

기후변화 시나리오를 활용한 미래 한반도 물수급 전망 Water Balance Projection Using Climate Change Scenarios in the Korean Peninsula

김 초 룡* / 김 영 오** / 서 승 범*** / 최 수 웅****

Kim, Cho-Rong / Kim, Young-Oh / Seo, Seung Beom / Choi, Su-Woong

Abstract

This study proposes a new methodology for future water balance projection considering climate change by assigning a weight to each scenario instead of inputting future streamflows based on GCMs into a water balance model directly. K-nearest neighbor algorithm was employed to assign weights and streamflows in non-flood period (October to the following June) was selected as the criterion for assigning weights. GCM-driven precipitation was input to TANK model to simulate future streamflow scenarios and Quantile Mapping was applied to correct bias between GCM hindcast and historical data. Based on these bias-corrected streamflows, different weights were assigned to each streamflow scenarios to calculate water shortage for the projection periods; 2020s (2010~2039), 2050s (2040~2069), and 2080s (2070~2099). As a result by applying the proposed methodology to project water shortage over the Korean Peninsula, average water shortage for 2020s is projected to increase to 10~32% comparing to the basis (1967~2003). In addition, according to getting decreased in streamflows in non-flood period gradually by 2080s, average water shortage for 2080s is projected to increase up to 97% (516.5 million m³/yr) as maximum comparing to the basis. While the existing research on climate change gives radical increase in future water shortage, the results projected by the weighting method shows conservative change. This study has significance in the applicability of water balance projection regarding climate change, keeping the existing framework of national water resources planning and this lessens the confusion for decision-makers in water sectors.

Keywords : climate change, water balance, GCM, K-nn weighting, water shortage, water resources planning

요 지

본 연구에서는 기존의 기후변화를 고려한 물수급 분석 방법론의 문제점을 개선하기 위해 GCM 미래 유량 시나리오를 물수급 모형에 직접 입력하는 대신 과거 유량 시나리오의 가중값(재현확률)을 부여하는 새로운 물수급 전망기법을 제안하고자 한다. GCM 미래 기후자료를 TANK 모형에 입력하여 중권역별 미래 유량을 모의하였으며 모의결과에 대한 편이보정을 위해 Quantile Mapping 기법을 적용하였다. 이러한 미래 유량 전망결과를 반영하여 각각의 입력자료에 대한 가중값(재현확률)을 새롭게 산정함으로써 미래 목표 전망구간에 대한 물부족량을 산정하였다. 물수급 모형의 입력자료에 대한 가중값

* 서울대학교 건설환경공학부 석사 (e-mail: chorong@snu.ac.kr)

Master, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

** 교신저자, 서울대학교 건설환경공학부 정교수 (e-mail: yokim05@snu.ac.kr, Tel. 82-2-880-8916)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-dong, Gwanak-gu, Seoul, Korea

*** 노스캐롤라이나주립대학교 토목건설환경공학부 박사과정 (e-mail: sseo@ncsu.edu)

Ph.D. Student, Dept. of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University

**** 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 (e-mail: protews@snu.ac.kr)

Master Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

산정을 위해 K-nn 알고리즘을 적용하였으며 비홍수기(10~6월) 유량을 가중값 산정을 위한 기준유량으로 결정하였다. 기후 변화의 불확실성을 고려하고자 4개의 GCM과 3개의 AR4 SRES 온실가스 배출 시나리오를 앙상블 조합하여 생성한 기후변화 시나리오를 활용하였다. 본 연구에서 제시한 방법론을 한반도 4대강 유역에 적용한 결과, 기후변화를 고려한 한반도 미래 평균 물부족량은 2020s (2010~2039년)에는 과거에 비해 10~32% 정도 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 한반도 4대강 유역의 경우 먼 미래로 갈수록 비홍수기 유량이 점차 감소할 것으로 전망됨에 따라 2080s (2070~2099년)에는 과거 대비 평균 물부족량이 최대 97% (약 516.5백만 m³/년) 증가할 것으로 전망되었다. 기존의 기후변화 연구 방법론의 전망결과를 비교분석한 결과, 기존 방법론은 매우 극적인 물부족량 증가를 전망하고 있는 반면 본 연구에서 제안한 기법은 상대적으로 보수적인 변화를 전망하였다. 본 연구는 물수급 분석시 기후변화를 고려하되 기존 국가계획 방법론의 틀을 최대한 유지하고 있다는 점에서 국가수자원계획 수립에 있어 정책결정권자들의 혼돈을 줄여줄 수 있는 방법론이 될 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, 물수급, GCM, K-nn 가중값, 물부족량, 수자원계획

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화에 따른 수자원 영향 평가에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, GCM을 이용한 기후변화 시나리오와 수문모형 등을 결합하여 미래 유량변화에 따른 영향평가 연구들이 활발히 수행되고 있다. 더 나아가, 수자원의 효율적 관리 측면에서의 기후변화를 고려한 물수급 분석에 대한 연구는 이러한 미래 유량변화 전망결과를 물공급 시나리오로 적용하여 미래 물부족량을 전망하는 것으로, 1990년대 후반부터 미국을 비롯한 선진국들을 중심으로 진행되어 왔다.

Christensen et al. (2004)은 기후변화 시나리오에 대한 물배분량의 변화와 물부족 확률을 신뢰도 지수로 나타내었으며 Vicuna et al. (2007)은 CalSim II 모형을 개선한 후 2개의 온실가스 배출 시나리오와 2개의 GCM을 조합한 4개의 기후변화 시나리오를 적용하여 21세기 미서부 캘리포니아 유역의 물수급 전망을 예측하였다. Purkey et al. (2008)은 새크라멘토 유역을 대상으로 GCM을 활용한 4개의 기후변화 유량 시나리오를 WEAP 모형에 적용하여 각 시나리오별 물부족량을 산정하였다. 유럽의 경우, Fowler et al. (2007)은 Mospa 모형에 기후변화 시나리오를 적용하여 영국 IRZ (the north-west England Integrated Resource Zone)에서의 미래 가용 수자원량을 공급원별로 산정한 후 현재의 사용량과의 비교를 통해 미래 물수급 전망을 수행하였으며 Hoff et al. (2007)은 이스라엘의 요르단강 유역을 대상으로 WEAP 모형에 RCM (Regional Climate Model) 시나리오를 적용하여 물부족량을 산정하고 기후변화 모의에 대한 WEAP의 적용성을 검토하였다. 아시아 지역에서는, Islam et al. (2005)가 일본의 톤강 유역을 대상으로 CROPWAT 모형에 12개의 가상 기후변화

시나리오를 적용하고 각 시나리오별 물공급 비율과 가뭄지수를 산정하여 미래 물수급 전망을 비교하였으며, Kirono et al. (2007)은 호주 Rous County 지역을 대상으로 통합 수자원 모형인 IQQM에 가상의 물수요 및 물공급 시나리오를 적용하여 미래 물수급 전망을 수행하였다. 국내의 경우는 Seo et al. (2000)이 기후변화 유량 시나리오를 이용하여 금강 유역의 대청댐 운영 모의를 통한 수자원 영향 평가를 수행하였으며, Kang (2007)은 GCM 모형에 따른 6개의 기후변화 시나리오에 대한 금강 유역의 용담댐과 대청댐의 운영 모의를 통해 용수부족량 및 신뢰도, 회복도 및 취약도 등의 지수를 산정하였다. 그리고 최근에 Kim et al. (2010)은 고해상도 RCM 자료를 바탕으로 K-WEAP 모형을 사용하여 한강 유역 물수급 전망을 수행하였다.

