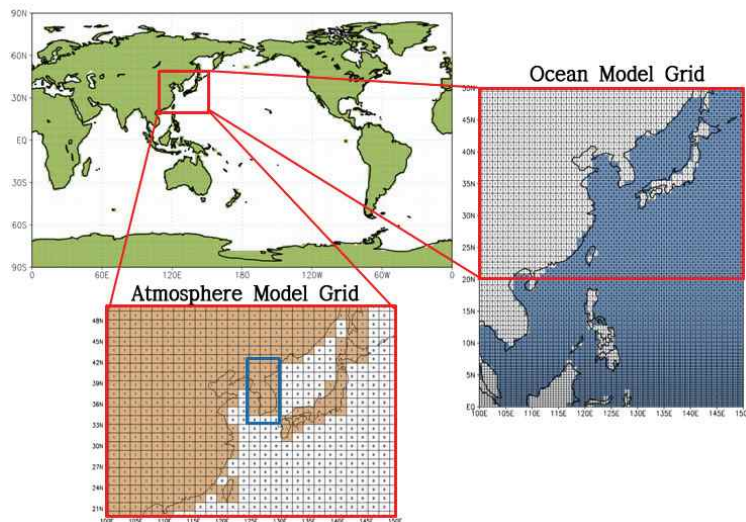


Fig. 1. Resolution of HadGEM2-AO Model

다. 하나의 대표적인 복사 강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 '대표'라는 표현을 사용하였으며 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 '경로'라는 의미를 포함하며 4가지 대표 온실가스 농도를 사용한다(Korea Meteorological Administration, 2011). 국립기상연구소에서는 남한상세 1km 고해상도의 RCP4.5, RCP8.5 2가지 시나리오를 생산 완료하여 무료로 제공하고 있으며 앞으로 나머지 RCP6.0, RCP8.5 시나리오도 제공할 예정이다. 본 연구에서는 국립기상연구소에서 12.5km의 역학적 상세화와 통계적 공간 상세화 모델인 PRIDE를 이용한 고해상도의 시나리오를 사용하므로 추가적인 다운스케일링 과정은 연구범위에 포함하지 않았다.

2.3 기후변화 모의 성능 평가

관측값, IPCC 4차 평가보고서에 참여했었던 ECHO-G, HadGEM2-AO의 과거 30개년(1971~2000년)의 한반도 영역에 대한 기온과 강수량을 Fig. 3과 같이 월별로 분석하였다. 검정색선이 관측값, 빨강색선이 HadGEM2-AO, 하늘색선이 ECHO-G모델의 모의값으로 기온의 경우 이

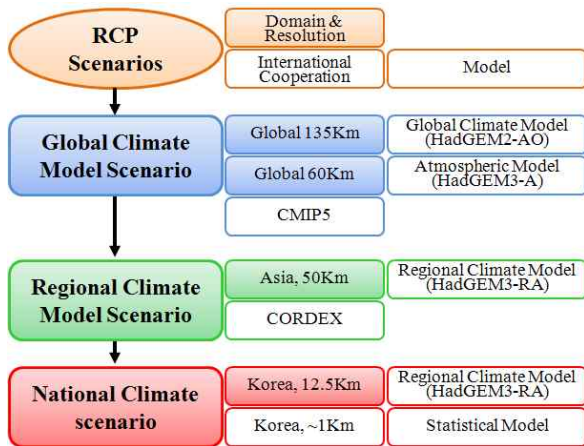
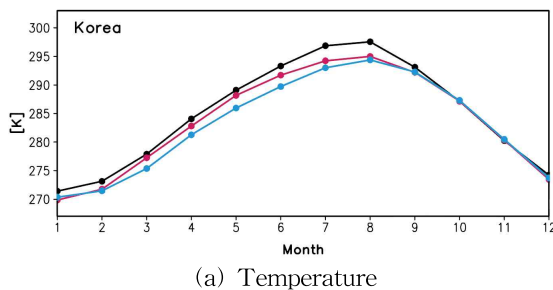


Fig. 2. Calculation Step and Resolution of Climate Change Scenario



전모델보다 잘 모의하고 있으며 강수량의 경우 여름철 강수피크를 제대로 모의하고 있다.

과거기후실험의 모의성능 평가를 위해 관측대비 모델 결과의 편차 값을 산정하였다(Hyun et al., 2012). 우선 HadGEM2-AO에서 전망된 20개 기후 변수들을 관측 값과 비교하여 Eq. (1)과 같이 편차를 구한다.

$$E^2 = \sum_{n=1}^N \omega_n \left(\frac{\overline{S_n} - \overline{o_n}}{\sigma_{n,o}} \right)^2 \quad (1)$$

$\overline{S_n}$ 은 모델값, $\overline{o_n}$ 은 관측값, $\sigma_{n,o}$ 은 관측값의 표준편차, ω_n 은 가중치(=1)이다. 구해진 모델의 편차를 전체 모델의 평균 편차로 나누어, Eq. (2)와 같이 평균적인 모델성능에 대비한 각 모델의 성능을 계산한다.

$$I_n^2 = \frac{E_r^2}{E_g^2} \quad (2)$$

E_r^2 은 각 모델의 편차, E_g^2 은 전체 모델의 평균 편차이다. 이렇게 계산된 편차를 모든 변수에 대하여 평균하여, Eq. (3)과 같이 20개 기후 변수의 모의 성능을 모두 반영한 종합적인 모델 평가 지수인 I^{20} 를 계산한다. Hyun et al. (2012)은 IPCC 4차 평가보고서에 참여한 대부분의 모델 결과와 비교하였을 때 국립기상연구소의 실험결과가 우수하다 하였으며 대부분 기후 모델에서 모의 성능이 좋지 못한 인도 지역과 동아시아 지역에서도 성능개선이 있음을 판단하였다.

