

통합수자원평가계획모형 K-WEAP의 적용성

Application of K-WEAP

(Korea-Integrated Water Resources Evaluation and Planning Model)

최시중* / 이동률** / 문장원*** / 강성규****

Choi, Si Jung / Lee, Dong Ryul / Moon, Jang Won / Kang, Seong Kyu

Abstract

An integrated water resources management is highly required to use efficient water and preserve water quality due to the limits of water resources development and water pollution. K-WEAP was developed, which supports the water resources planning and evaluation within a fully integrated interactive system. In this study, we present three applications of K-WEAP. First, we examined the usefulness of K-WEAP as a water resources planning tool through its application to the National Water Resources Plan. Second, the conjunctive use of surface water and groundwater in the Geum river basin with K-WEAP was evaluated, and its results show how to support to set up a sustainable groundwater management plan. Finally, we confirmed the function of the integrated water quantity and quality management in K-WEAP, which conducted by comparing the simulated results of water quality in both QUAL2E and K-WEAP.

Keywords : water resources planning, water balance accounting, conjunctive use of surface water and groundwater, water quality simulation, K-WEAP

요 지

수자원개발의 한계와 수질의 오염으로 인해 제한된 수자원을 효율적으로 이용하고 수질을 보전하기 위한 통합수자원 관리가 절실히 요구되는 상황이다. 최근 이를 위해 수자원을 통합적으로 평가하여 계획의 수립을 지원할 수 있는 통합수 자원평가계획모형(K-WEAP)을 개발하였다. 본 연구에서는 3가지 부문에서 K-WEAP의 적용성을 평가하였다. 첫째는 수자원장기종합계획에 적용한 K-WEAP의 물 수급 전망 과정과 분석결과를 통하여 수자원 계획의 도구로서 K-WEAP의 유용성을 제시하였다. 둘째는 K-WEAP에서 제공하는 지표수-지하수 연계모의를 통해 보다 합리적이고 지속가능한 지하수이용 계획을 제시하였다. 마지막으로, K-WEAP의 수질모의 신뢰성을 평가하기 위하여 석화천을 대상으로 QUAL2E 모형의 결과와 비교하여 수량-수질 통합관리평가의 기능을 확인하였다.

핵심용어 : 수자원 계획, 물수지 분석, 지표수-지하수 연계이용, 수질모의, K-WEAP

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 전임연구원 (e-mail: sjchoi@kict.re.kr)

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원 (e-mail: dryi@kict.re.kr)

Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology, Water Resources Research Division, 2311 Daehwa-dong, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: jwmoon@kict.re.kr)

**** 한국건설기술연구원 수자원연구실 전임연구원 (e-mail: skkang@kict.re.kr)

1. 서 론

과거의 고도 경제성장기의 수자원 계획은 수요를 충족시키기 위하여 수자원 확보와 공급망의 확충 등 수량중심의 시설계획이 중심이 되었다. 그러나 사회·경제활동이 점차 안정화되고 하천환경에 대한 관심의 증가로 수량중심의 수자원 계획은 한계를 맞고 있다. 최근 수자원 계획은 풍부한 환경에 대한 배려, 기후변화 등에 의한 물 공급기능의 저하에 대한 우려 및 양질의 수원요구에 대응하기 위한 수량과 수질의 연계관리 등을 추구하는 통합수자원 계획이 자리잡아가고 있다. 통합수자원계획은 세 가지 주요 전략적인 목표를 가지고 있다 (GWP, 2003). 첫째는 한정된 지표수, 지하수 등 수원들을 연계하여 가용수자원과 물 공급의 안정성을 확대하여 수자원 이용의 효율성을 증대시키는 것이다. 둘째는 지역 간 수자원의 불균형을 해소한 공평한 수자원의 이용이며, 셋째는 수생태계의 건전성을 확보하기 위한 환경적 지속가능성을 유지하는 것이다. 통합수자원계획의 전략적 목표를 달성하기 위해서는 수자원을 통합적으로 평가하고 계획수립을 지원할 수 있는 도구의 개발이 필수적이다. 이를 위해 통합수자원의 평가와 계획을 위한 모형으로서 K-WEAP을 개발하였다.

본 연구는 K-WEAP을 실제 유역대상에 구현하여 평가하고 모형의 적용성을 검토하는데 목적이 있다. K-WEAP의 적용성 검토는 수자원계획수립을 위한 물수지 분석, 지표수-지하수 연계운영과 수량-수질 연계모의에 대하여 수행하였다.

