

다중복합 물수지 모델 개발 및 활용성 평가

Development and Utility Evaluation of a Multi-Composite Water Balance Model

권용현* · 손경환** · 이경도*** · 최계운****

Gwon, Yonghyeon*, Son, Kyunghwan**, Lee, Kyoungdo***, and Choi, Gyewoon****

Abstract

This study aimed to develop a water balance model capable of daily analysis of the water supply situation in a multi-composite area, evaluate the utility of the model, and conduct a water balance analysis. The multi-composite water balance model, which was developed to determine the daily water balance in an area, includes five modules: "Weather data build and area mean data," "Rainfall-runoff analysis," "Benefit area and demand estimation," "Reservoir water balance analysis," and "River basin water balance analysis." The study selected eight cities in northwestern Chungcheongnam-do in Korea as target areas and evaluated the utility of the water balance model. Further, the study used observation and model simulation data for its analysis, which found a high degree of accuracy as well as correlation. In addition, daily water balance analysis was conducted to estimate the potential supply, demand, supply, shortage, surplus supply, and shortage days in the river basin, while the ratio of shortage to demand was also determined to identify areas vulnerable to drought. In the future, it will be possible to establish drought countermeasures and facility operation plans by identifying areas with water supply vulnerability using the developed model.

Key words : Multi-composite Area, Water Balance Model, Utility Evaluation, Water Supply Vulnerable Areas, Water Shortage

요 지

본 연구는 다중복합지역에서의 물공급 현황을 고려한 일단위의 체계적인 분석이 가능한 물수지 모델을 개발하고, 모델의 활용성 평가 및 물수지 분석을 진행하는데 목적이 있다. 다중복합 물수지 모델은 기상자료 구축 및 유역평균값 산정, 강우-유출 분석, 수혜면적 및 수요량 추정, 저수지 물수지 분석, 하천유역 물수지 분석의 5개 모듈을 활용하여 일단위 물수지를 파악할 수 있도록 개발하였다. 개발된 모델은 충남 서북부 8개 시·군을 대상지역으로 선정하여 물수지 모델의 활용성 평가 및 분석을 진행하였다. 관측자료와 모델분석결과를 활용하여 정확도를 평가한 결과, 대부분 정확도가 좋게 산정되어 활용성이 높은 것으로 확인되었다. 또한, 일단위 물수지 분석을 진행하여 하천유역의 잠재공급량, 공급량, 부족량, 잉여공급량과 부족일수를 분석하고, 수요량 대비 부족량 비율을 검토하여 가뭄 취약지역을 파악하였다. 향후 개발된 모델을 활용하여 물공급 취약지역을 조기에 파악하여 가뭄 대책 및 시설물 운영 방안 수립이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 다중복합지역, 물수지 모델, 활용성 평가, 물공급 취약지역, 물부족

*정회원, 주식회사 헥코리아 연구개발사업부 차장, 공학박사(E-mail: hyun9206@hecorea.co.kr)

Member, Ph.D., Deputy Manager, R&D Department, HECOREA. INC.

**교신저자, 정회원, 환경부 한강홍수통제소 수자원정보센터 시설연구사(Tel: +82-2-590-9976, Fax: +82-2-590-9976, E-mail: hydroskh@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D., Research Engineer, Water Resources Information Center, Han River Flood Control Office, Ministry of Environment

***정회원, 주식회사 헥코리아 대표이사(E-mail: kdlee@hecorea.co.kr)

Member, CEO, HECOREA. INC.

****정회원, 인천대학교 건설환경공학과 명예교수(E-mail: gyewoon@inu.ac.kr)

Member, Emeritus Professor, Department of Civil and Environmental, Incheon National University

1. 서론

가뭄은 장기간에 걸친 강수량 부족에 따른 물 부족 현상이며, 홍수와 달리 광역적이고 점진적으로 발생하는 특성이 있다. 이로 인해 가뭄이 발생하여도 물 부족을 겪지 않는 이상 이를 체감하지 못할 뿐이지 가뭄은 시대와 상황에 따라 항상 발생해 왔으며, 현재 그리고 앞으로도 우리를 괴롭히는 자연재해 중 하나다. 그러나 수자원 개발의 한계와 양질의 물 수요 증가는 우리 사회의 수자원 시스템이 가지고 있는 물 관리 능력을 더욱 취약하게 하고 있다(Lee et al., 2006). 또한, 최근 기후변화로 인한 수자원의 변동성 증가는 유역 물수급 체계의 불균형을 야기하여 안정적인 물 공급을 위한 대책 수립에 많은 어려움을 가중시키고 있다.

통상 우리나라의 가뭄은 길게는 5~7년, 짧게는 2~3년 주기로 발생한다고 알려져 있다(Bae et al., 2013). 그러나 2008년 이후로 거의 매년 가뭄이 발생하였으며, 특히 2014년 여름철 마른장마로 시작된 가뭄은 2017년까지 이어져 경제적 손실로 인한 막대한 피해를 야기하였다. 보령댐의 수위는 심각단계 이하로 낮아져 충청남도 8개 시·군에는 제한급수 13개소, 운반급수 79개소의 생활용수 피해가 발생하였고, 농업용저수지 고갈에 따른 농업용수 피해복구비가 약 24억 원이 지출되는 등 피해가 발생하였다(Chungnam and ME, 2019). 문제는 이러한 가뭄 피해에도 불구하고 지역 물 이용 현황을 상시 분석할 수 있는 기술이 미흡하여 앞으로 발생할 가뭄에 효과적으로 대처하기가 어려운 실정이다.

가뭄에 따른 물 부족 상황을 바로 인지하고 대응하기 위해서는 유역의 물수급 상황을 실시간으로 분석할 수 있는 기술이 필요하다. 물수급 상황은 주로 물수지 해석을 통해 정량적으로 분석되며, 주로 강우-유출해석, 하천시설물 운영 및 수요·공급 간에 물 이동 해석 모듈이 탑재된 물수지 모델이 활용된다. 국내 대표적인 물수지 모델 활용 사례로는 MOCT (2006)에서 수행한 수자원장기종합계획이 있으며, 물수지 모델인 K-WEAP을 통해 미래 물 수요량의 변화를 고려하여 전국 물 부족량을 평가하였다. 다만, 공간적 해석범위를 중권역 단위로 설정함에 따라 동일 중권역 내에서도 유역별 상세한 물 부족 상황을 분석할 수 없으며, 농업용저수지와 같은 하천시설물에 대한 운영이 고려되지 않아 실시간으로 하천과 시설물 사이의 물 수요·공급 변화를 감지하지 못하는 한계가 있다. 실시간 해석을 고려한 물수지 모델의 핵심은 자연유량 산정부터 물수급 해석까지 모든 모듈이 상호 연동되어 운영되어야 한다. 또한, 계산의 기본 공간 단위는 표준유역 규모 이하의 상세화된 하천유역 이고, 시간 단위는 최소 일단위 체계로 계산되어야 한다.