이렇듯 최근 수행되고 있는 기후변화 연구들의 경우 대부분 GCM으로 모의한 유량전망 결과를 직접 물수급 모형에 입력하여 미래 물수급 전망을 수행하고 있다. 하지만 GCM 시나리오를 이용한 유량 전망 시나리오를 직접 사용할 경우 두 가지 문제점을 고려해야 한다. 첫째, 지금까지 대부분의 국가수자원계획을 위한 물수급 분석은 과거 유량자료를 활용하여 수립하였다는 것이다. 기후변화의 영향을 고려하기 위해서 과거 자료를 지양하고 GCM 시나리오에만 의존한다면, 지금까지 수립해온 수자원계획과의 연속성은 무너질 것이다. 따라서 기후변화의 영향을 고려한다 하더라도 기존의 국가수자원계획의 방법론을 최대한 유지하는 원칙이 필요하다. 둘째, 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 GCM이라 하더라도 그 불확실성이 매우 크기 때문에 GCM 전망결과에 전적으로 의존하여 실질적인 국가수자원계획을 수립한다는 것은 현실점에서 위험(risky)하다는 것이다. 그러므로 기후변화 영향을 고려하되 GCM 시나리오 자료를 직접 사용함으로써 발생하는 위험을 줄이

는 전략이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 GCM 모의 유량 시나리오를 모형에 직접 입력하는 대신에 GCM 기반 정보를 기존의 입력자료(과거 시나리오)의 가중값 부여에 반영하는 새로운 방법론을 제시하고 이를 한반도 4대강 유역에 적용하여 그 적용성을 검토한 후 궁극적으로 미래 한반도에 발생가능한 물부족량을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 기후변화를 고려한 물수급 전망기법

2.1 기존 물수급 전망 기법

기존의 물수급 분석에서는 여러 가지 기본 가정이 전제되는데, 무엇보다도 목표연도에 대해 과거 유량 시나리오가 그대로 재현될 것이라는 가정하에 분석이 실시되어 왔다. 그러나 최근 들어 여러 연구를 통해 전 세계적으로 기후변화 영향으로 인한 강우량 및 유출량의 변동이 예상됨에 따라 다양한 미래 유량 시나리오의 적용을 통해 기후변화에 따른 물공급 취약성을 분석해야 한다는 요구가 증가하게 되었다. 이에 미래 GCM 유량 시나리오를 반영하여 물수급 전망을 제시하는 연구가 전 세계적으로 수행되고 있으며, 국내에서도 최근 기후변화 대비 국가 물안보 확보 방안(MLTM, 2009, 이하 ‘물안보과제’)을 통해 GCM 및 고해상도 RCM 자료를 바탕으로 미래 한강 유역의 물수급 전망 결과가 제시된 바 있다.

하지만, 물공급 시나리오에 있어 과거 유량자료에서 GCM 미래 유량자료로 입력자료를 변경하는 것은 기후변화의 영향을 반영한다는 측면에서는 필수적이지만 연구 방법론의 급격한 변화일 수 있다. 이러한 방법론의 급격한 변화는 전망 결과의 불확실성을 가중시켜 정책결정권자들에게 혼란을 야기할 수 있으며, 실제로 물안보과제를 통해 산정한 물부족량 결과는 수자원장기종합계획(MOCT, 2006)의 결과와 비교하였을 때 연구기법의 불일치에 따라 모의결과에 큰 차이가 발생하였다(Table 1). 따라서 국가의 수자원계획을 개선함에 있어 기존의 분석 틀을 최대한 유지함은 물론 점진적인 기후변화의 영향을 고려할 수 있

는 연구기법으로의 개선이 필요하다고 판단된다.

2.2 기존 방법론의 개선 방향

본 연구에서는 GCM 시나리오에 따른 미래 유량 전망 결과를 물수급 모형에 직접 입력하지 않고 대신에 기존의 입력자료인 과거 유량 시나리오에 대한 가중값을 산정하여 반영하는 기법을 제안하고자 한다. 과거 시나리오는 수자원장기종합계획('06)에 준하여 1967~2003년(총 37개)의 연 유량 시나리오이며, 미래 GCM 전망결과를 바탕으로 각각의 시나리오에 대해 미래 재현확률을 반영한 가중값을 산정하는 것이다. 즉, 기존의 방법론에서 미래 GCM 유량 전망결과를 통해 물부족량을 산정한 후 전망된 연도별 물부족량에 등가중값(1/N)을 적용하여 평균 물부족량을 제시함과 달리 본 연구에서는 과거 유량을 통해 전망된 연도별 물부족량에(기후변화 영향을 고려한) 각각의 가중값을 부여한 후 가중평균값으로 평균 물부족량을 산정하게 된다. 예를 들어, 수자원장기종합계획의 평균 물부족량 산정은 과거 37년(1967~2003년) 유량 시나리오에 따른 각 연도별 물부족량의 평균값으로 산정하는데 이는 각 37개의 전망결과에 대해 등가중값(1/37)을 주어 계산한 결과이다. 이에 반해 본 연구에서 적용한 방법론은 기후변화의 영향에 따라 재현(발생)확률이 높은 연도의 유량 시나리오에 보다 많은 가중값을 주고, 재현확률이 낮은 시나리오에는 가중값을 부여하지 않음으로서(예를 들면, 발생확률이 높은 7개 연도에 1/7의 가중값을 각각 부여하고 나머지 30개 연도에 0을 부여함) 기후변화 영향을 고려한 미래 평균 물부족량을 전망하게 되는 것이다. 본 연구에서 제안하는 기후변화를 고려한 물수급 전망 흐름도는 다음 Fig. 1과 같다.