3. 강우-유출 모형

수자원영향평가를 위한 유출분석은 고해상도 기후변화 시나리오를 유출모형에 적용하여 유역별 유출 시나리오를 생산하고 분석하여 수자원의 변동성을 평가하는 것이다. 이를 위해서는 장기유출분석을 수행할 수 있는 유출모형의 선정 및 입력 자료의 구축이 선행되어야 한다(Park et al., 2011). 본 연구에서는 기후변화시나리오에서의 일단

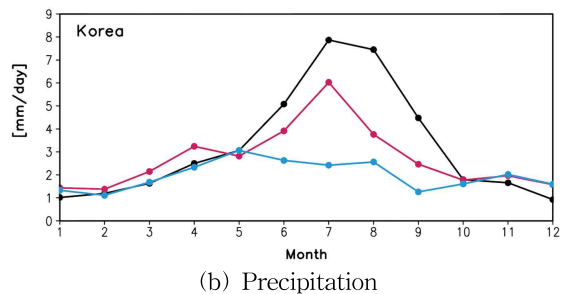


Fig. 3. Annual Cycle of Temperature and Precipitation for 1971~2000

위 유출모의를 위해 기존 국내외의 연구성과나 유출모형의 인지도, GIS자료의 활용성, 그리고 연구의 적합성 등을 고려하여 준분포형 모형인 최신 버전의 ArcSWAT모형을 선정하였다.

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발된 유역모형(Arnold et al., 1998)로서 Soil and Water Assessment Tool의 약자이다. 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하기 위하여 1994년 최초로 개발되었다. 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기 강우-유출모형으로서 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 부모형으로 구성되어있다.

SWAT 모형에서는 토지부분의 수문순환을 정확하게 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 지표유출, 측방 지표하 유출, 침투, 지하수, 수로손실, 증발산 등으로 구성하며 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산을 반영할 수 있게 유역을 구분한다. 각 HRU에서 유출이 구분되어 계산되고 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 흐름이 추적된다. 물수지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (3)$$

여기서, SW_t 는 최종의 토양수분량(mm), SW_0 는 i 일의 초기토양수분량(mm), R_{day} 는 i 일에서의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일에서의 지표유출량(mm), E_a 는 i 일에서의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀량(mm), t 는 시간(일)이다.

4. 하천네트워크 모형

KModSim 모형은 기존의 네트워크 모형 이론을 기반으로 미 콜로라도 주립대학의 Labadie 교수가 개발한 유역 물관리 모의모형인 ModSim을 수정, 보완하여 대상 유역이 갖는 물리적 혹은 운영측면의 특성을 반영한 일, 순, 반순, 월 단위 모의운영모형(Korea Water Resources Corporation, 2008)이다. KModSim은 Lagrangian Relaxation Algorithm을 사용하여 선형네트워크의 해법을 적용하고 하천유역을 일반화된 네트워크로 구축한다. 이렇게 구축된 하천유역 네트워크 모형은 하천유역 관리에 있어서 물리적, 수문학적, 제도적인 측면에서 물이 배분될 수

있도록 하고, 유역 수자원관리 시설의 전체적인 배치 및 운영조건을 다양하게 반영할 수 있도록 구축되어 진다.

KModSim 모형의 네트워크흐름 최적화는 우선순위를 고려한 수자원 운영을 정확히 모의한다는 것을 의미하며 비용을 최소화하는 최적 네트워크 흐름을 구하기 위하여 전단계모의 결과를 초기치로 이용하여 반복과정을 통해 최적 네트워크흐름을 결정한다. 네트워크 흐름의 질량 보존을 유지하는 범위에서, 계산시간 동안 선형 최적화 문제를 해석함으로써 최적 네트워크흐름을 모의한다.

$$\text{minimize } \sum_{l \in A} c_l q_l \quad (4)$$

노드의 제약조건은 다음과 같다.

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{k \in I_i} q_k = b_{it} \text{ for all nodes } i \in N \quad (5)$$

$$l_{it} \leq q_l \leq u_{it}(q) \text{ for all nodes } l \in A \quad (6)$$

여기서, c_l 는 링크 l 에서의 비용, 가중치 혹은 단위 유량당 우선순위, q_l 는 링크 l 에서의 유량, A 는 네트워크상의 모든 링크 혹은 아크, O_i 는 노드 i 에서 시작되는 모든 링크, I_i 는 node i 에서 끝나는 모든 링크, b_{it} 는 시간 t 일 때 노드 i 의 유입(양수) 혹은 수요(음수), l_{it} 는 시간 t 일 때 링크 l 에서의 하한치, u_{it} 는 시간 t 일 때 링크 l 에서의 상한치이다.