그동안 국외에서는 물수지 모델 개발과 적용에 있어 다양한 연구를 수행해 왔다. Alfarrá (2004)는 케냐의 Naivasha강 유역에 대한 5가지 수요시나리오를 구축하고 WEAP 모델을 이용하여 물수지 분석을 진행하여 시나리오별 물부족량을

평가하여 물수급 대안을 제시하였다. Minville et al. (2010)은 ResSim을 개발하고 10개의 기후변화 시나리오를 활용하여 저수지의 물공급 신뢰도와 취약도를 산정하였다. Vano et al. (2010)은 야키마강 유역을 RiverWare 모델을 활용하여 물수지 분석을 진행하고 물공급 신뢰도를 확률 구간별로 표현하였다. Sandoval-Solis and McKinney (2012)는 미국의 Big Bend 지역의 물수급 평가를 WEAP 모델을 이용하여 수요량 변화에 대해 분석하였다. 국내 연구로는 Cho (2003)는 WASMOD 모델의 매개변수와 유역의 지형학적 인자인 토지이용과의 상관관계를 분석하여 미계측 유역의 적용 방법을 모색하였다. Noh et al. (2010)은 전국 464개의 용수구역을 이용하여 수계별, 권역별 물수지를 분석할 수 있는 10가지 하천망을 고려한 표준화 물수지 모델을 개발하고 측정유량 자료와 비교하여 검증하였다. Kim (2011)은 장기 유출모델인 SWAT 모델의 결과를 K-WEAP 모델에 적용하여 남한강 유역의 미래 목표기간별 물부족량을 산정하였다. CNI (2015)는 충남지역의 농업용수 수요량과 공급량 등 물수지를 분석하여 가뭄대응을 위한 지역단위 목표 농업용수 확보량을 구체적으로 제시하고 농업용수 부족지역에 대한 용수 확보방안을 모색하였다. Gwon (2019)은 일단위 물수지 분석이 가능한 저수지-하천 연계 물수지 모델을 개발하고, 모델 구현을 위해 충남 8개지역을 대상으로 가뭄전망 시스템을 개발하여 적용하였다. Oh et al. (2019)은 한강권역을 대상으로 유역 공간단위 상세화에 따른 물수지 해석결과를 비교·분석하였으며, 중권역에서 표준유역 단위로 상세화 할 경우 물 부족량에 차이가 발생함을 제시한바 있다. 기존 연구에서는 여러 물수지 모델을 개발 및 활용해 왔으나 실시간 운영을 목적으로 하천과 저수지 연계해석 모듈을 구축한 사례는 부족하였고, 이를 고려한 시공간적으로 상세화된 물수급 해석 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 공간적 해석범위를 표준유역 이하로 상세화된 다중 유역 단위를 기반으로 저수지 및 하천 유량에 물 상황을 복합적으로 해석하는 다중복합 물수지 모델을 개발하고 활용성을 평가하고자 한다. 본 연구의 2장에서는 다중복합 물수지 모델에 대한 기본 이론 및 활용성 평가 방법을 설명하고, 3장에는 기초자료 수집 및 구축, 4장에서는 활용성 평가 및 모델 해석 결과를 제시하였다. 5장에서는 본 연구에서 개발한 주요 결과를 요약 기술하였다.

2. 모델 이론 및 평가방법

효율적인 물수지 분석을 위해서는 대상 지역에 대한 유출 해석, 하천시설물 운영 및 수요·공급량 파악 등 방대한 자료와 유역내 물 변화량을 현실에 가깝게 정량적으로 계산할 수 있는 모델이 요구된다. 무엇보다도 시설물 특성을 충분히 반영하고 시공간적으로 상세한 물수급 정보가 생산될 수 있는 모듈 구성 필요하다. 특히, 가뭄은 매우 복잡한

자연적인 현상임과 동시에 수자원 공급 시스템이 잘 갖추어진 지역과 그렇지 못한 지역 사이에 가뭄에 대한 취약성이 현저하게 다르며 가뭄에 의해 피해가 발생 되는 상황도 지역별로 매우 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 물수지 분석의 공간 단위를 수자원단위지도의 표준권역을 기초로 지형적 특성을 고려하여 다중 유역단위로 세분화하였다.

유역 내에는 수리권 배분을 위해 댐, 저수지 및 취수장 등 여러 하천시설물이 위치하며, 하천과 복합 연계되어 물순환이 이뤄진다. Fig. 1은 복합 물수지 해석에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 저수지 모의시 저수지 공급량은 초기저수량과 저수지 상류의 유입량(Inflow)이며, 저수지의 증발량(Aet)과 침투량(Inf)을 제외하고 저수지 수혜지역에 용수수요량을 공급하는 것으로 저수지 물 수급 평가를 모의한다. 저수지 모의운전을 통해 유효저수량 범위에서 수혜지역에 농업용수를 공급(Spl1)한 후 저수량이 유효저수량 이상이 되면 자연 율류량(Outflow)으로 공급되도록 계산된다. 하천에서는 직상류 유량(uQ), 저수지 율류량(Outflow), 자기유역의 자연 유량(nQ), 농업용수 회귀수량(R1) 및 생활·공업용수 회귀수량(R2)을 공급받게 된다. 하천수를 취수를 통한 농업(Spl2), 생활 및 공업용수(Spl3, Spl4)의 경우 하천에서 일평균 취수량이 제외되도록 구성하였다. 댐 및 지하수 등 외부수원에서 공급받는 생·공업용수(Spl5, Spl6)의 경우 물수지 분석에서 제외한 대신 하수처리장의 방류량을 활용하였으며, 지하수를 통해 공급받는 농업용수의 회귀량(R1)은 하천 유역에 공급되는 것으로 설정하였다.

2.1 강우-유출 모형

자연유출량은 강우로 인해 발생하는 유출량을 산정하는 방법으로 다양한 수학적 함수 및 매개변수를 통해 유출이 되기까지 변환하는 과정을 주로 강우-유출 모형을 통해 계산한다. 본 연구에서는 모형개선이 용이하며 장기유출이 가능하고 유역의 강우와 증발산을 고려할 수 있는 TANK 모형을 이용하였다. 또한, 수자원장기종합계획에서와 같이 모형을

4단 TANK로 구성하여 하천유역별 자연유출량을 산정하고 저수지 및 하천유역 물수지 모델에 적용하였다.

자연유출량을 산정하기 위해 하천유역별 강우량과 잠재증발산량, 유역면적, 매개변수가 입력자료로 구축되어야 하며, 강우는 최상단에 위치한 탱크에 유입되고 2단 탱크 이하의 탱크는 상단의 탱크 바닥면 침투공을 통해 물이 유입된다. 각 탱크의 저류수중 일부는 측면의 유출공을 통해 외부로 유출되며 일부는 바닥면의 침투공에서 하단의 탱크로 유입된다. 유역의 지표면에 내린 강우는 지표면의 지형특성에 따라 저류, 침투, 증발산 등 초기 손실이 발생하고 지표면 유출이 발생한다. 유역의 하천 유출량은 각 단의 탱크에서 발생하는 유출량의 합으로 계산된다. 증발산은 최상단 탱크에서 물이 증발하며 해당 탱크의 저류고가 증발산량보다 작으면 하단에 위치한 2단 또는 3단 탱크에서 물이 증발된다.

TANK 모형을 활용한 유출량을 적절히 산정하려면 매개변수들의 합리적인 추정치가 필요하며, 본 연구에서는 TANK 모형의 매개변수는 수자원장기종합계획(MLTM, 2011)에서 적용한 중권역별 최적 매개변수 활용하였다.

2.2 저수지 및 하천 물수지 해석

본 연구에서는 저수지 모의 방법으로 deficit supply 방식을 적용하였다. 이 방식은 저수지 하류 유역에서 필요로 하는 물 수요를 우선적으로 고려하는 운영 방법으로 하천의 자연 유량으로는 물 수요를 공급할 수 없을 경우 발생하는 물 부족량만큼을 저수지에서 추가 방류하여 운영하는 방식이다. Deficit supply 방식의 특징은 저수지별로 공급 할 수 있는 여력이 있는 한 지속적으로 물 공급이 이루어지는 것으로 하류의 물 부족을 고려하여 저수지에서 공급할 수 있는 물을 최대한 방류하는 방식이므로 이상적인 형태의 댐 운영 방식이라 할 수 있으며, 수자원장기종합계획에서도 물수지 분석 수행시 deficit supply 방식의 댐 운영 방법을 고려하고 있다. 저수지 물수지 공식은 Eq. (1)과 같으며, 전날의 저수량($t-1$)에 해당일의 유입량, 수요량, 증발량 및 침투량을 고려하여 산정된다.