2.3 기후변화를 고려한 물수급 전망 기법

본 연구에서는 기후변화에 따른 기상 및 수문자료 생성에 적용된 사례(Groves et al., 2008; Sharif and Burn, 2006; Yates, 2003)가 있는 K -nearest neighbor (K -nn) bootstrap

Table 1. Comparison of the Existing Results in Water Shortage Projection (unit: $10^6 m^3$)

Water shortage projection in the Korean Peninsula	Water Vision 2020 ¹⁾ (modified in 2006)		Strategic Report (2009) ²⁾	
	Target period	2020	Target period	2040s
	Flow scenarios	(1967~2003)	Flow scenarios	(2031~2060)
Maximum shortage	862		3,300	
Increase ratio ³⁾ (%)			+283%	

¹⁾Water Vision 2020 (2006~2020) (MOCT, 2006)

²⁾National Water Resources Security Against Climate Change (MLTM, 2009)

³⁾Increase ratio (%): change ratio from the results in Water Vision 2020 (MOCT, 2006) excluding climate change impacts

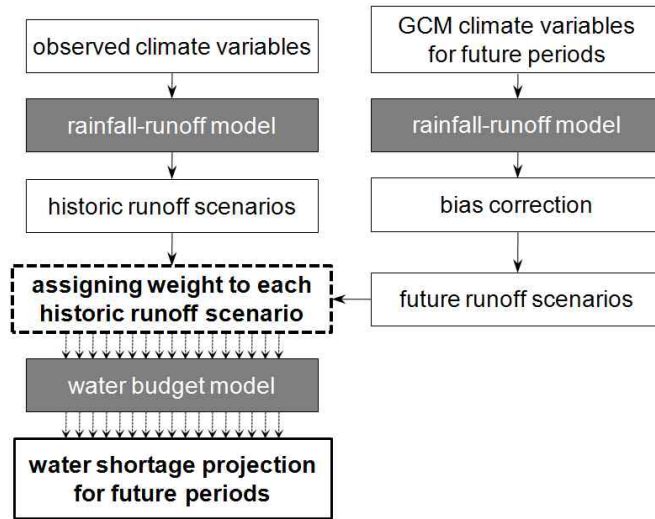


Fig. 1. Framework of This Research

resampling algorithm의 가중값 산정 기법을 적용하였다. K -nn bootstrap resampling 기법은 미래 전망값이 실제 과거에 기록되었던 수문자료 값들로부터 추출(sampling)되므로 과거의 수문자료의 통계적 특성이 잘 유지되는 장점이 있다. 본 연구에서는 미래 특정연도의 물부족량을 전망하기 위해 GCM 유량 전망값과 같거나 비슷한 결과를 나타내는 과거 유량 시나리오를 다수 선택한 후 그 과거 자료를 입력하여 모의한 물부족 결과를 가중 평균하여 미래 물부족량을 전망하였다. 가중값 부여는 연 단위 유량 시나리오로 결정하였으며, 가중값 산정 알고리즘은 다음과 같다.

2.3.1 가중값 산정 기법: K -nn algorithm

- 1) 미래 전망구간의 선정(e.g. 30 years)
- 2) 전망구간 시작연도의 GCM 유량값과 가장 가까운 K 개의 과거 시나리오 선택

$$K = \sqrt{N} \quad (\text{Lall and Sharma, 1996}) \quad (1)$$

여기서, N 은 총 과거 유량 시나리오 개수

- 3) 선정된 K 개의 과거 시나리오에 대한 각각의 가중값 계산

$$W(j) = \frac{1/j}{\left(\sum_{j=1}^K 1/j\right)} \quad (2)$$

여기서, j 는 최근린 순서 ($j=1,2,\dots,K$)

- 4) 전망구간 마지막 연도까지 위 3단계 반복

즉, 최근린 순서대로 선정된 K 개의 과거 시나리오에는 3)단계의 가중값 산정식인 Eq. (2)로 계산된 가중값이 부여되고 나머지($N-K$)개의 과거 시나리오에는 가중값이 0

이 되는 것이다.

가중값 부여를 위해 K 개의 최근린 샘플을 선정할 때는 미래 전망결과와 과거 시나리오의 유량값 비교 대상이 될 기준유량이 필요한데, 이를 선정하기 위해 Spearman의 순위상관계수(Rank Correlation Coefficient)를 축도로 과거 37개년의 연도별 물부족 모의결과와 연도별 과거 유량값 사이의 상관관계를 분석한 후, 그 결과를 바탕으로 가중값 부여 기준유량으로 비홍수기 유량(10~6월)을 선정하였다.

2.3.2 평균 물부족량 전망

평균 물부족량 산정을 위해 미래 목표 전망구간(30년)의 GCM 유량 모의 시나리오를 바탕으로 연도별 과거 샘플 시나리오들을 추출하여 가중값을 산정한 후 이를 바탕으로 평균 물부족량을 산정한다. 앞서 기술한 K -nn 가중값 산정기법을 바탕으로 한 평균 물부족량을 산정하는 절차는 아래와 같다.

- 1) 첫 번째 전망연도의 미래 GCM 유량 전망값과 가장 일치하는 유량값을 가진 K 개의 표본을 과거 유량 시나리오에서 최근린 순서대로 선정
- 2) 선정된 K 개의 표본 유량 시나리오에 대한 물부족량을 K-WEAP 모형을 통해 산정
- 3) 선정한 K 개의 표본에 최근린 순서대로 가중값을 부여한 후 각 물부족량에 대한 가중평균값으로 첫 번째 전망연도의 물부족량을 산정
- 4) 위 세 단계를 최종 전망연도까지 반복 수행한 후 30년 결과의 평균값으로 목표 전망구간의 평균 물부족량을 산정

3. 한반도 미래 물수급 전망

본 연구에서는 전 지구적 기후변화가 유역 수문순환 과정과 수자원에 미치는 영향을 평가하고 미래 물수급 전망을 수행하기 위해 적용대상을 한반도 4대강(한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강) 유역으로 선정하였으며 각 유역을 중권역 단위로 전망을 수행하였다. 대상 유역의 수문학적 특성을 살펴보면, 4대강 유역별 연평균 강수량은 한강 유역 1,260 mm, 낙동강 유역 1,203 mm, 금강 유역 1,271 mm, 영산·섬진강 유역 1,399 mm(MLTM, 2011)으로 유역별 큰 차이는 없으나 영산·섬진강 유역이 다소 연평균 강수량이 많다. 또한, 유역별 연평균 유출량과 유출계수는 Table 2와 같으며, 4대강 유역 월평균 유출량은 홍수기인 7~9월의 유출량이 전체 연 유출량의 약 3/4을 차지한다(MLTM, 2011).

3.1 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오 생산을 위해서는 온실가스 배출 시나리오를 초기조건으로 설정 후 GCM 모의를 실시한다. 이때, GCM의 공간적 모의범위는 전 지구 규모로써 수자원 연구를 위한 유역단위 규모로 부적합하기 때문에 실제 수자원평가 연구에서는 스케일상세화를 통해 시·공간적으로 규모를 축소하여 최종적으로 미래 영향평가를 위한 기후변화 시나리오를 생산하게 된다.

본 연구에서 활용한 기후변화 시나리오는 세종대학교 수자원연구소로부터 제공 받았으며, 세종대학교 연구팀은 IPCC AR4에서 제공하는 SRES 온실가스 배출 시나리오에 GCM 결과들을 토대로 CSEOF (Cyclostationary Empirical Orthogonal Function) 기법과 다중선형회귀 분석을 이용하여 공간적으로 스케일상세화 후 일기발생기(Weather Generator)인 WXGEN을 통해 시간적 스케일상세화를 수행하였다(Bae et al., 2007).