가상의 노드와 링크가 포함된 완전 순환네트워크를 도시한 것으로써 내부가 채워진 노드 1, 2, 3, 4와 실선으로 표시된 링크 1, 2, 3은 사용자가 작성한 실제 유역의 상황을 나타내는 물리적인 시스템 노드와 링크이다. 점선으로 표시된 노드와 링크는 가상적인 노드와 링크를 나타낸다. 즉 이들은 실제 유역에서 물리적으로 작용하는 시스템의 일부는 아니지만, 전체 시스템에 대해 질량보전의 법칙을 성립하게 한다. 시스템 내에는 항상 6개의 가상적인 노드가 있으나 가상적인 링크 수는 사용자의 네트워크 크기에 따라 개수가 결정된다. Fig. 3에서 I는 유입량 계산노드로 유입량 및 초기저류량과 더불어 시스템에 제공되는 총유입량을 계산하고, D는 수요량 계산노드로 시스템 상에서 수요량을 충족시키기 위한 공급량을 나타내며, S는 저류량 계산노드로 저수지의 이월 또는 기간말 저류량을 계산하고, SP는 여수로 방류 계산노드로 충분치 못한 저수지용량에 의해 조절이 불가능한 방류량을 계산하며, GW는 가상지하수노드로 지표수와 지하수간의 물 이동을 계산하고, M은 물수지노드로서 시스템 전체의 물수지를 유지시켜 준다.

5. 대상유역 및 유출량 전망

5.1 대상유역

본 연구의 대상유역인 금강유역은 금강분류 구간에 대청 다목적댐과 용담 다목적댐이 설치되어 홍수조절에 활용되고 있고, 하구에 금강 하구둑이 설치되어 운영되고 있다. 금강유역은 북위 35°35'~37°05', 동경 126°41'~128°25'에 걸쳐 우리나라의 중앙부 서쪽에 위치하고 있고, 유역면적은 9,914.013 km², 유로연장은 388.45 km으로 한강, 낙동강에 이어 3번째로 큰 유역이다. 본 유역은 14개의 중권역으로 구성되어 있으며, 유역둘레는 737.89 km이고, 유역평균폭은 25.52 km, 유역평균표고는 EL.85.31 m, 유역평균 경사는 16.74%이다. 연평균 기온은 11.5℃이며 추후

소별 증발량은 1,070~1,292 mm 정도이다. 금강 유역내의 행정구역으로는 대전광역시, 충청남도, 충청북도, 전라북도, 경상북도, 경상남도, 경기도의 1광역시 6도 8시 17군 5구를 포함하고 있다(Korea Water Resources Corporation, 2010a).

Fig. 4는 금강유역도 분석에 사용된 관측소의 계약적인 현황도를 나타내었다. 금강유역 내 기상청의 기상관측소는 7개 관측소(장수, 금산, 추풍령, 보은, 대전, 청주, 부여)가 있고, 티센망에 속하는 천안관측소를 포함하면 총 8개의 기상관측소가 있다. 강우관측소는 총 115개 있으며, 하천 수위관측소는 유역 내 총 54개가 있다.

5.2 미래 온실가스 시나리오에 따른 기상현황

미래 온실가스 시나리오에 따른 향후 90년간(2011~2100년) 금강유역 내 8개소 기상관측소의 연평균 강우량을 분석한 결과 RCP4.5는 1,660.92 mm, RCP8.5는 1,630.99 mm로 과거 23개년에 비해 강우량이 25% 이상씩 증가하였고, 그 중 천안관측소에서 30% 이상 가장 크게 증가하였다. 월평균 강우량 총 증가율은 RCP4.5는 27.71%, RCP8.5는 25.41% 증가하여 상대적으로 RCP4.5가 더 크게 증가하였다(Fig. 5). 하지만 월별로 증가한 개월 수를 보면 RCP8.5가 더 많은 증가율을 보이는데 이는 다른 달보다 7월에 RCP4.5가 크게 증가하여 총 증가율을 높인 것으로 판단된다. 미래의 월평균 기온을 살펴보면 RCP4.5보다 RCP8.5시나리오가 월별 평균 1.3℃ 높은 것으로 나타났고, 다른 달에 비해 9월과 10월달에 평년기온보다 높은 기온을 나타낼 것으로 예측되었다.