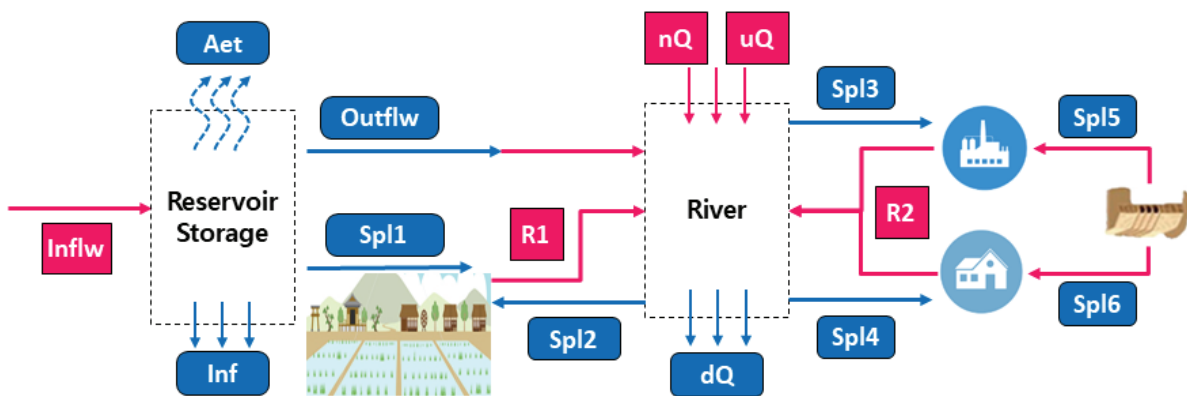


Fig. 1. Concept of Multiple-Composite Water Balance Analysis

$$Stg_t = Stg_{t-1} + Inflow_t - Outflow_t - Spl_t - Aet_t - Inf_t \quad (1)$$

여기서, Stg_t 해당일의 저수량(m^3/d), Stg_{t-1} 는 전날 저수지의 저수량(m^3/d), $Inflow_t$ 는 저수지의 유입량(m^3/s), $Outflow_t$ 는 월류량(m^3/d), Spl_t 는 농업용수 공급량(m^3/d), Aet_t 는 증발량(m^3/d) 및 Inf_t 는 침투량(m^3/d)이다.

저수지 유입량은 Tank 모형의 모의값을 적용하였다. 증발량과 침투량은 저수지 내에서 발생하는 단기간의 측정값을 산정하기가 어려우며, 같은 저수지라도 수위에 따라 변하기 때문에 이를 고려하여 산정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 증발산량과 침투량을 저수지별 만수량 대비 저수지 수면적 산정비율을 고려하였으며, 산정공식은 Eqs. (2) 및 (3)과 같다.

$$Aet_t = Pet_t \cdot A_t \cdot ws_t \cdot \frac{Stg_{t-1}}{Stgf} (1,000) \quad (2)$$

$$Inf_t = Infcap_t \cdot (24) \cdot A_t \cdot ws_t \cdot \frac{Stg_{t-1}}{Stgf} (1,000) \quad (3)$$

여기서, Pet_t 는 잠재증발산량(m^3/d), $Infcap_t$ 는 침투능(mm/h), A_t 는 저수지 유역면적(km^2), ws_t 는 저수지 수면적 산정비율, $Stgf$ 는 저수지의 만수량(m^3)이다.

저수량, 수요량, 사수위 및 만수위로부터 물 공급 여부를 결정할 수 있으며, 저수량이 사수위 이하일 경우 수요량만큼의 부족량이 발생하게 되고, 사수위의 저수량과 수요량의 합 보다 적을 경우 부족량은 수요량에서 공급량을 제외한 값이 된다. 반대로 저수량이 사수위와 수요량의 합보다 크고 만수위 보다 적으면 수요량만큼의 공급이 가능하며, 만수위와 수요량보다 더 클 경우 수요량 공급 및 월류량이 발생하게 된다.

하천 물수지 분석은 하천수 사용 및 지하수 사용 지역을 대상으로 계산되며, 하천수 사용 지역에 대한 하천유량(dQ_t) 산정방식은 Eq. (4)와 같다. 하천에 공급되는 유량(rQ_t)은 상류 유량, 자기유역 유량, 농업용저수지 월류량 및 생·공·농업용수 회귀수량의 합으로 계산되며, 부족량은 rQ_t 가 수요량보다 적거나, dQ_t 가 하천유지유량 보다 적은 경우에 발생하게 된다. 또한, 지하수를 사용하는 지역에서는 관정별 일사용량을 적용하여 용수별 관정으로 분류하여 생활·공업관정은 회귀수만 적용하였고 농업용 지하수 관정은 일사용량을 공급량으로 적용하되 하천수 수혜지역에 위치한 관정은 용수의 수원이 지하수가 아닌 하천수로 간주하여 물수지 분석의 공급량 계산시 제외하였다. 만약 관정 공급량이 수요량 보다 적을 경우 물 부족이 발생하는 것으로 설정하였다.

$$dQ_t = rQ_t - dmd_t \quad (4)$$

$$rQ_t = nQ_t + uQ_t + R1_t + R2_t + Outflow_t \quad (5)$$

2.3 모델 운영체계 구축

다중복합 물수지 모델은 Fig. 2와 같이 총 5개의 모듈을 활용하여 최종적으로 다수의 소유역을 대상으로 저수지 및 하천유역의 일 단위 공급가능량, 수요량, 공급량, 부족량 등을 파악할 수 있는 분석 체계로 구성된다. 물수지 분석을 위해 첫 번째는 기상자료의 유역 평균값을 산정한다. 기상자료에 대한 이상치 검사를 통해 자료 품질을 검토하며, 구축된 기상자료는 Thiessen 가중면적 평균법을 이용하여 유역평균 일강우량과 Penman-Monteith 공식에 의한 유역평균 잠재증발산량을 산정한다. 두 번째는 강우-유출 분석이며, 토양수분 저류구조 4단 TANK 모델을 기반으로 하천유역별 자연유량을 산정하고 저수지 및 하천 자기유역에 유입량을 산정한다. 세 번째는 수혜면적 및 수요량 추정으로 생활용수, 농업용수, 농업용수의 원단위와 수혜면적을 산정하여 하천과 저수지의 일단위 수요량을 산정한다. 네 번째는 저수지 물수지 분석으로 저수지의 기본 정보인 유역면적, 수면적, 수혜면적, 저수량, 사수위와 앞서 추정된 농업용수 수요량을 활용하여 설정된 매개변수에 의한 물수지 분석과 시설물 공급능력 판단을 한다. 마지막 하천유역의 물수지 분석 모듈에서는 하천유역의 물수지분석은 하천의 수혜면적과 하천유역 외 공급량, 관정 공급량, 생활·공업·농업수요량, 하수처리장 방류량, 저수지 물수지분석을 통해 출력되는 저수지 유출량, 저수지-하천유역 매칭 정보를 활용하여 설정된 매개변수에 의해 하천 물수지 분석과 시설물 공급능력을 판단하게 된다.

2.4 활용성 평가 방법

활용성 평가를 위해 관측값과 모의값의 상관성을 나타내는 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient; R), 체적비(Ratio of Volume, ROV)를 분석하였으며, Moriasi et al. (2007)이 모형 평가에 적용한 무차원지수인 효율성지수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)와 평균편차비율(Percent bias, PBIAS), 평균제곱근오차에 대한 관측값 표준편차비율(RMSE-observations Standard deviation Ratio, RSR)을 사용하였다.