따라서 본 연구에서는 AR4 A2, A1B, B1 배출시나리오와 4개의 GCM(Table 3)의 모의결과에 따른 130년(1970~2099년) 기간의 일 단위 기후 시나리오를 적용하였다.

3.2 미래 유량변화 전망

수자원장기종합계획에서는 토양수분 저류구조를 가진 TANK 모형(Sugawara et al., 1961)을 국가계획을 위한 강우-유출 모형으로 사용하고 있다. 수자원장기종합계획('06)에서는 각 소유역의 38년간(1966~2003년) 일 강수량 자료를 수집한 후, 현재 운영되고 있는 댐 지점들과 일부 본류 하천 지점들의 유량 자료를 바탕으로 TANK 모형 매개변수의 보정과 검증을 수행하였으며, 따라서 본 연구에서도 TANK 모형을 통해 기후변화에 따른 한반도 4대강 유역의 미래 유량변화를 모의하였다.

그러나 GCM을 이용하여 모의되고 상세화된 결과들은 실제 관측값과 일정정도의 편이를 보이게 되며, 이러한 편이를 보정하기 위하여 가장 일반적으로 사용하는 방법이 Quantile Mapping이다. Quantile Mapping은 유량을 보정하는 방법으로 주로 사용되었으며(Snover et al., 2003; Hashino et al., 2007) 기후변화 연구에 관련해서는 VanRheenen et al. (2003), Fowler et al. (2007) 등이 GCM 자료의 보정을 위해서 사용한 바 있다. Quantile Mapping은 미래의 GCM 자료가 과거 GCM(hindcast)에서 어느 정도의 비초과확

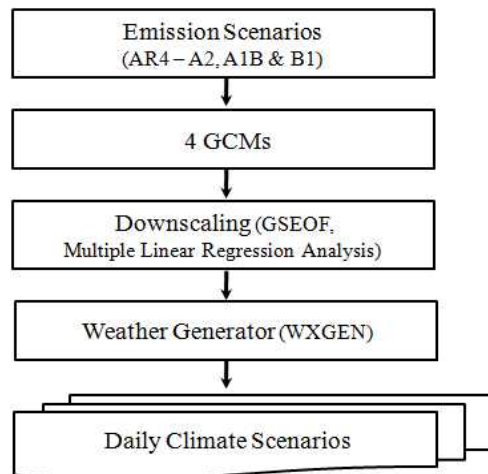


Fig. 2. Procedure for Generating Future Climate Scenarios

Table 2. Runoff Characteristics of Four Major River Basins (MLTM, 2011)

	Mean annual runoff (million m ³)	Runoff ratio (%)
Han River	174	59.0
Nakdong River	158	55.6
Geum River	78	61.9
Yeongsan & Seomjin Rivers	77	62.3

를 갖는지를 산정하고 동일한 비초과확률을 가지는 관측치를 통해 보정하는 방식이며(Wiley, 2004), 편이보정값은 아래의 Eq. (3)으로 산정하게 된다. 보다 자세한 사항은 Wiley (2004)의 연구에 상세하게 제시되어 있다.

$$Z_i = F_{oi}^{-1}(F_{si}(\hat{Y}_i)) \quad (3)$$

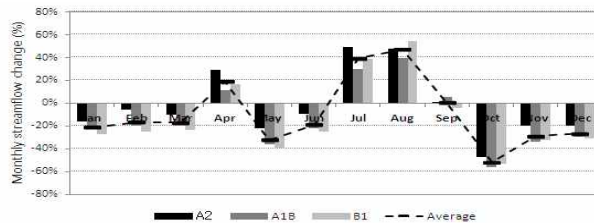
여기서, \hat{Y}_i 는 미래유량 추정값, Z_i 는 편이보정값 $F_{si}(\cdot)$ 와 $F_{oi}(\cdot)$ 는 각각 해당변수의 모의값과 관측값에 대한 경험적 CDF

미래 유량변화를 전망하기 위해 앞서 제시한 3개 배출 시나리오와 4개 GCM을 조합하여 생성한 기후변화 시나리오를 적용하여 1970~2099년 총 130년 기간의 유량을 모의

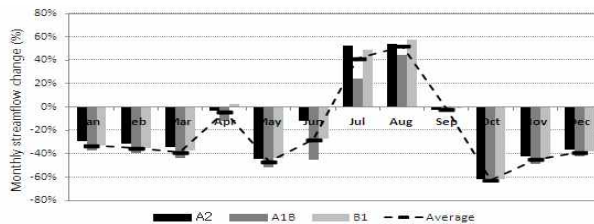
하였다. 일 단위로 상세화된 GCM 강수량 및 잠재증발산량 자료를 TANK 모형에 입력하여 일 단위 유량자료를 모의하였으며, 이를 Quantile Mapping을 통해 편이를 보정하여 미래 유량을 산정한 후 유량변화에 대한 분석을 실시하였다. 미래 전망구간을 세 개의 목표구간, 2020s (2010~2039년), 2050s (2040~2069년), 2080s (2070~2099년)으로 나누어 각 구간별 과거대비(1967~2003년) 월평균 유량 증감(%)을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3을 보면 배출 시나리오 별로 유량 증감 전망에는 다소 차이가 있지만 전체적으로 여름철(홍수기) 유량은 일정 수준 증가로 유지되는 반면 그 밖의 다른 계절들의 유량(비홍수기)은 과거대비 감소할 것으로 전망 되었으며 이러한 감소 추세는 2080s로 갈수록 심화되었다.

Table 3. GCMs Information

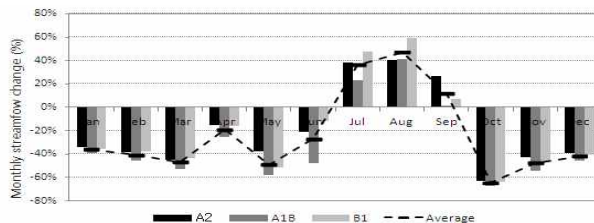
GCMs (agency: version)	Country	Resolution (km)	
		Atmosphere	Ocean
CNRM: CM3	France	128 × 64	182 × 152
CONS: ECHO-G	Germany/ Korea	96 × 48	128 × 117
CSIRO: MK3.0	Australia	192 × 96	192 × 189
UKMO: HadCM3	UK	192 × 144	360 × 216



(a) 2020s (2010-2039)



(b) 2050s (2040-2069)



(c) 2080s (2070-2099)

Fig. 3. Monthly Streamflow Change in the Korean Peninsula

3.3 미래 물수급 전망

중권역별 물수급 분석을 위해 수자원장기종합계획에서 이용한 K-WEAP 모형을 적용하였다. K-WEAP 모형은 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 한국건설기술연구원과 SEI-B(Stockholm Environment Institute-Boston Center)에서 공동개발한 한국형 수자원평가계획 모형으로 그 적용성이 선행연구들을 통하여 확인된바 있다(MLTM, 2009). K-WEAP에서는 수요처의 만족도와 수요자가 사용하는 특정 하천에서의 필요량을 극대화하기 위해 선형계획법(Linear Programming)이 사용되며 공급우선순위, 수요처 선호도, 물수지 및 기타 제약조건 등을 고려한다. K-WEAP 모형에 대한 보다 자세한 사항은 “K-WEAP 사용자 안내서”(KICT, 2005)를 참조하기 바란다.