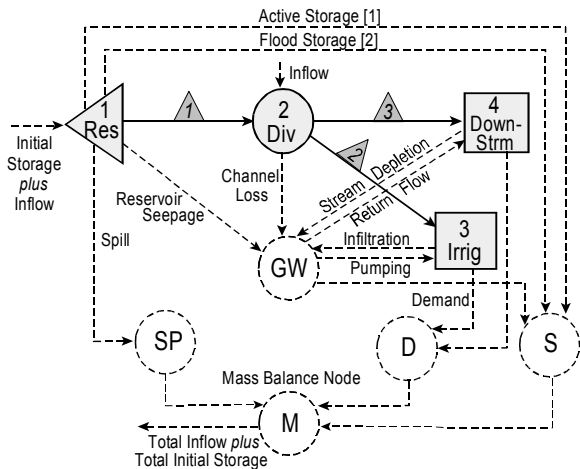


Fig. 4. Illustration of KModSim Network Structure

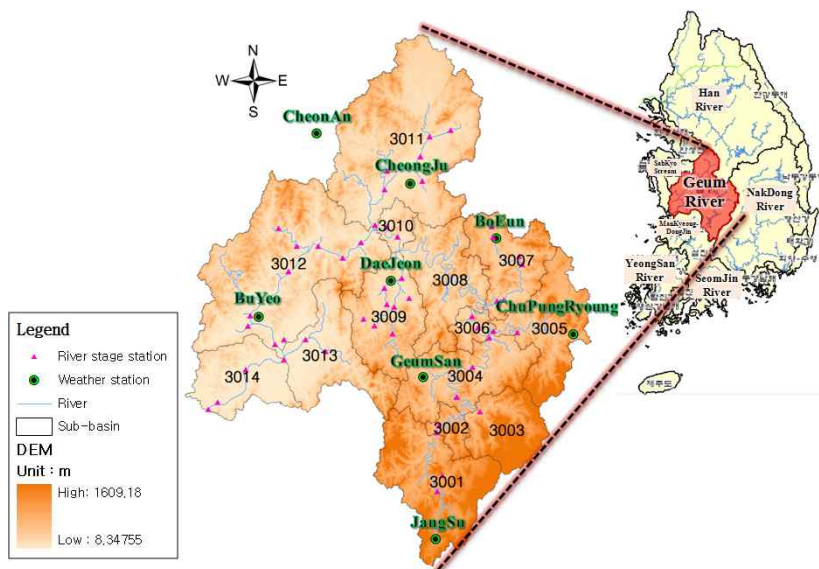


Fig. 5. Location Map Showing the Geum River Basin

5.3 SWAT모형에 의한 유출분석

ArcSWAT 모형을 금강유역에 적용시키기 위하여 수 지표고모델의 입력을 통한 유역의 분할을 수행하였다. Threshold Area는 19,000 ha로 설정하였고, 용담댐 및 대청댐의 댐지점을 추가하여 경사도, 경사방향, 지형분석을 자동적으로 수행하는 자동유역분할기능으로 총 15개 소 유역으로 분할했으며 토지이용도 및 토양도의 중첩수행으로 인해 HRU를 385개로 나누었다. 유역분할 세부사항 및 모형수행 활용공식은 Table 1과 같이 선택하여 유출량을 모의하였다. 기상자료는 유출량 산정에 사용되는 기본적인 데이터로 강우, 최고·최저 기온, 태양복사량, 상대습도, 풍속 자료를 기상청과 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water Management Information System)으로부터 제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다.

강우-유출모형의 모의결과를 평가하는 방법에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 피어슨의 결정계수(Pearson's coefficient of determination) R^2 (Legates and McCabe, 1999), Nash & Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970)의 모형효율계수(model efficiency coefficient) EI의 2가지 평가항목을 적용하여 모형의 적용성을 검토하였다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (7)$$

$$EI = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (8)$$

여기서, P_i 는 시간에서의 모의유량, O_i 는 시간에서의 관측유량, \bar{P} 는 전체모의시간의 모의유량평균, \bar{O} 는 전체모의시간의 관측유량평균, n 은 시간 간격개수이다.

본 연구에서는 유출량 분석결과 관측값보다 모의값이 크게 모의되어 유출량을 감소시킬 수 있는 매개변수의 범위에서 보정을 수행하였다. 모형의 효율적인 보정을 위해 국외 연구에 의해 사용된 지표수 흐름 모의와 관련된 매개변수를 참고로 하여 CN2, ESCO, SOL_AWC를 선택하여 허용범위 내에서 변화시키면서 보정을 수행하는 시행착오법을 사용하였다. 최적의 보정기간을 설정하기 위해 2004년부터 보정 시작기간으로 3개년간(2004~2006년)을 설정하여 매개변수를 보정하였다. 모의유출량을 감소시키기 위해 토양증발과 관련된 매개변수인 ESCO를 전유역에 0.5로 변환하였고, 토양수분함량 매개변수인 SOL_AWC를 0.1 감소시켰다. SCS 유출곡선지수 매개변수인 CN2는 유출량을 감소시키기 위해 산림을 선택해 변수를 감소시켜주었다.

보정과 검정을 통한 용담댐 및 대청댐 지점의 모의된 유출량을 관측유량과 비교한 결과 EI(모형효율계수), R^2 (피어슨의 결정계수) 모두 80% 이상 일치하는 것으로 분석되어 모의치와 실측치 간의 연관이 있음을 확인하였다. 이 두 지점은 금강유역 내에서 홍수시 방류량 및 갈수시 저수량을 조절하는 댐지점으로 유역내 유량관측의 지표로서 이용되는 것으로 유출을 모의하는데 SWAT모형이 적합하다고 판단된다.

5.4 기후변화에 따른 미래 유출량 전망

기후변화정보센터(CCIC, Climate Change Information Center)에서 제공하는 RCP 온실가스 시나리오를 금강유역내 각 기상관측소와 가까운 위·경도지점을 찾아내어 미래 90개년(2011~2100년)을 추출하였다. 이 시나리오는

Table 1. Equation Selection

	Equation	Option
Rainfall distribution	Skewed normal	√
	Mixed exponential	
Potential ET method	Priestley-Taylor method	
	Penman-Monteith method	√
	Hargreaves method	
Channel water routing method	Variable storage	
	Muskingum method	√
Surface Runoff	SCS curve number method	√
	Green & Ampt Infiltration method	

기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO을 통해 전지구 135 km, 한반도12.5 km, 남한상세 1 km까지 높은 고해상도의 통계적 상세화 기법을 통한 시나리오로서 현재 기상청에서 RCP 시나리오의 4가지 종류 중 RCP4.5, RCP8.5 두 시나리오를 제공하고 있으며 SWAT모형의 기상자료로 입력하기 위해 일자료를 제공받았다. 미래 유출량을 비교하기 위한 과거 관측값은 용담댐 관측 시작 이후인 2001년부터 2010년까지 10년간의 연평균 관측유출량을 기준으로 미래 2020년대(2011~2040년), 2050년대(2041~2070년), 2080년대(2071~2100년)로 21세기를 3구간으로 나누어 비교하였다. 분석결과, 두 시나리오 모두 과거 10개년간의 연평균 유출량을 기준으로 미래 90년간 RCP4.5 시나리오 하에서 평균 47.76%, RCP8.5 시나리오 하에서 평균 36.52% 가량 유출량이 증가할 것으로 예측되었다(Table 4, Fig. 6). 강우량의 증가율은 미래 90개년을 10년씩 평균하여 Fig. 7에서 보는바와 같이 유출량의 패턴과 비슷하게 증가 할 것으로 예측되었으며 미래 90년간 RCP4.5 시나리오 하에서 평균 23.46%, RCP8.5 시나리오 하에서 평균 21.36% 가량 증가할 것으로 예측되었다.