R은 두 변수 Q_{obs} 와 Q_{sim} 의 선형 상관관계의 강도와 방향을 측정하는 방법으로 Eq. (6)과 같이 산정된다. -1과 +1의 범위를 가지며, +1에 가까울수록 강한 양의 선형관계가 나타나며 -1에 가까울수록 강한 음의 선형관계가 나타난다. ROV는 모의유량에 대한 체적합을 관측유량에 대한 체적의 합으로 나누어 산정하는 지표로 Eq. (7)과 같이 산정되며 최적값은 1이다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{(i)sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \quad (6)$$

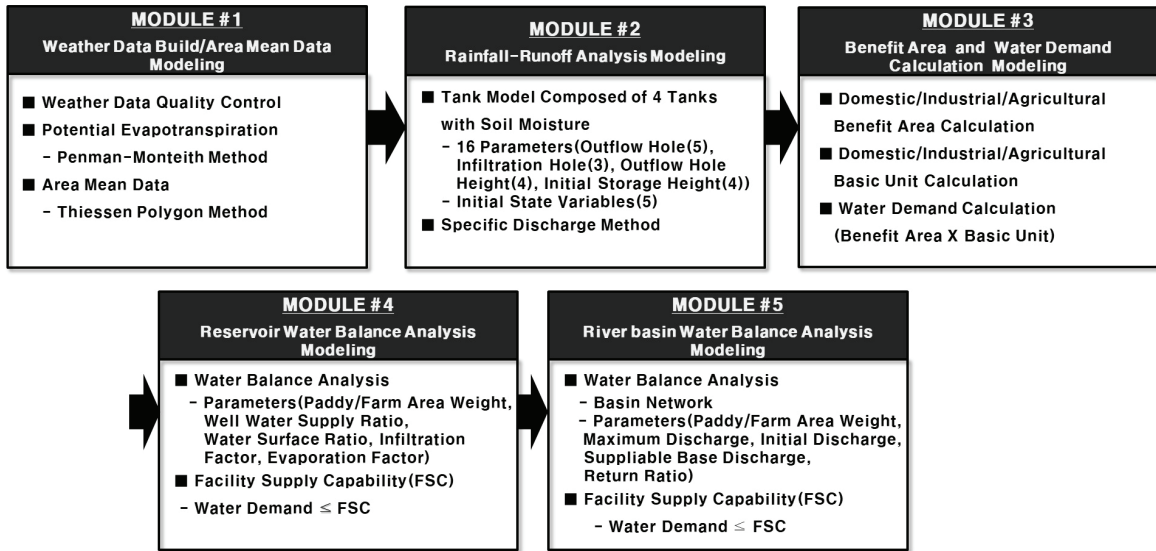


Fig. 2. Analysis Method of Water Balance Model (Gwon et al., 2019)

$$ROV = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (7)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs} - Q_{(i)sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs} - \overline{Q_{obs}})^2}} \quad (10)$$

NSE, PBIAS 및 RSR은 Eqs. (8)~(10)과 같이 산정된다. Moriasi et al. (2007)은 Table 1과 같이 통계기법 범위의 결과에 따라 매우 좋음(Very good), 좋음(Good), 충분(Satisfactory), 불충분(Unsatisfactory)으로 구분하여 적용성을 평가하였으며, 본 연구에서는 이 범위에 따라 모델의 활용성을 평가하고자 한다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs} - Q_{(i)sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (8)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs} - Q_{(i)sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{(i)obs})} \quad (9)$$

여기서, Q_{obs} 는 관측치, Q_{sim} 는 모의치, $\overline{Q_{obs}}$ 는 관측치의 평균, $\overline{Q_{sim}}$ 는 모의치의 평균, n 은 시계열 값의 개수이다.

3. 대상지역 선정 및 입력자료 구축

3.1 대상지역 선정

본 연구의 대상지역으로는 최근 가뭄 피해를 겪었던 충남 서북부 8개 시·군을 선정하였다. 충남 서북부의 8개 시·군은 보령시, 서산군, 당진시, 서천시, 청양군, 홍성군, 예산군, 태안군으로 2014~2017년에 평년대비 75%의 강수량이 발생하였다. 특히, 2015년에는 평년대비의 65%인 815 mm의 강수량 발생으로 극심한 물 부족을 경험한바 있다.

대상지역의 지방하천은 236개소로 총 연장은 1,180.02 km이며, 보령시 32개소, 서산시 43개소, 당진시 21개소, 서천군 20개소, 청양군 46개소, 홍성군 32개소, 예산군 35개소, 태안군 7개소가 있다. 해당 하천은 수자원단위지도 상 대권역은 금강수계, 삼교천수계와 기타수계로 구분된 방조제

Table 1. Significant Level of Statistical Method (Moriasi et al., 2007)

Range	NSE	PBIAS (%)	RSR
Very good	0.75 < NSE ≤ 1.00	PBIAS < ±10	0.00 < RSR ≤ 0.50
Good	0.65 < NSE ≤ 0.75	±10 ≤ PBIAS < ±15	0.50 < RSR ≤ 0.60
Satisfactory	0.50 < NSE ≤ 0.65	±15 ≤ PBIAS < ±25	0.60 < RSR ≤ 0.70
Unsatisfactory	NSE ≤ 0.50	±25 ≤ PBIAS	0.70 < RSR

및 잔류유역 총 3개소로 구성되어 있으며, 중권역 6개소, 표준유역 32개소로 구분되어 있다. 본 연구에서는 지역별 물 부족량에 대한 공간적 분포 특성 및 상세한 평가를 위해 유역단위를 최소화하였다. 수자원단위지도의 표준권역을 기초로 지형적 특성을 고려한 하천유역을 소분화하여 Fig. 3과 같이 436개의 하천유역을 구성하였다.

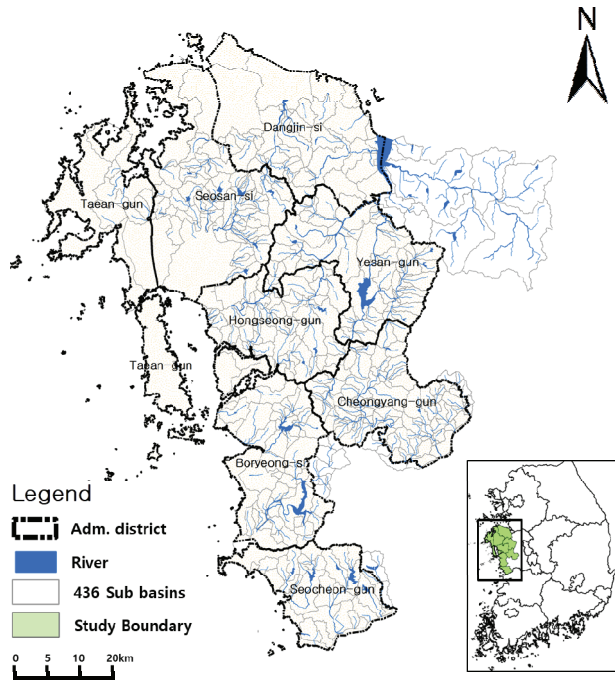


Fig. 3. Study Area with 436 Sub Basins

3.2 수문자료

기상자료는 증발산량 및 자연유량 계산을 위해 활용되며, 본 연구에서는 기상청의 종관기상관측장비와 방재기상관측을 위한 자동기상관측장비의 관측자료를 사용하였다. 종관기상관측장비는 1988~2017년(30년) 기간 동안 일 단위 강우와 잠재증발산량 자료를 수집하였고, 기상자료의 정확도를 높이기 위해 자동기상관측장비는 2002~2017년(16년)의 일 단위 강우자료를 수집하였다. 436개 하천유역에 대한 유역 평균강수량 산정을 위해 티센가중면적평균법을 적용하였다. 2001년까지는 종관기상관측장비의 서산, 군산, 천안, 보령 및 부여 관측소 5개소가 고려대상이며, 2002년 이후부터는 종관기상관측장비를 포함한 자동기상관측장비 32개소의 관측소를 포함하였다. 일단위 강우는 관측소별 강우에 대한 시계열 자료를 직접 수집하여 활용할 수 있으나, 잠재증발산량은 Penman-Monteith 공식에 적용을 위해 관측소별 기온, 습도, 복사량, 풍속에 관한 기상자료를 활용하였다. 다중복합 물수지 해석 모델에서 생산된 저수율 및 하천유량의 활용성 평가를 위해 관측저수량 및 유량자료를 수집하였다. 일단위 관측저수율 자료는 한국농어촌공사에서 관리

하는 농촌용수종합정보시스템의 자료를 이용하였으며, 자료기간은 2013~2017년, 대상 저수지는 삼교천, 무한천, 웅천천 및 지천 유역을 대표하는 4개 저수지(홍양, 사점, 용제 및 칠갑)로 선정하였다. 관측유량은 환경부 금강홍수통제소에서 제공하는 4개 수위관측소인 홍성군(삼교천교), 당진시(채운교), 보령시(노천교) 및 청양군(지천교)의 일 단위 유량자료를 활용하였다.