본 연구에서 적용한 한반도 4대강 유역별 물수급 네트워크는 한국건설기술연구원으로부터 제공받은 수자원장기종합계획의 K-WEAP 네트워크를 기반으로 구축되었으며, Fig. 4는 이중 한강 유역 물수급 네트워크 사례이다.

3.3.1 가중값 부여 기준유량 선정

가중값 부여를 위한 K개의 최근린 샘플을 선정할 때는 미래 전망결과와 과거 시나리오의 비교기준이 될 기준유량이 필요하다. 기준유량을 결정하기 위해, 과거 37년의 연도별 물부족량과 연도별 유량값 사이의 순위상관관계를 분석하였으며, Spearman의 순위상관계수(Rank Correlation Coefficient)를 통해 물부족량의 순위와 가장 강한 상관관계를 갖는 기준유량을 결정하였다. 이를 위해 연 총유량, 비홍수기 유량(10~6월) 계절별 유량(4~6월) 등 다양한

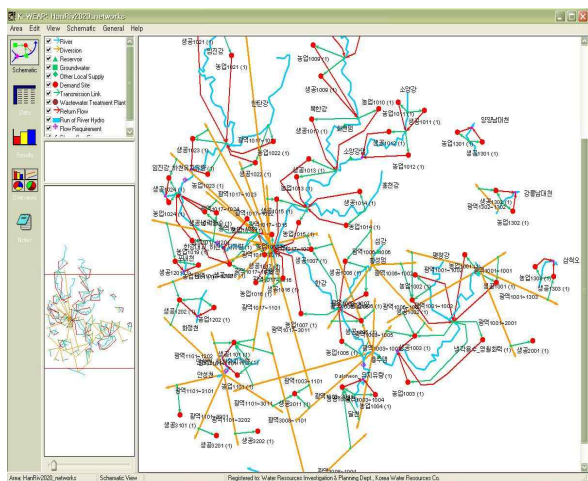


Fig. 4. Constructed Networks of the Han River Basin in K-WEAP

연 단위 유량을 조합한 후 순위상관계수를 산정하였다. 순위상관계수 r_s 는 아래 Eq. (4)와 같이 계산된다.

$$r_s = 1 - \frac{6 \times \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

여기서, d_i 는 두 계열 x_i 와 y_i 사이의 순위차, n 는 자료의 총 수

순위검정 결과 한강 유역의 경우 $r_s=0.6221$ 로 비홍수기(10~6월) 유량의 순위가 물부족량의 순위와 가장 강한 상관관계를 가지고 있음이 확인되었으며, 그 밖의 유역에서도 이와 동일한 검정결과를 보였다, 이는 비홍수기의 유량이 연 총유량 및 다른 구간의 유량보다 물부족량 산정 결과에 가장 많은 영향을 반영한다는 것을 보여주는 것이다. 따라서 가중값 산정 기준유량으로 비홍수기 유량을 선정하였다.

3.3.2 물부족량 전망

물수급 전망을 위해 설정된 2020s 구간은 2010~2039년(30년)의 미래 구간으로 정의되며, 앞서 제시한 분석 절차를 통해 해당 구간에 대한 미래 물부족량을 산정하였다. 물수급 분석을 위해서는 수자원 공급량과 수요량 등의 입력자료가 필요한데, 본 연구에서는 GCM 미래 기후 자료를 이용한 모의 유량값을 제외한 기타 인자들(댐 방류량, 회귀수량, 저수 유효용량 등)은 모두 수자원장기종합계획('06)과 동일하다고 가정하였다. 물수요 시나리오의 경우 역시 수자원장기종합계획('06)에서 제시한 2020년 기준수요 시나리오가 전체 구간에 동일하게 반영된다고 가정하였다. 2020s 구간에 대한 한반도 4대강 유역별 평균 물부족량을 Table 4에 나타내었다. 2020s의 경우 정량적으로는 영산·섬진강 유역에서 물부족량이 최대 219.9백만 m^3 /년으로 가장 많이 발생할 것으로 전망되었지만 과거 대비 증가율로는 금강 유역에서 최대 167%까지 증가하는 것으로 전망되어 물부족에 대한 취약성이 가장 크게 심화될 것으로 전망되었다.

3.3.3 기존 기후변화 연구와의 비교

실제로 향후 수문전망에 있어 기후변화의 영향을 고려해야함은 자명한 사실이지만 그 기후변화 시나리오의 불확실성으로 인해 전망결과를 전적으로 신뢰할 수는 없으며, 특히 미래 물부족량에 대한 전망결과를 실측자료와 같은 객관적인 자료와의 검증이 불가능하다. 따라서 기후변화 연구에 있어서는 여러 연구 방법론 중에서 어떤 방

Table 4. Average Water Shortage Projections in the Four Major River Basins: 2020

(a) Han River basin (unit: 10^6 m^3)

Water Vision 2020 (modified in 2006)	Emission scenarios	2020s (2010–2039)				
		GCMs				GCMs average
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	
41.98	A2 scenario	47.06	42.31	51.60	52.91	48.47
	Increase ratio ¹⁾ (%)	(+12%)	(+1%)	(+23%)	(+26%)	(+15%)
	A1B scenario	53.39	50.26	50.66	51.38	51.43
	Increase ratio (%)	(+27%)	(+20%)	(+21%)	(+22%)	(+23%)
	B1 scenario	63.22	39.92	60.25	54.43	54.45
	Increase ratio (%)	(+51%)	(-5%)	(+44%)	(+30%)	(+30%)

(b) Nakdong River basin (unit: 10^6 m^3)

Water Vision 2020 (modified in 2006)	Emission scenarios	2020s (2010–2039)				
		GCMs				GCMs average
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	
29.53	A2 scenario	40.68	30.17	38.49	45.05	38.59
	Increase ratio (%)	(+38%)	(+2%)	(+30%)	(+53%)	(+31%)
	A1B scenario	44.47	39.77	46.41	44.78	43.86
	Increase ratio (%)	(+51%)	(+35%)	(+57%)	(+52%)	(+49%)
	B1 scenario	54.65	32.73	54.09	46.15	46.90
	Increase ratio (%)	(+85%)	(+11%)	(+83%)	(+56%)	(+59%)

(c) Geum River basin (unit: 10^6 m^3)

Water Vision 2020 (modified in 2006)	Emission scenarios	2020s (2010–2039)				
		GCMs				GCMs average
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	
9.94	A2 scenario	22.07	14.83	23.97	23.77	21.16
	Increase ratio (%)	(+122%)	(+49%)	(+141%)	(+139%)	(+113%)
	A1B scenario	25.12	22.47	26.71	20.81	23.78
	Increase ratio (%)	(+153%)	(+126%)	(+169%)	(+109%)	(+139%)
	B1 scenario	35.07	14.02	31.34	25.54	26.49
	Increase ratio (%)	(+253%)	(+41%)	(+215%)	(+157%)	(+167%)