6. KModSim 모형에 의한 수자원 이수안전도 분석

6.1 금강유역 KModSim 구축

금강수계의 최상류인 용담댐부터 시작해 대청댐, 갑천과 미호천의 합류점, 공주수위표와 규암, 강경, 논산천, 금강하구까지 하나의 네트워크로 구성하여 Fig. 7과 같이 각 댐지점의 수요량과 통과수요량에 따라 금강유역의 이수안전도가 안전한지 여부를 결정하고자 하였다. 저수지 운영은 저류노드에 의해 모의가 가능하며, 수요노드와 같이 우선순위 설정이 가능하다.

6.2 중권역별 유출량

유출량은 KModSim내 비저류 노드로서 금강유역내 중권역별 유출량 자료로 지류, 최상류수, 미계측유입량 등을 관측유출량 뿐만 아니라 강우-유출 모형, 예측유입량, 가뭄 시나리오, 추계학적 모의발생 등의 방법으로 생성된 자료도 사용이 가능하다. 본 연구에서는 RCP 온실가스 시나리오 하에서의 SWAT모형에 의한 1991년부터 2100년까지 90년간의 일유출량을 금강유역내 각 중권역별 면적비에 맞게 수정하여 구축하였다.

Table 2. Calibrated Parameter Values for the SWAT Model

Parameter	Description	Input File	Value
CN2	Initial SCS runoff curve number for AMCI	.MGT	▽2
ESCO	Soil evaporation compensation factor	.HRU	0.5
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	.SOL	▽0.1

Table 3. Evaluation Coefficients for SWAT Calibration and Validation

	Calibration (2004~2006)		Validation (2007~2009)	
	Yongdam	Daecheong	Yongdam	Daecheong
R^2	0.8833	0.9372	0.9225	0.9540
EI	0.8247	0.9371	0.8868	0.9150

Table 4. Future Rainfall and discharge

Scenario		Rainfall (mm) / Discharge (m ³ /s)			
		2001~2010 (year)	2011~2040 (year)	2041~2070 (year)	2071~2100 (year)
RCP 4.5	Yongdam	1,507.68 /302.21	1,755.52 (▲16.44%) /421.80 (▲39.57%)	1,848.06 (▲22.58%) /448.48 (▲48.40%)	1,914.85 (▲27.01%) /464.24 (▲53.61%)
	Daecheong	1,357.07 /952.63	1,635.20 (▲20.49%) /1,365.28 (▲43.32%)	1,664.32 (▲22.64%) /1,379.88 (▲44.85%)	1,785.59 (▲31.58%) /1,493.57 (▲56.78%)
RCP 8.5	Yongdam	1,507.68 /302.21	1,664.58 (▲10.41%) /387.03 (▲28.07%)	1,882.35 (▲24.85%) /454.47 (▲50.38%)	1,757.38 (▲16.56%) /398.24 (▲31.78%)
	Daecheong	1,357.07 /952.63	1,603.10 (▲18.13%) /1,221.98 (▲28.27%)	1,762.35 (▲29.86%) /1,448.80 (▲52.08%)	1,741.38 (▲28.32%) /1,224.30 (▲28.52%)

6.3 용수수요량

KModSim은 용수수급 분석을 하기 위해서 입력된 유입량 자료를 기반으로 용수수요자료를 입력하게 된다. 용수수요자료는 시계열자료를 입력하는데 생활, 공업, 농업 용수량과 도수유량, 수리권 수량 등의 사용 후 일정량이 소모되는 소모 수요량 모의가 가능하다. 본 연구에서는 Table 5와 같이 댐운영 실무편람(Korea Water Resources Corporation, 2010b) 이수부문의 용담 및 대청댐의 월별 댐 용수공급 계획에서 취득한 자료를 바탕으로 수요량을 사용하였다. 용담댐은 월평균 생·공업수 15.6CMS를 취수하며 유지용수 5.0CMS를 방류한다. 대청댐은 월평균 생·공업수 27.2CMS와 농업용수 2.2CMS를 취수하며 생·공업수 14.0CMS와 농업용수 8.8CMS를 방류한다. 공주수위표 지점의 수요량은 금강홍수통제소에서 고시된 하천유지유량의 평균갈수량 기준으로 15.1 m³/s로 구축하였다.

6.4 우선순위

모든 흐름은 우선순위에 따라 발생한다. 우선순위를 부여하는 방법은 상당히 복잡하고 특별히 정해진 기준이 없어 통상적으로 우선순위의 기본은 생활용수와 공업용수를 같은 비중으로 최우선순위로 고려하고, 다음은 농업용

수, 마지막으로 하천유지유량 순으로 고려한다(Lee et al., 1999). 상류가 하류 보다 우선 수요되며 우선순위는 낮은 값일수록 먼저 수요된다. 댐운영도 저수위, 상시만수위, 홍수위에 해당되는 저수용량을 우선순위로 매겨놓아 하류의 우선순위가 높을 경우 방류하는 식이다. 본 연구에서는 Ahn et al. (2009a)이 사용한 우선순위를 참고하여 Table 6과 같이 생·공업수, 농업용수, 유지유량의 순으로 우선 공급하였으며 하류로 갈수록 우선순위를 낮게 부여하였다.