3.3 이수시설 자료

하천의 주요 이수시설물로는 댐, 하수처리장, 저수지, 양수장, 취입보 및 관정 등이 있으며, 본 연구에서는 Chungnam and ME (2019)의 조사성과 자료를 활용하였다. 대상유역 내 댐은 용담댐, 대청댐, 보령댐이 있으며, 하루에 공급되는 배분량은 79만톤, 실공급량은 39만톤이며, 서산시는 보령댐에서 당진시는 대청댐에서 아산공업으로 공업용수도를 공급받고 있다. Table 2는 충남 서북부 8개 시군의 저수지, 양수장 및 취입보 시설물 개수 및 수혜면적을 명시한 것이다. 시설물 개수는 총 1,470개, 수혜면적은 98,877 (ha)이고, 그 중 저수지 412개소, 양수장 420개소, 취입보 638개소로 확인되었다. 저수지는 시군이 283개소, 농어촌공사가 129개소를 관리하고 있으며, 본 연구에서는 운영실적 등 자료의 가용성 문제로 농어촌공사 저수지를 모델에 적용하였다. 그 외에 지하수 관정은 총 145,030개가 위치하였으며, 용도별로는 생활용 관정이 72,494개소, 농업용 관정이 72,724개소로 전체 관정의 거의 50%씩 차지하고 있으며, 공업용 관정은 1% 이하인 것으로 나타났다.

3.4 용수수요량 산정

용수수요량은 1988~2017년까지 생활용수, 공업용수, 농업용수 수요량을 하천유역별로 산정하여 적용하였으며, 계산 결과는 Table 3과 같다. 생활용수 수요량은 8개 시군별 통계연보에 따른 읍·면·동 인구에 토지피복도 상 주거지역 비율에 따른 가중치를 부여하여 유역별 인구를 산정하였고 시군별 급수량 원단위를 적용하여 수요량을 계산하였다. 또한, 하수종말처리장의 처리구역과 처리장이 속한 유역을 구분한 후 방류량에 대한 회귀수를 부여하여 물수지 분석 시 고려하였다. 8개 시군에 대한 생활용수 수요량은 하루 210,639톤이며 수요량의 54.0%가 회귀수로 반영되는 것으로 파악되었다. 공업용수 수요량은 산업단지가 포함된 유역을 구분하고 수자원장기종합계획(MLTM, 2011)와 동일한 방법으로 수도정비기본계획 수립 지침(ME, 2018)에 제시한 상수도 수요량 예측 업무편람의 기준에 따라 부지면적당 원단위로 적용하였다. 업종별 원단위 적용 시 다수 업종에 대해서는 면적비율로 정리하였으며, 산업단지는 자체처리장에서 자기유역으로 회귀수를 방류하는 것으로 적용하였다. 8개 시군에 대한 공업용수 수요량은 하루 286,788톤이며, 서산시에서 164,827톤으로 가장 크게 나타났다.

Table 2. Number and Benefit Area of Use Water Facility in 8 Regions

Study area	Reservoir		Pumping station		Weir		Total	
	Number	Benefit area (ha)	Number	Benefit area (ha)	Number	Benefit area (ha)	Number	Benefit area (ha)
Boryeong-si	98	5,346	45	2,331	95	1,409	238	9,086
Seosan-si	44	5,435	30	3,168	153	1,553	227	10,156
Dangjin-Si	41	1,743	98	31,567	28	298	167	33,608
Seocheon-gun	19	5,488	27	7,559	22	540	68	13,587
Cheongyang-gun	89	3,582	71	1,729	178	2,235	338	7,546
Hongseong-gun	44	2,197	35	1,710	53	373	132	4,280
Yesan-gun	32	9,084	86	6,104	68	1,529	186	16,717
Taeon-gun	45	2,366	28	1,167	41	364	114	3,897
Total	412	35,240	420	55,336	638	8,301	1,470	98,877

Table 3. Demand (m³/d) of Domestic and Industrial Water in 8 Regions

Study area	Domestic	Industrial	Agricultural	
			Paddy	Farm
Boryeong-si	35,236	7,253	81,000	2,800
Seosan-si	40,190	164,827	177,000	7,800
Dangjin-Si	35,608	100,161	224,000	5,900
Seocheon-gun	20,031	720	114,000	2,500
Cheongyang-gun	9,611	8,403	85,000	6,600
Hongseong-gun	25,023	1,170	82,000	3,700
Yesan-gun	27,013	3,993	135,000	20,100
Taeon-gun	17,926	262	62,000	2,200
Total	210,639	286,788	960,000	51,600

농업용수 수요량은 각 시설물의 수혜면적을 파악하고 해당 하천구역의 물수급 상황을 고려하여 시설물별 물수지 분석을 위한 용수수요량을 산정하였다. 원단위는 충남 수자원종합계획(Chungnam, 2015)에서 산정한 충청남도 8개 시군의 행정구역별 농업용수 수요량 산정 방법을 기초로 도출하였다. 논·밭에 대한 수혜면적은 지적도에서 용수로 현황을 고려하였고, 원단위를 월단위 수요량으로 산정하기 위해 농촌용수종합정보시스템에 제시된 용수구역별 월별 공급량을 이용하여 월별 가중치로 적용하였다. 저수지에 대한 일단위 수요량은 저수지 수혜면적(ha)과 논·밭의 원단위를 곱한 값에 유역면적 내에서 사용한 총 관정취수량(m³/d)을 제외하여 산정하였다. 하천구역에 대한 용수수요량은 유역 외에서 공급되는거나 방조제를 통해 공급되는 논·밭 면적을 제외한 해당 하천구역의 시설물에 영향을 미치는 수혜면적을 파악하여 수요량 산정 시 적용하였다. 하천구역별 일단위 수리담·관개전 수요량은 각각 원단위를 곱한 값으로 각각 산정되며, 불안전담·비관개전의 수요량은 하천구역별 일별 관정취수량을 적용하여 모델 분석 시 반영하였다.

4. 모델 활용성 평가 및 물수지 분석 결과

4.1 저수지 물수지 활용성 평가

모델의 활용성 평가를 위해 삼교천, 무한천, 응천천 및 지천 유역을 대표하는 홍양, 사점, 용제 및 칠갑 저수지를 선정하였으며, 관측저수율 자료보유 기간인 2013~2017년 동안에 모의저수율을 비교검증을 수행하였다. Table 4는 4개 저수지의 통계학적 분석 결과를 나타낸 것이다. 관측값과 모의값의 상관관계수(R)은 0.75~0.86으로 대부분 0.75 이상의 값이 산정되었으며, 그 중 용제 저수지의 상관관계수가 0.86으로 가장 높았다. 체적비(ROV)는 0.97~1.21의 범위를 보였으며 1에 근접하게 산정되어 활용성이 높은 것으로 확인되었다. 효율성지수(NSE)는 칠갑저수지에서 매우 좋음, 홍양저수지에서 좋음으로 분석되었으며, 사점저수지, 용제저수지에서는 충분함으로 분석되었다. 평균편차비율(PBIAS)은 용제저수지, 칠갑저수지에서 매우 좋음, 홍양저수지, 사점저수지에서 충분으로 분석되었다. 평균계급근오차 대 관측값 표준편차비율(RSR)은 칠갑저수지에서 매우 좋음, 홍양저수지에서

중음으로 분석되었으며, 사점저수지, 용제저수지에서 중분으로 분석되어 활용성 범위를 모두 만족한 것으로 나타났다.