(d) Yeongsan/Seomjin Rivers basin (unit: 10^6 m^3)

Water Vision 2020 (modified in 2006)	Emission scenarios	2020s (2010–2039)				
		GCMs				GCMs average
		CNRM	CSIRO	CONS	UKMO	
181.33	A2 scenario	171.47	150.44	181.08	223.93	181.73
	Increase ratio (%)	(+5%)	(-17%)	-	(+24%)	-
	A1B scenario	213.05	185.94	222.79	217.15	209.74
	Increase ratio (%)	(+18%)	(+3%)	(+23%)	(+20%)	(+16%)
	B1 scenario	274.47	142.76	242.92	219.57	219.93
	Increase ratio (%)	(+51%)	(-21%)	(+34%)	(+21%)	(+21%)

¹⁾Increase ratio (%): change ratio from the results in Water Vision 2020 (MOCT, 2006) excluding climate change impacts

법론의 전망결과가 좀 더 신뢰성 있는지에 대한 판단이 매우 중요한 쟁점이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 미래 GCM 유량 시나리오를 물수급 모형에 직접 입력하는 기존의 기후변화 방법론에 따라 동일한 목표구간에 대한 물부족량을 산정하고 본 연구 결과와 비교하였다.

기존의 기후변화 방법론과의 비교를 위해 한강 유역을 대상으로 대표적으로 A2 배출 시나리오를 적용한 미래 유량 시나리오를 K-WEAP에 직접 입력하여 산정한 물부족량 결과와의 비교를 Table 5에 나타내었다. 즉, 강우-유출 모형, GCM 모형 등 모든 연구 절차를 동일하게 한 후 연구 방법론만의 비교를 수행한 것이다.

Table 5를 보면, GCM에 기반을 둔 모의 유량을 직접 물수급 모형에 입력하는 기존 방법론의 결과가 본 연구에서 제안한 방법보다 훨씬 큰 물부족량의 증가를 전망하였다. 이것은 과거 유량자료를 입력하던 기존의 국가 수자원 계획의 방법론에서 입력자료를 완전히 교체하는 방법론으로의 급격한 변화에 따른 결과라 볼 수 있다. GCM 시나리오에는 GCM 모형자체의 불확실성은 물론 시공간적 스케일상세화 과정을 거치면서 발생하는 불확실성이 포함된다. 때문에 중권역별 반순단위의 유량자료를 직접 입력하여 모의하는 과정에서 그 GCM 자료의 불확실성이 물부족량 모의 결과에 그대로 반영되어 전망결과에 큰 변화를 야기할 수 있는 것이다. 따라서 현재의 기술 수준에서 시공간적으로 상세화된 GCM 시나리오를 직접 입력하여 수자원 시스템 모의를 하는 것은 아직 신뢰할 수 있는 단계라고 말하기 어렵다고 판단하였다.

3.3.4 미래 전망구간별 한반도 물부족량 전망결과

2020s, 2050s, 2080s 총 세 개의 목표 전망구간에 따라 한반도 미래 평균 물부족량을 산정하였으며 Table 6에 나타

냈다. 모든 전망구간에 있어 물수요 시나리오는 2020년 기준수요가 일정하게 유지된다고 가정하였다. 전망 결과, 향후 기후변화의 영향을 고려한 한반도 물부족량은 과거에 비해 점차 증가할 것이며 21세기 후반으로 갈수록 물부족량 증가가 더욱 심화될 것이라는 결과를 보여주었다. 이는 앞서 한반도 4대강 유역의 비홍수기 유량이 미래로 갈수록 점차 감소할 것이라는 전망결과와 일치하였다.

3.3.5 4대강 사업을 반영한 전망결과 비교

본 연구가 진행되는 동안 2008년 착수한 4대강살리기 사업이 완료되었다. 이에 4대강살리기 사업으로 인해 신규 건설된 16개 보의 영향에 따른 미래 물수급 전망결과와의 차이를 비교, 검토해보고자 했다. 그러나 자료 확보의 한계 등으로 인해 수자원장기종합계획('11 보완계획) 수립시 모의된 4대강 중권역별 TANK 모형 기반 과거 유출량(1967~2007년, 41개년)과 신규로 건설된 보를 반영하여 구축된 K-WEAP 네트워크를 적용한 2020년 목표연도에 대한 물부족량 전망값을 활용하였다. 수자원장기종합계획('11 보완계획)에서는 기존의 과거 유출 시나리오가 4개년(2004~2007년) 추가되었고 이와 더불어 신규로 건설된 보에 따른 저수용량이 추가되어 물수급 분석이 실시되었다(Table 7).

수자원장기종합계획('11 보완계획)을 바탕으로 대표적인 A2 배출 시나리오에 기반한 GCM 유량변화 시나리오를 이용하여 기후변화를 고려한 물수급 전망기법을 적용하였으며, 4대강 사업을 반영한 2020s의 평균 물부족 전망결과를 Table 8에 나타냈다. 본 연구에서 제시한 방법론을 이용하여 4대강살리기 사업을 반영한 물수급 모의를 바탕으로 한반도 미래 물부족을 전망할 시에 동일한 방법론에 대한 기존 전망결과에 비해 약 53.6% 감소된 전망을 보였다.

Table 5. Comparison of Average Water Shortage Projection in the Han River

(unit: 10⁶ m³)

Water Vision 2020 (modified 2006)	Average water shortage projection for 2020s		
	GCMs (agency: version)	This research ¹⁾	Existing method ²⁾
41.9	CNRM: CM3	47.1	17.4
	CONS: ECHO-G	51.6	192.2
	CSIRO: MK3.0	42.3	63.5
	UKMO: HadCM3	52.9	137.6
	GCMs average	48.5	102.7
	Increase ratio ³⁾	+15%	+144%

¹⁾Average water shortage projected by the proposed methodology in this research

²⁾Average water shortage estimated by the existing method which inputs GCM-driven flow scenarios into a water balance model directly

³⁾Change ratio (%) from the results in Water Vision 2020 (MOCT, 2006)

Table 6. Average Water Shortage Projections in the Korean Peninsula

(a) 2020s (2010–2039)

(unit: 10⁶ m³)

Emission scenarios (AR4)	Average water shortage projections (GCMs average)				
	Han River	Nakdong River	Geum River	Yeongsan/Seomjin Rivers	Korean Peninsula
A2 scenario	48.5	38.6	21.2	181.7	290.0
(increase ratio) ¹⁾	(+15%)	(+31%)	(+113%)	-	(+10%)
A1B scenario	51.4	43.9	23.8	209.7	328.8
(increase ratio)	(+23%)	(+49%)	(+139%)	(+16 %)	(+25%)
B1 scenario	54.5	46.9	26.5	219.9	347.8
(increase ratio)	(+30%)	(+59%)	(+167%)	(+21 %)	(+32%)

(b) 2050s (2040–2069)

(unit: 10⁶ m³)