6.5 온실가스 시나리오에 따른 미래 용수공급 전망

미래 용수공급전망을 위한 이수안전도 기준 수립을 위해 과거 금강유역 이수안전도를 평가하였으며 이를 토대로 RCP시나리오별 미래 용수공급 가능량을 Table 7과 같이 전망하였다. 과거 20년간(1991~2010년)의 금강유역 내 관측강우를 검·보정을 통한 SWAT모형에 의해 모의된 각 중권역별 유출량을 KModSim의 비저류노드에 유입량으로 입력하여 현재 댐운영 실무편람(Korea Water Resources Corporation, 2010b)의 금강유역 용수공급 계획으로 이수안전도를 분석한 결과, 용담댐에서 15.6 m³/s의 생·공업용수를 취수시 95.14% 이수가 가능하며 대청댐에서는 27.2 m³/s의 생·공업용수를 취수시 95.06% 이수

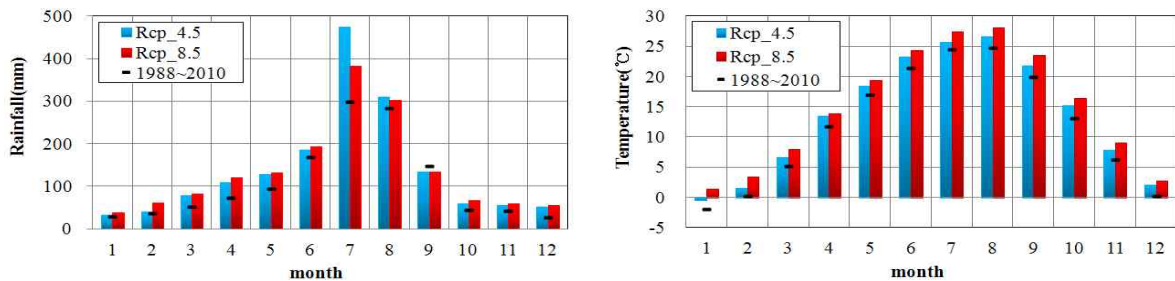


Fig. 6. Monthly Rainfall and Temperature

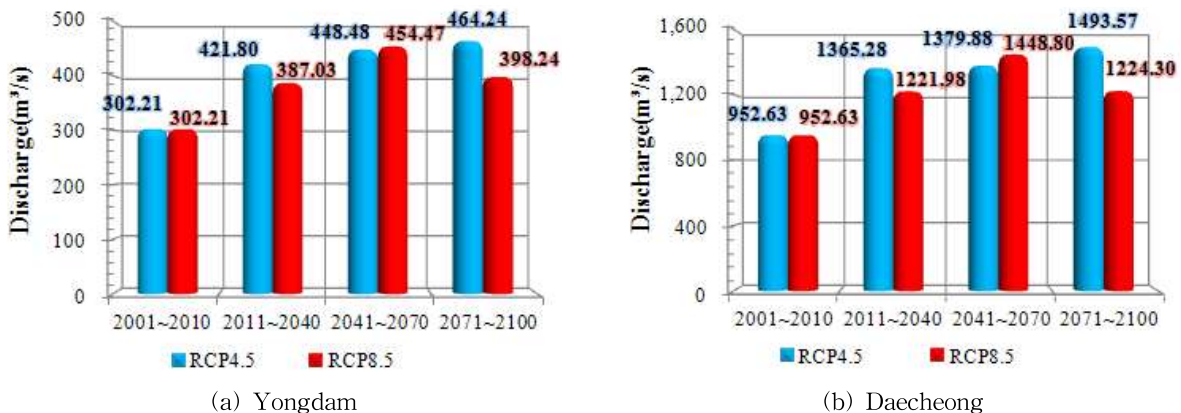


Fig. 7. Future Discharge Outlook

Table 5. Demand of Municipal, Industrial Water and Agricultural Water

	Demand (m ³ /s)							
	Yongdam				Daecheong			
	Municipal · Industrial	Agricultural	Maintenance	Total	Municipal · Industrial	Agricultural (April ~ September)	Maintenance	Total
Reservoir (106 m ³)	15.6 492.7	- -	- -	15.6 492.7	27.2 857	2.2 70	- -	29.4 927
Downstream (106 m ³)	- -	- -	5.0 157.7	5.0 157.7	14.0 443	8.8 279	- -	22.8 722
Total (106 m ³)	15.6 492.7	- -	5.0 157.7	20.6 650.4	41.2 1,300.0	11 349	- -	52.2 1649.0

Table 6. Priority of Geum River in KModSim Model

Node		Priority
Reservoir	Yongdam	1,000
	Daecheong	1,100
Consumptive Demand	Yongdam (Municipal · Industrial)	100
	Daecheong (Municipal · Industrial)	300
	Daecheong (Agricultural)	500
	Gongju	900
Flowthru Demand	Yongdam (Municipal · Industrial)	200
	Daecheong (Municipal · Industrial)	400
	Daecheong (Agricultural)	600
Network Sink		9,999

Table 7. Additional Diversion Requirement for Maintenance of Water Supply Reliability 95%

Dam	Contents	Safety grade (%)	Diversion Requirement (m ³ /s)
Yong dam	Dam Operation Manual	-	15.6
	1991 ~2010 (year)	95.14	15.6
	2011 ~2100 (year) under RCP4.5	95.00	25.01
	2011 ~2100year under RCP8.5	95.00	22.08
Dae cheong	Dam Operation Manual	-	27.2
	1991 ~2010 (year)	95.06	27.2
	2011 ~2100 (year) under RCP4.5	95.07	52.02
	2011 ~2100 (year) under RCP8.5	95.07	48.28

가 가능하게 나타나 약 95% 수준의 이수안전도로 운영 중인 것으로 검증되었다.