Table 4. Results of Statistical Analysis between Observed and Simulated Storage Rate

Reservoir	R	ROV	NSE	PBIAS	RSR
Hongyang	0.75	1.21	0.75	-16.02	0.51
Sajeom	0.83	1.17	0.58	-17.96	0.65
Yongje	0.86	0.98	0.58	2.13	0.65
Chilgab	0.76	0.97	0.80	1.13	0.45

Fig. 4는 관측저수율과 모의저수율에 대한 시계열 거동을 비교분석 하고자 두 값을 그림으로 도시하였다. 각 저수지의 모의저수율과 관측저수율의 거동이 대부분 일치하고 있으나 기간별 일부 저수지에서는 차이가 보이는 것으로 분석되었다. 통계적 분석 판단 결과, 부분적으로는 저수율의 거동이 일치하고 있으나 일부의 관측치와 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 관측값과 모의값에 대한 고수위와 저수위의 거동의 차이로 인해 정확도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 저수지 상류 유역에 맞는 강수량 산정의 어려움, 인위적인 저수지 운영(펌프운영 및 하상준설), 저수지 침투량 등 수문현상에 대한 적용 그리고 매개변수의 오차에 기인한 것으로 판단되나, 저수율이 30% 이하로 떨어지는 가뭄 기간은 가뭄조사에서 분석된 가뭄 기간과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

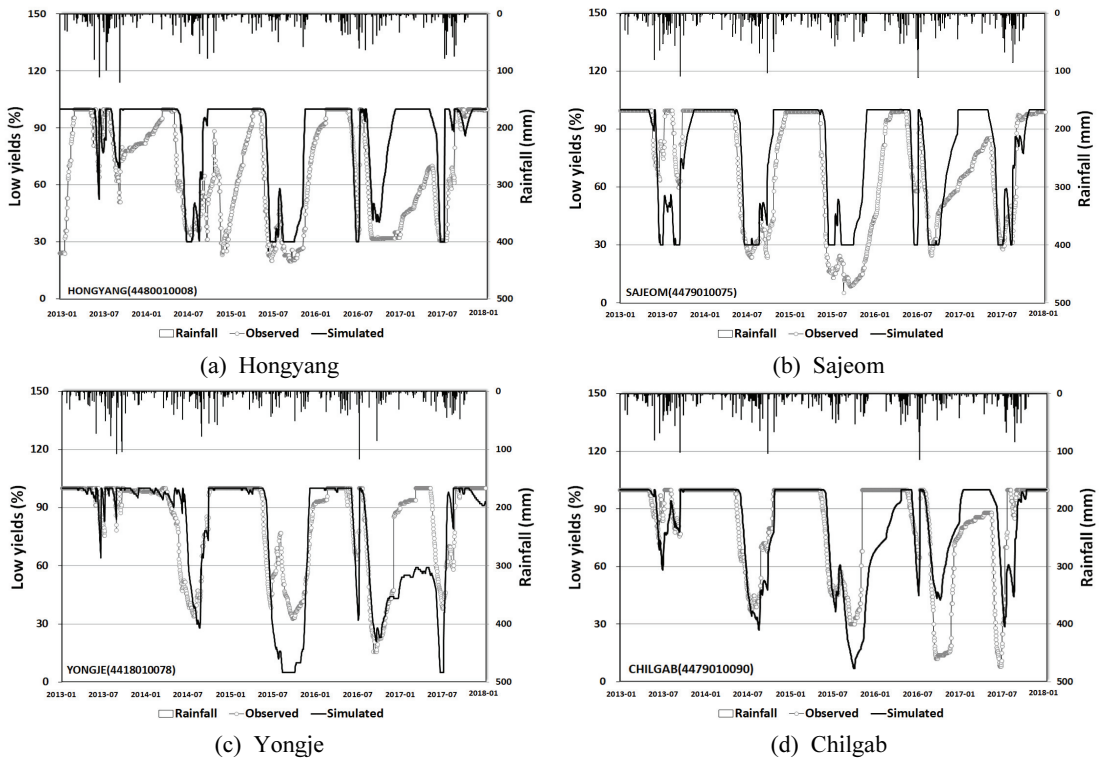


Fig. 4. Observed and Simulated Storage Rate for the Selected Reservoirs

4.2 하천 물수지 활용성 평가

저수지-하천 연계 운영을 통한 물수지 분석 결과를 검증하기 위해 4개 유량관측소에 대해 관측 및 모의유량을 비교검증하였다. 분석의 편의를 위해 관측유량은 유역면적을 고려한 유출고(mm), 모의유량은 일단위 물수지 분석 수행결과에서 생산된 총잉여공급량을 유역면적을 적용하여 모의유출고로 변환하였다. Table 5는 4개 하천유역에 대한 통계적 분석 결과를 제시한 것이다. 관측유출고와 모의유출고에 대한 상관계수(R)은 0.90 이상으로 높게 산정되었다. 체적비(ROV)는 1.22~1.52로 모든 지점이 1에 근접하였으며, 효율성지수(NSE) 및 표준편차비율(RSR)은 삼교천교 및 채운교에서 매우 좋음, 지천교에서 좋음으로 나타났다. 평균편차비율(PBIAS)은 채운교에서 매우 좋음으로 분석되었으며 다른 관측소에서는 중분으로 분석되어 모든 관측소에서의 모의유량이 적용성 범위를 만족하는 것으로 판단된다.

Table 5. Results of Statistical Analysis between Observed and Simulated Runoff

Station	R	ROV	NSE	PBIAS	RSR
Sabgyocheonkyo	0.93	1.27	0.84	-15.15	0.40
Chaewoonkyo	0.92	1.28	0.80	-8.35	0.45
Nocheonkyo	0.90	1.22	0.62	-9.98	0.61
Jicheonkyo	0.93	1.52	0.71	-21.54	0.54

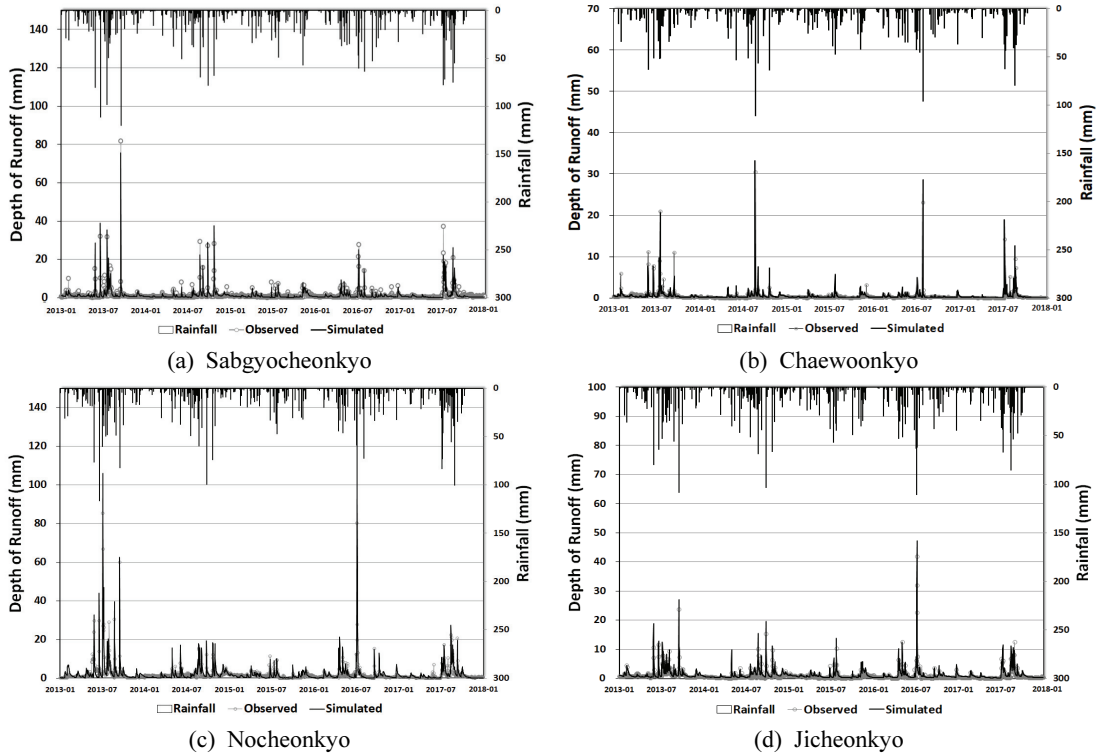


Fig. 5. Observed and Simulated Stream Flow for the Selected Stations

Fig. 5는 관측치 및 모의치에 대한 경향성을 판단하기 위해 시계열 그래프를 나타낸 것이다. 전체적으로 관측값과 모의값의 거동이 유사하였으나, 저유량 부분에서 일부 거동이 불일치 한 것으로 나타났다. 이러한 원인은 해당지점에 수위-유량 관계식이 개발되지 않은 연도의 관측유량 자료를 활용한 경우 모의유량과 큰 편차가 발생한 것으로 확인되었으며, 그 외에는 상류 저수지 및 취수시설물의 운영 오차 및 Tank 매개변수의 오차에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 물수지 분석 결과