Emission scenarios (AR4)	Average water shortage projections (GCMs average)				
	Han River	Nakdong River	Geum River	Yeongsan/Seomjin Rivers	Korean Peninsula
A2 scenario	59.0	50.6	30.0	236.9	376.5
(increase ratio)	(+41%)	(+72%)	(+202%)	(+32%)	(+48%)
A1B scenario	68.5	63.6	38.5	320.7	491.3
(increase ratio)	(+63%)	(+92%)	(+288%)	(+77%)	(+87%)
B1 scenario	63.7	53.3	31.9	240.2	389.1
(increase ratio)	(+52%)	(+84%)	(+222%)	(+33%)	(+48%)

(c) 2080s (2070–2099)

(unit: 10⁶ m³)

Emission scenarios (AR4)	Average water shortage projections (GCMs average)				
	Han River	Nakdong River	Geum River	Yeongsan/Seomjin Rivers	Korean Peninsula
A2 scenario	65.9	55.9	34.5	266.9	423.2
(increase ratio)	(+57%)	(+89%)	(+247%)	(+47%)	(+61%)
A1B scenario	73.8	67.6	41.6	333.4	516.4
(increase ratio)	(+76%)	(+101%)	(+319%)	(+84%)	(+97%)
B1 scenario	68.2	54.6	34.9	252.6	410.3
(increase ratio)	(+64%)	(+85%)	(+252%)	(+39%)	(+56%)

¹⁾Increase ratio (%): change ratio from the results in Water Vision 2020 (MOCT, 2006) excluding climate change impacts

Table 7. Newly Constructed Weirs by the Four Major Rivers Restoration Project

	Weirs	Remarks
Han River	Ipo weir, Yeosu weir, Gangcheon weir	Newly constructed 3 weirs
Nakdong River	Sangju weir, Nakdan weir, Gumi weir, Chilgok weir, Gangjeong–Goryeong weir, Dalseong weir, Hapcheon–Changnyeong weir, Changnyeong–Haman weir	Newly constructed 8 weirs
Geum River	Baekje weir, Gongju weir, Sejong weir	Newly constructed 3 weirs
Yeongsan River	Seungchon weir, Juksan weir	Newly constructed 2 weirs

수자원장기종합계획('06)과 2011년 보완계획에서 제시하는 과거 이수기 유량의 변동은 약 1.6%로 그 변화율이 미비하였으나, 이를 K-WEAP 모형에 입력하여 목표연도 2020년에 대한 물부족량 전망값은 기존 4대강사업을 미반

영한 결과와 비교했을 때 약 49%가 감소한 134.4백만 m³/년이었다. 본 연구의 핵심은 GCM 모의 미래 유량 시나리오와 과거 유량 시나리오를 비교하여, 최근린 시나리오를 추출한 후 이에 대응하는 물부족량에 대한 각기 다른 가중

Table 8. Comparison of Results Reflecting the Four Major Rivers Restoration Project (unit: 10⁶ m³)

	Average water shortage projection for 2020s			
	Before Four Rivers Project		After Four Rivers Project (including newly constructed weirs)	
	Water Vision 2020 (modified in 2006)	This research	Water Vision 2020 (modified in 2011)	This research
Han River	41.9	48.5	7.9	10.3
Nakdong River	29.5	38.6	12.5	18.5
Geum River	9.9	21.2	3.2	6.2
Yeongsan/Seomjin Rivers	181.3	181.7	96.9	99.4
Korean Peninsula	262.8 ¹⁾	289.9 ²⁾	120.6 ³⁾	134.4 ⁴⁾
Increase ratio ⁵⁾		+10% ⁵⁾		-49% ⁵⁾

¹⁾Water Vision 2020 (MOCT, 2006) excluding both of climate change and the Four Rivers Project impacts

²⁾Results projected by the proposed methodology excluding the Four Rivers Project

³⁾Water Vision 2020 (MLTM, 2011) excluding climate change impacts, but reflecting the Four Rivers Project

⁴⁾Results projected by the proposed methodology considering the Four Rivers Project (narrowly)

⁵⁾Change ratio (%) from the results in Water Vision 2020 (MOCT, 2006)

Table 9. Change in Projected Variables over Historical Data: 2050s Based on A2 Scenario (unit: %)

Variables	Han River	Nakdong River	Geum River	Yeongsan/Seomjin Rivers	Korean Peninsula
Precipitation ¹⁾ (non-flood period)	-2.6	-4.0	-6.4	-0.8	-3.3
Streamflow ¹⁾ (non-flood period)	-33.4	-33.0	-37.2	-29.7	-32.7
Average water shortage ²⁾	+40.6	+71.6	+201.9	+31.8	+48.1

¹⁾Change ratio (%) from the current (1967~2003)

²⁾Change ratio (%) from the results in Water Vision 2020 (MOCT, 2006)

값을 부여하는 것이다. 이에, 수자원장기종합계획('11 보완 계획)에서 제시한 K-WEAP 모의 물부족량 전망값의 경우 물수급 네트워크 구축시 신규 건설된 보가 추가되고 이로 인한 저수량 확보가 미래 물공급량의 증가로 작용함으로써 기존의 보 설치 이전의 물부족량 전망결과에 비교하여 매우 과소 전망된 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 기존의 기후변화에 따른 물수급 분석 방법론의 문제점을 개선하고 기후변화의 영향을 고려할 수 있는 새로운 물수급 전망기법을 제안하고 이를 한반도 4 대강 유역에 적용하여 미래 한반도 평균 물부족량을 제시하였다. 기존 방법론의 한계점을 극복하기 위해 GCM을 통해 모의한 미래 유량 시나리오를 물수급 모형에 직접 입력하지 않고 과거 유량 시나리오의 가중값(재현확률)을

부여하는데 반영하였다. 이는 국가수자원계획의 근간인 수자원장기종합계획의 물수급 분석 방법론의 틀을 최대한 유지하면서 기후변화의 영향을 반영하는 분석기법이 될 수 있었다. 입력자료(과거 유량 시나리오)에 대한 가중값 산정을 위해 K-m 알고리즘을 적용하였으며 순위상관계수 분석을 통해 비홍수기 유량을 가중값 산정을 위한 기준 유량으로 결정하였다. 기후변화의 불확실성을 고려하기 위해서 GCM 미래 기후자료를 TANK 모형에 입력하여 권역별 미래 유량을 모의하였으며 모의유량에 대한 편이보정을 위해 Quantile Mapping 기법을 적용하였다. 그리고 미래 유량 전망결과를 반영하여 입력자료에 대한 가중값을 새롭게 산정함으로써 미래 목표 전망구간에 대한 물부족량을 산정할 수 있었다. 한강 유역을 대상으로 GCM 모의 유량자료를 직접 K-WEAP에 입력하는 기존 기후변화 연구 방법론이 모의결과의 갑작스러운 큰 변화를 가져온 반면, 본 연구 방법론의 모의결과는 기후변화의 영향을 비교