미래 온실가스 시나리오별 유출량을 금강유역내 용담댐 및 대청댐의 물수지를 분석한 결과 두 시나리오 모두 부족없이 예측되었다. 모두 월별 유출량이 크게 증가되어 저류량이 증가되었기 때문에 미래에도 현재 댐운영 실무 편람에서 계획한 월별 취수량은 충분히 취수 가능하다.

이수안전도 95% 유지조건 하에서 취수가능량을 분석한 결과, RCP4.5 시나리오 하에서 용담댐은 25.01 m³/s, 대청댐은 52.02 m³/s로 각각 9.41 m³/s, 24.82 m³/s 더 취수 가능한 것으로 예측되었다. RCP8.5 시나리오 하에서 용담댐은 22.08 m³/s, 대청댐은 48.28 m³/s로 각각 6.48 m³/s, 21.08 m³/s 더 취수 가능한 것으로 예측되었다.

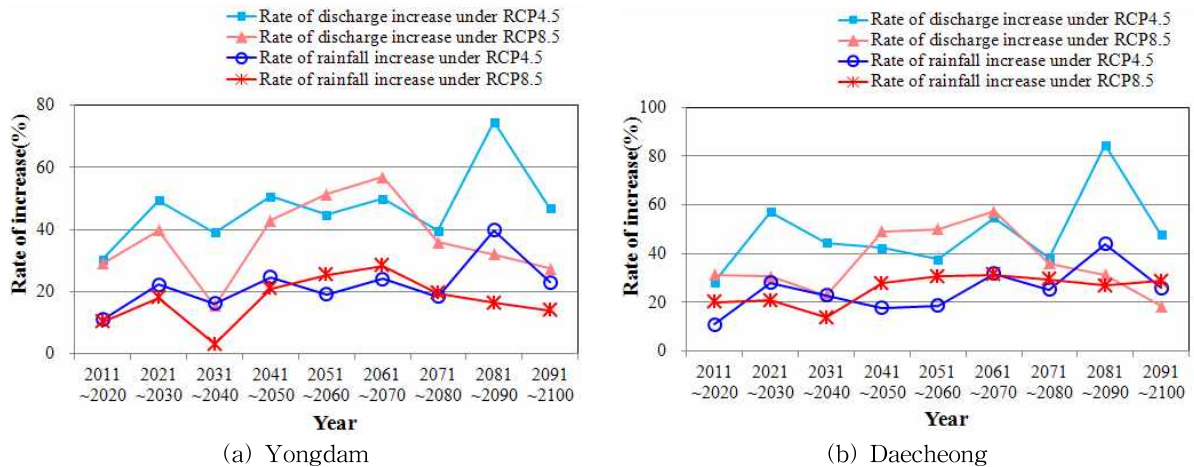


Fig. 8. Rate of Discharge and Rainfall Increase Outlook

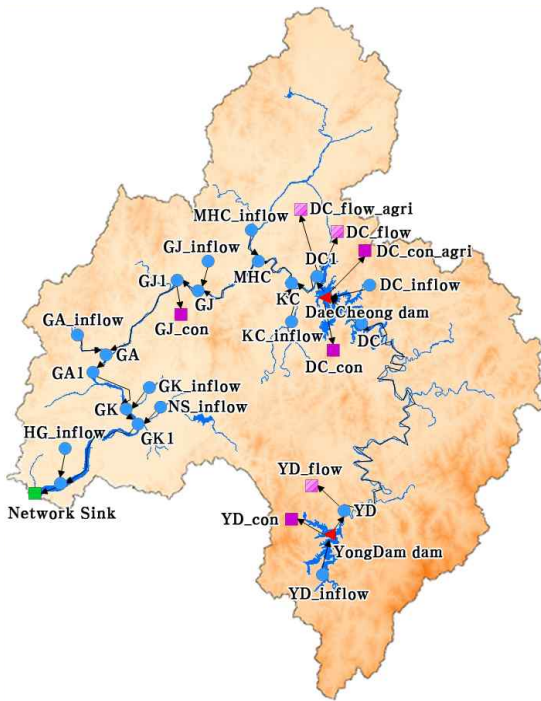


Fig. 9. Geum River Basin in the KmodSim Model

7. 결 론

새로운 온실가스 시나리오를 금강유역내 기상관측소별 수문자료로 추출하여 강우-유출모형인 SWAT을 통한 새로운 온실가스 시나리오 하에서의 중권역별 유출량을 산정하였다. 하천유역 네트워크모형인 KModsim으로 물수지 분석을 수행하여 용담댐과 대청댐의 저류량과 생·공업 용수의 수요량에 따른 이수안전도를 기준으로 미래 댐 용수공급량을 조절함으로써 추가 용수공급량을 산정하였으