다중복합 물수지 해석 모델을 활용하여 대상지역의 일단위 물수지 분석을 진행하였다. 2002~2017년까지의 하천유역의 총공급가능량, 수요량, 공급량, 부족량, 잉여공급량, 부족일수를 분석하였다. 여기서, 총공급가능량은 해당유역에 용수공급 이전 조건인 자연하천에서의 하천유량, 수요량은 수리안전답과 관개전의 수해면적에서 필요로 하는 양, 공급량은 공급가능량과 수요량에 공급되는 양, 부족량은 필요로 하는 수요량에서 공급하고 남은 양, 잉여공급량은 공급가능량에서 실제 공급하고 남은 양, 부족일수는 해당유역에 부족량이 발생하는 일수를 말한다.

대상지역의 물수급 상황을 판단할 수 있도록 하천유역 단위 물수지 분석 결과를 하천유역 단위로 공간적으로 분포시켜 Fig. 6에 도시하였으며, 물수급량을 파악하기 위해 분석결과를 시·군별로 산정하여 Table 6에 제시하였다. 8개 시·군의 연평균 총수요량은 994.25백만톤, 연평균 총공

급량은 925.76백만톤, 연평균 총부족량은 68.49백만톤으로 분석되었다. 수요량은 당진시가 225.54백만톤, 서산시가 195.54백만톤으로 크게 분석되었으며, 반면 홍성군과 청양군에서 각각 93.06백만톤, 67.51백만톤으로 수요량이 작은 것으로 분석되었다. 공급량은 당진시가 222.76백만톤, 서산시가 184.59백만톤으로 크게 분석되었으며, 반면 태안군과 청양군에서 각각 81.43백만톤, 62.02백만톤으로 수요량이 작은 것으로 분석되었다. 부족량은 서천군이 17.76백만톤, 태안군이 12.83백만톤으로 크게 분석되었으며, 반면 당진시가 2.78백만톤, 예산군이 1.77백만톤으로 부족량이 작은 것으로 분석되었다.

또한, 8개 시·군의 가뭄 정도를 파악하기 위해서 수요량 대비 부족량 비율을 검토하여 가뭄에 취약한 지역을 파악하여 제시하였다. 분석 결과, 서산시의 경우 부족량이 10.95백만톤으로 크게 분석되었으나, 수요량 대비 부족량 비율은 5.60%로 타 시군에 비해 감소되는 것으로 파악되었다. 서천군이 17.15%, 태안군이 13.61%, 홍성군이 10.09% 순으로 수요량 대비 부족량 비율이 높게 나타나 가뭄에 취약한 것으로 파악되었다. 이는 하천유역 단위로 분석한 Fig. 6에서도 물수급 경향성을 파악할 수 있다. 서천군에서는 일부 하천유역에서 연평균 부족일수가 크게 나타났으며, 태안군, 홍성군과 서산시가 위치한 서북부 지역에서 부족량이 크게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. Chungnam and ME (2019)에 제시된 2017년도 충청남도 서부 8개 시·군을 중심으로 발생한 가뭄피해 현황에도 지역적 위치가 비슷하게 나타나

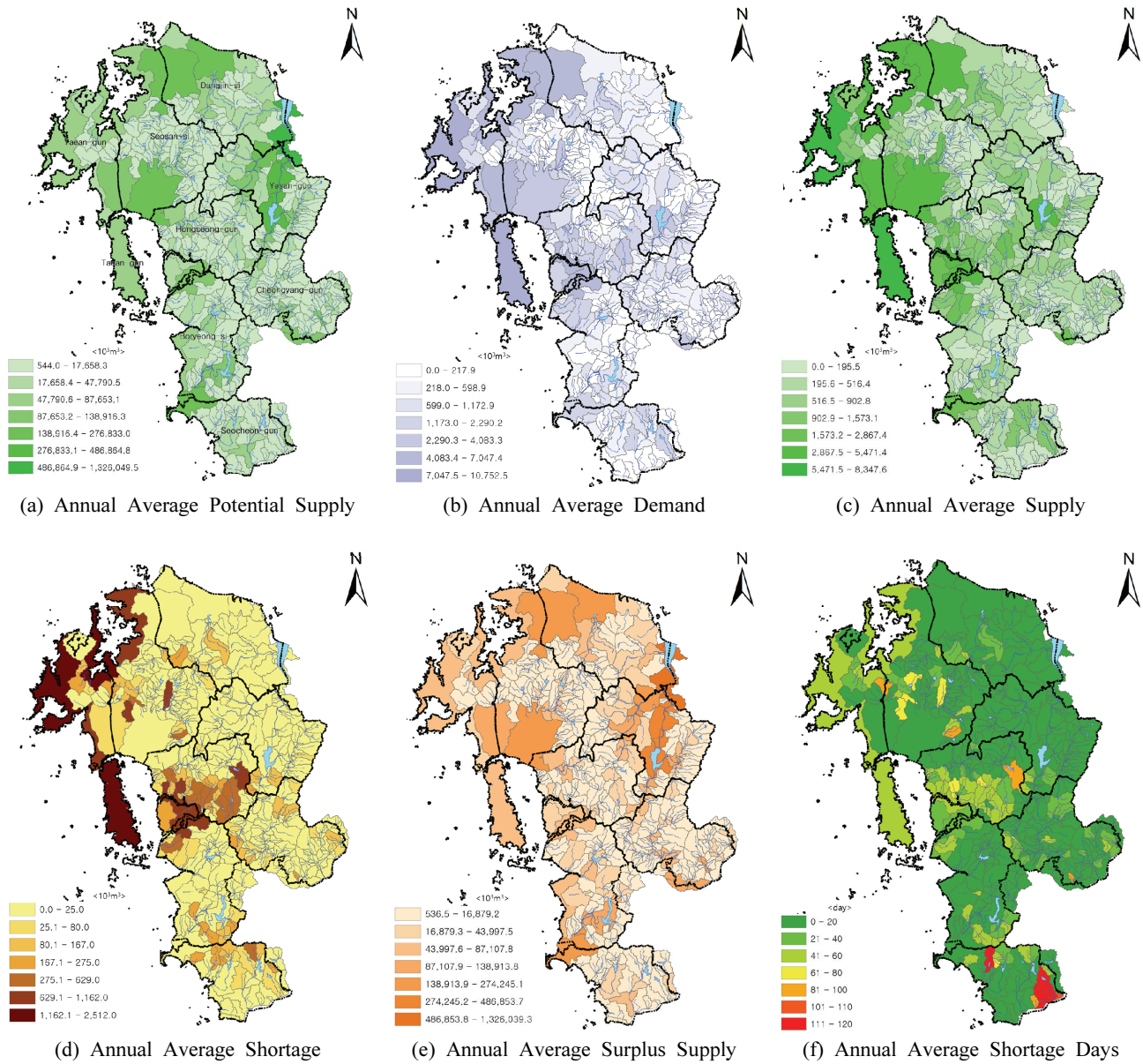


Fig. 6. Results of Annual Average Water Balance Analysis

Table 6. Results of Annual Average Water Balance Analysis by 8 Regions (unit: 10⁶ton)