적 보수적으로 반영하는 전망결과를 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 기법에 따른 한반도 물수급 전망 결과 기후변화에 따른 4대강 유역의 미래 물부족량은 과거에 비해 점차 증가할 것으로 전망되었다. 2020s 전망구간에 대한 한반도 평균 물부족량은 최대 348백만 m^3 /년으로 과거 유량 시나리오를 이용한 전망결과에 비교하여 약 32%로 증가를 보였으며, 이는 GCM을 이용하여 기후변화를 고려한 미래 강수량과 유량 변동 분석결과 한반도 4대강 유역은 미래로 갈수록 비홍수기 유량이 점차 감소할 것으로 전망된 것과 일치함을 보였다. 21세기 후반으로 갈수록 비홍수기 유량이 감소할 것으로 전망됨에 따라 물부족량 역시 2080s으로 갈수록 더욱 증가하여 한반도 평균 물부족량은 최대 516백만 m^3 /년에 달할 것으로 전망되었다. 대표적으로 2050s 전망구간에서 A2 배출시나리오에 기반한 비홍수기 강우, 비홍수기 유량, 평균 연물부족량 전망값의 과거대비 증감폭을 Table 9에 정리하였다. Table 9와 같이 2050s 4대강 유역을 대상으로 과거대비 비홍수기 강수량과 유량은 각각 3.3%와 32.7% 감소될 것으로 전망되었으며, 궁극적으로 물부족량은 과거대비 약 48% 증가할 것으로 나타났다.

실제로 미래 물수급전망의 결과의 모의 정확도를 판단하는 것은 실측자료의 부재로 인해 불가능하기 때문에 어느 전망결과가 더 우수하다는 판단을 내리기 어려운 것은 사실이지만, 기존의 기후변화 연구 방법론이 전망결과에 너무나도 큰 변화를 가져온 점은 물론 본 연구에서 제안한 기법이 기존 국가계획 방법론의 틀을 최대한 유지하고 있다는 점에서 본 연구의 방법론이 국가수자원계획 수립에 있어 정책결정권자들의 혼돈을 줄여줄 수 있는 전망결과를 제시할 수 있다고 판단된다.

물수급 분석 및 전망에 있어 물공급 시나리오 분석 외에 물수요 시나리오 예측 역시 중요한 요소이다. 본 연구에서는 수자원장기종합계획에서 제시하고 있는 2020년 기준수요 시나리오를 기준으로 해당 물수요가 미래 전망구간에 동일하게 지속된다는 가정하에 분석을 실시하였다. 장래 물수급 전망과 물부족 산정에 있어 기후변화에 따른 수자원 공급가능량 분석만큼 물수요 변동 역시 매우 중요하므로 향후 미래 시점 변동에 따른 보다 객관적이고 정확한 물수요 시나리오 예측이 개선된다면 미래 물부족량 전망결과와 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 건설

기술혁신사업 “기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망 (09-기술혁신C01)” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 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. (In Korean with English abstract)
- Christensen, N.S., Wood, A.W., Voison, N., Lettenmaier, D.P., and Palmer, R.N. (2004). “The Effect of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin.” *Climatic Change*, Vol. 62, pp. 337-363.
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G., and Stunell, J. (2007). “Modeling the Impacts of Projected Future Climate Change on Water Resources in North-West England.” *Hydrology & Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 1115-1126.
- Groves, D.G., Yates, D., and Tebaldi, C. (2008). “Developing and Applying Uncertain Global Climate Change Projections for Regional Water Management Planning.” *Water Resources Research*, Vol. 44, Issue 12, W12413.
- Hashino, T., Bradley, A.A., and Schwartz, S. (2007). “Evaluation of Bias-Correction Methods for Ensemble Streamflow Volume Forecasts.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 2, pp. 939-950.
- Hoff, H., Swartz, C., Yates, D., and Tielborger, K. (2007). “Water Management under Extreme Water Scarcity: Scenario Analysis for the Jordan River Basin, Using WEAP21.” *Water Saving in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs*, Vol. 2, pp. 321-331.
- Islam, M.D.S., Aramaki, T., and Hanaki, K. (2005). “Development and Application of an Integrated Water Balance Model to Study the Sensitivity of the Tokyo Metropolitan Area Water Availability Scenario to Climate Changes.” *Water Resources Management*, Vol. 19, pp. 423-445.
- Kang, D.H. (2007). *An Impact Assessment of Climate Change on Water Resources for the Geum River Basin*. Master thesis, Seoul National University, Korea.
- KICT (2005). K-WEAP User Guideline. (In Korean)

- Kim, S.J., Kim, B.S., Jun, W.D., and Kim, H.S. (2010). "The Evaluation of Climate Change Impacts on the Water Scarcity of the Han River Basin in South Korea Using High Resolution RCM Data." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 3, pp. 295-308. (In Korean with English abstract)
- Kirono, D., Podger, G., Franklin, W., and Siebert, R. (2007). "Climate Change Impact on ROUS Water Supply." *Water : Journal of the Australian Water Association*, March 2007, pp. 68-72.
- Lall, U., and Sharma, A. (1996). "A Nearest Neighbor Bootstrap for Resampling Hydrologic Time Series." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 679-693.
- MLTM (2009). National Water Resources Security Against Climate Change. (In Korean)
- MLTM (2011). Water Vision 2020: 2011-2020. (In Korean)
- MOCT (2006). Water Vision 2020: 2006-2020. (In Korean).
- 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*, Vol. 87, pp. 109-122.
- Seo, Y.W., Lee, S.H., Kim, Y.O., and Lee, D.R. (2000). "Climate Change Assessment for Reservoir Operations of Dae-Chung Dam." *Proceedings 2000 KSCE Annual Conference, Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 3, pp. 427-430. (In Korean)
- Sharif, M., and Burn, D.H. (2006). "Simulating Climate Change Scenarios using an Improved K-Nearest Neighbor Model." *Journal of Hydrology*, Vol. 325, pp. 179-196.
- Snover, A.K., Hamlet, A.F., and Lettenmaier, D.P. (2003). "Climate Change Scenarios for Water Planning Studies: Pilot Applications in the Pacific Northwest." *BAMS*, Vol. 84, Issue 11, pp. 1513-1518.
- VanRheenen, N.T., Palmer, R.N., and Hahn, M.A. (2003). "Evaluating Potential Climate Change Impacts on Water Resource Systems Operations: Case Studies of Portland, Oregon and the Central Valley, California." *Water Resources*, Vol. 124, pp. 35-50.
- Vicuna, S., Maurer, E.P., Joyce, B., Dracup, J.A., and Purkey, D. (2007). "The Sensitivity of California Water Resources to Climate Change Scenarios." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 482-498.
- Wiley, M.W. (2004). *Analysis Techniques to Incorporate Climate Change Information into Seattle's Long Range Water Supply Planning*. Dissertation, University of Washington.
- Yates, D. (2003). "A Technique for Generating Regional Climate Scenarios using a Nearest-Neighbor Algorithm." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 7, 1199.

논문번호: 12-129	접수: 2012.12.31
수정일자: 2013.05.10	심사완료: 2013.05.10