며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 새로운 온실가스 배출 시나리오는 RCP 시나리오에 기초해 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO로 약 135 km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오를 산출한 후 우리나라 지역에 대한 12.5 km 해상도의 지역기후모델인 HadGEM3-RA로 생성된 후 통계적 상세화 기법을 적용하여 1 km 고해상도의 남한 상세 기후변화 시나리오를 생성하였다.
- 2) ArcSWAT모형을 이용해 1988년부터 2011년까지의 과거 유출모의를 실시하였다. 금강유역내 대표 지점인 용담댐과 대청댐 지점에서 모형의 검정을 실시한 결과 각각 92.25%, 95.40%로 일치하는 등 비교적 잘 재현하였다.
- 3) 미래 온실가스 시나리오 하에서의 미래 90년간(2011~2100년)의 유출을 분석한 결과 두 시나리오 모두 2050년대까지 평균 48.9% 가량 선형증가하였으며 RCP4.5 시나리오 하에서 평균 47.76%, RCP8.5 시나리오 하에서 평균 36.52% 가량 유출증가가 일어날 것으로 예측되었다.
- 4) 미래 유량시나리오 하에서 KModSim을 이용한 금강유역의 물수지를 수행하기 위하여 댐운영 실무편람을 기준으로 이수안전도 95% 유지조건 하에서 취수가능량을 분석하였다. RCP4.5 시나리오 하에서 용담댐과 대청댐 각각 9.3m³/s 21.7m³/s 더 취수 가능하며, RCP8.5 시나리오 하에서는 6.40 m³/s 18.4 m³/s 더 취수 가능한 것으로 예측되었다.

예측의 신뢰도는 GCM모형이 가지는 물리적 과정의 정확성에 의해 좌우되며 시나리오가 가지는 시공간적 스케일의 상이성 등의 문제로 불확실성은 존재한다. 이러한

부분은 향후 기상분야에서의 여러 기상모델의 앙상블한 자료를 통해 결과를 도출하는 연구가 필요하며 수자원분야에서도 본 연구와 같이 다양한 기법을 이용하여 점차 불확실성을 최소화할 수 있는 연구가 지속적으로 필요하다. 금강유역은 다른 유역과 달리 이상강우가 발생하여도 용수공급이 증가하는 유역으로 일반 홍수 시 수문방류가 일어나지 않는 대규모 댐 특성을 가지므로 그에 따른 본 연구의 한계점을 감안하여 이해할 필요가 있으며 유역의 장래 안정된 용수수급계획 수립과 보완 시 본 연구의 용수공급 변화연구가 기초자료로서 활용가치가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J.H., Yoo, C.S., and Yoon, Y.N. (2001). "An Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin using GCM Simulation Results due to Global Warming." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 34, No. 4, pp. 335-345.
- Ahn, S.R., Park, G.A., Shin, Y.H., and Kim, S.J. (2009a). "Assessment of the Potential Water Supply Rate of Agricultural Irrigation Facilities Using MODSIM -For Geum River Basin-." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 10, pp. 825-843.
- Ahn, S.R., Park, M.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2009b). "Assessing Future Climate Change Impact on Hydrologic Components of Gyeongancheon Watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 1, pp. 33-50.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). "Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I : Model Development." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lee, B.J. (2007). "Outlook on Variation of Water Resources in Korea under SRES A2 Scenario." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 12, pp. 921-930.
- Hyun, Y.K., Kim, M.J., Khan, S.Y., Kim, J.S., Cho, C.H., Baek, H.J., Lee, H.S., and Lee, J.H. (2012). "Performance Assessment and Future Prospect on Climate Model between HadGEM2-AO used for RCP Climate Change Scenarios Computation at National Institute of Meteorological Research and Model Participant in the CMIP5." *Proceedings of the Spring Meeting of Korean Meteorological Society 2012*, KMS, pp. 25-26.
- Kang, D.H. (2007). *An Impact assessment of climate change on water resources for the Geum River basin*. M.S. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Kang, S.U., Cheong, T.S., Hwang, M.H., and Ko, I.H. (2007). "Validations of Water Resources Planning by K-MODSIM Model." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2007*, KWRA, pp. 2044-2048.
- Kim, B.S., Kim, H.S., Seoh, B.H., and Kim, N.W. (2004a). "Impact of Climate Change on Yongdam Dam Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 3, pp. 185-193.
- Kim, U.T., Yoo, C.S., Lee, D.R., and Lee, J.Y. (2004b). "Effects of Climate Change on the Streamflow for the Daechung Dam Watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 4, pp. 483-486.
- Korea Meteorological Administration (2011). *Case Studies to Understand and take Advantage of Climate Change Scenarios*.
- Korea Water Resources Corporation (2008). *Decision Support System, K-MODSIM Manual Ver. 1.1*.
- Korea Water Resources Corporation (2010a). *A Study for the Generation of Corresponding Plan on Climate Change for Future Water Resources Management (1th)*.
- Korea Water Resources Corporation (2010b). *Dam Operation Manual*.
- Lee, G.M., Yi, J.E., Shim, S.J., and Ko, S.K. (1999). "Water Resources Evaluation using a Network Optimization Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 32, No. 2, pp. 143-152.
- Lee, H.J. (a Translator) (2008). *Six Degrees* (the Author: Lynas M., 2008). Sejongbooks.
- Legates, D.R., and McCabe, G.J. (1999). "Evaluating the

Use of “Goodness-of-Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation.” *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 233-241.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I-A Discussion of Principles.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

National Institute of Meteorological Research (2011). Climate Change Scenarios Report 2011 for IPCC Assessment Report 5.

Park, J.H., Kwon, H.H., and No, S.H. (2011). “Outlook of Discharge for Daecheong and Yongdam Dam Watershed Using A1B Climate Change Scenario Based RCM and SWAT Model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 12, pp. 929-940.

논문번호: 12-125	접수: 2012.12.13
수정일자: 2013.02.15/02.19	심사완료: 2013.02.19