Study area	Potential Supply	Demand	Supply	Shortage	Surplus Supply	Shortage against Demand (%)
Boryeong-si	1,343.31	93.28	85.75	7.53	1,328.68	8.07
Seosan-si	1,103.58	195.54	184.59	10.95	1,083.53	5.60
Dangjin-Si	3,188.04	225.54	222.76	2.78	3,178.93	1.23
Seocheon-gun	490.01	103.53	85.77	17.76	481.77	17.15
Cheongyang-gun	1,856.00	67.51	62.02	5.49	1,840.05	8.13
Hongseong-gun	934.62	93.06	83.68	9.39	912.65	10.09
Yesan-gun	3,880.70	121.53	119.77	1.77	3,867.29	1.45
Taeon-gun	373.06	94.26	81.43	12.83	352.70	13.61
Total	13,169.32	994.25	925.76	68.49	13,045.59	6.89

는 경향이 있다. 청양군을 제외한 7개 시·군의 10,318 ha에서 피해가 발생하였으며, 태안군, 홍성군, 서산시, 보령시, 당진시의 5개 시·군의 저수지 상류지역, 하천의 하류지역, 방조제 인근에서 가뭄피해가 발생하였다.

본 연구에서 개발된 모델을 활용하여 물수지 분석한 결과, 일부 실제 가뭄 발생 지역 및 부족량에 대한 차이가 발생했는데, 이는 공간범위를 최소화 함으로써 농업용 저수지 등 소규모 시설에 대한 지역간 이동을 반영할 수 있어 물부족이 다르게 발생한 것으로 판단된다. 또한, 대상 유역 내의 수리시설물 뿐만 아니라 외부 유역의 시설물에 대한 정확한 파악이 대상 유역의 물공급 체계에 영향을 줄 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 다중복합지역에서의 물공급 현황을 고려한 일단위의 체계적인 분석이 가능한 물수지 모델을 개발하고 이를 활용해 신속하고 정확하게 물공급 취약지역을 파악하는데 목적이 있다. 이에 개발된 물수지 모델을 활용하여 충남 서북부 8개 시·군을 대상지역으로 선정하였으며 수문자료와 이수시설자료, 용수수요량을 산정하여 입력자료로 구축하여 모델의 활용성 평가 및 물수지 분석을 진행하였다. 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 다중복합 물수지 모델은 기상자료 구축 및 유역평균값 산정, 강우-유출 분석, 수해면적 및 수요량 추정, 저수지 물수지 분석, 하천유역 물수지 분석의 5개 모듈을 활용하여 일단위 저수지와 하천을 연계하여 물수지를 운영할 수 있도록 개발하였다

둘째, 모델의 활용성 평가를 위해 4개 저수지의 관측저수량과 모의저수량을 비교하여 정량적인 평가를 진행하였다. 분석결과, R은 0.75~0.86, ROV는 0.97~1.21의 범위를 보여 1에 근접하게 산정되었으며, NSE, PBIAS, RSR은 모두 충분히 이상으로 분석되어 활용성 범위에 모두 만족한 것으로 나타났다.

셋째, 4개지점의 유량관측소의 유량자료를 수집하여 관측 유량과 저수지와 하천을 연계운영한 물수지 분석의 모의유량 결과, R은 0.90 이상, ROV는 1.22~1.52로 모든 지점이 1에 근접하게 산정되었으며, NSE, PBIAS, RSR은 모두 충분히 이상으로 분석되어 적용성이 높게 평가되었다.

넷째, 정확도가 검증된 다중복합 물수지 해석모델을 활용하여 대상지역의 일단위 물수지 분석을 진행하여 하천유역 단위의 총공급가능량, 수요량, 공급량, 부족량, 잉여공급량, 부족일수를 산정하고 이를 공간적으로 분포시켜 가시적으로 표현 및 시·군별 연평균값을 산정하였다. 이를 통해 부족량은 서천군이 17.76백만톤, 태안군이 12.83백만톤으로 크게 분석되었으며, 반면 당진시가 2.78백만톤, 예산군이 1.77백만톤으로 부족량이 작은 것으로 분석되었다.

마지막으로, 8개 시·군의 가뭄 정도를 파악하기 위해서

수요량 대비 부족량 비율을 검토하여 가뭄에 취약한 지역을 파악하여 제시하였다. 분석 결과, 서천군이 17.15%, 태안군이 13.61%, 홍성군이 10.09% 순으로 수요량 대비 부족량 비율이 높게 나타나 가뭄에 취약한 것으로 파악되었다. 이는 2017년도 대상지역의 가뭄피해 현황과 비슷한 경향이 나타났다.

본 연구에 활용한 다중복합 물수지 해석모델을 활용하여 하천유역 단위의 효율적인 물관리 및 가뭄관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해 물부족이 빈번하게 발생하는 지역이나, 가뭄 취약지역에 물공급 확보를 위해 저류지 또는 하천을 통해 방류되는 용수를 저장 또는 재이용으로 효율을 극대화할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 향후 과거자료를 활용하여 물공급 취약지역을 미리 파악하여 대책을 수립하고 현재 공급현황을 신속하고 정확하게 파악하여 전달할 수 있는 모니터링 시스템 구축을 통해 시설물별, 하천유역별 가뭄 대응체계를 수립할 필요가 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950003).

References

- Alfarra, A. (2004). *Modeling water resource management in Lake Naivasha*. Master's thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
- Bae, D.H., Son, K.H., and Kim, H.A. (2013). Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 289-299.
- Cho, D.C. (2003). *Monthly streamflow simulation by WASMOD model*. Ph.D. dissertation, Inha University.
- Chungnam Institute (CNI). (2015). *Research on securing water for agriculture through water balance analysis*.
- Gwon, Y.H. (2019). *The drought evaluation through the development of water balance model linked with reservoirs and rivers*. Ph.D. dissertation, Incheon National University.
- Gwon, Y.H., Choi, G.W., and Lee, B.J. (2019). Evaluation of future water supply variation in river unit basin by climate change. *Crisisonomy*, Vol. 15, No. 5, pp. 57-69.
- Kim, S.J. (2011). *Impact of climate change on water resources and ecological habitat in a river basin*. Ph.D.

- dissertation, Inha University.
- Lee, D.R., Moon, J.W., Lee, D.H., and Ahn, J.H. (2006). Development of water supply capacity index to monitor droughts in a reservoir. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 3, pp. 199-214.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (2006). *Water resources plan (2011-2020)*.
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Guidelines for the establishment of a basic plan for water maintenance*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Water resources plan (2011-2020)*.
- Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. (2010). Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka River System (Canada). *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 3, pp. 376-385.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Noh, J.K., Lee, J.N., and Kim, Y.K. (2010). Development of standardized water balance model for applying irrigation district in South Korea. *Journal of Agricultural Science*, Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Vol. 37, No. 1, pp. 105-112.
- Oh, J.H., Kim, Y.S., Ryu, K.S., and Bae, Y.D. (2019). Comparison and discussion of water supply and demand forecasts considering spatial resolution in the Han-river basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 7, pp. 505-514.
- Sandoval-Solis, S., and McKinney, D.C. (2012). Integrated water management for environmental flows in the Rio Grande. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 3, pp. 355-364.
- The Province of Chungcheongnam-do (Chungnam), and Ministry of Environment (ME). (2019). *Report of drought investigation and countermeasure establishment in Chungnam area*.
- The Province of Chungcheongnam-do (Chungnam). (2015). *Chungnam water resources plan*.
- Vano, J.A., Scott, M., Voisin, N., Stöckle, C.O., Hamlet, A.F., Mickelson, K.E.B., et al. (2010). Climate change impacts on water management and irrigated agriculture in the Yakima River basin, Washington, USA. *Climatic Change*, Vol. 102, pp. 287-317.

Received	March 27, 2020
Revised	March 27, 2020
Accepted	March 31, 2020