2. 통합수자원평가계획모형 (K-WEAP)의 개요

K-WEAP은 하천, 댐, 지하수 등 공급원과 수요처 및 광역상수도 등 유역의 물리적인 물이용 순환체계를 컴퓨터 화면지도상에서 구현하고, 수량, 수질, 생태환경, 수요관리 및 수자원 정책 시나리오 분석 등을 종합적으로 고려하여 통합수자원계획 수립을 지원하는 전문 모형이다. K-WEAP은 직관적인 GIS 기반 그래픽 인터페이스로 사용자가 컴퓨터 화면지도상에서 손쉽게 수요처와 공급원 등의 물이용 순환 네트워크를 구축하고 수정할 수 있으며, 그래프를 포함한 강력한 문서작성 기능을 이용하여 수자원평가의 결과를 한눈에 알아볼 수 있다. 수자원 관련 사회·경제변수, 수요추정과 자료입력 등을 위한 사용자 정의가 가능한 수식편집기능을 가지고 있으며, 용도별 수요량에 대해 상위용도부터 최종용도까지 다단계 수요량 데이터베이스를 제공한다. 입출력자료는 스프레드시트와 다른 모형과의 동적연계가 가능하며 자료를 엑셀로 저장하여 지속적으로 활용할 수 있다. 지표수-지하수-대체수

자원의 연계운영을 지원할 수 있으며, 다양한 시간단위의 물수지 분석모의, 하수처리수 재이용, 물 공급의 신뢰도 분석, 하천수질모의 및 수원의 수질에 따른 수자원의 가용성 등을 평가할 수 있다. 또한, 공급우선순위 시스템과 내장된 선형계획 모듈을 통한 합리적인 용수배분을 모의할 수 있다. 다양한 시나리오의 구축과 평가가 가능한 것도 K-WEAP의 장점이라 할 수 있다.

3. K-WEAP의 적용

3.1 수자원 계획의 물수지 분석

수자원장기종합계획 (2006-2020) (건설교통부, 2006) (이하 수자원계획)의 물수지 분석에 K-WEAP을 적용하였으며 K-WEAP의 적용과정과 분석결과에 대한 평가를 제시하였다.

3.1.1 물이용 순환 네트워크 및 수요-공급량의 자료 구축

물이용 순환 네트워크를 구축하기 위한 공간적인 범위로서 우리나라를 한강, 낙동강, 금강, 영산·섬강권역 등 4대 권역 및 117개의 소유역으로 구분하였다. 물수지 분석은 각 소유역의 하천, 댐 등 가용 수자원과 총 수요량의 비교에 의한 거시적 분석에 의해 평가된다. K-WEAP은 각 권역의 하천, 유역의 GIS 자료를 이용하여 K-WEAP 화면상에 하천, 공급시설, 수요처 등을 실제와 같이 재현할 수 있다. Fig. 1은 K-WEAP을 통해 구축된 한강권역의 물이용 순환 네트워크를 나타내었다.

K-WEAP은 각각의 수요처에 대해 공급우선순위와 수원선호도를 부여하여 물배분 순위를 결정하는데 해당 수요처를 동시에 공급하는 것을 원칙으로 하여 모든 수요처의 공급우선순위를 1로 동일하게 부여하였다. 또한 각 수

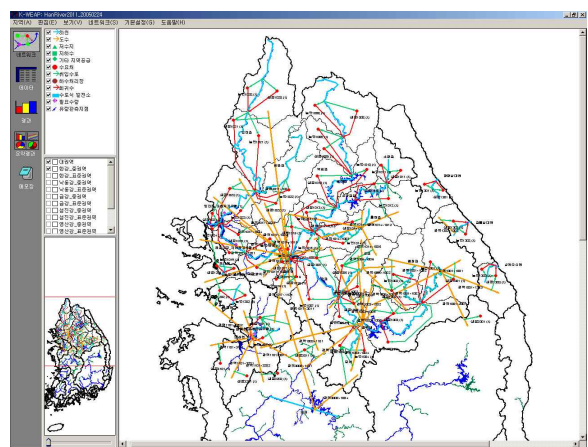


Fig. 1. Water Budget Network of the Han River Basin on K-WEAP

요처에 공급되는 수원 중 어느 수원으로부터 물을 먼저 공급받을 것인지를 결정하는 수원선호도에 있어 광역상수도로부터의 공급을 수원선호도 1로 하고 하천으로부터의 공급을 수원선호도 2로 입력하였다. 즉 광역상수도로부터의 공급이 하천수로부터의 공급보다 우선시 되도록 네트워크를 구축하였다.

물수지 분석을 위해 수자원장기종합계획에서 이용하는 반순 단위인 5일을 모의단위로 설정하였으며 모의 기간으로는 기준년도인 1967년부터 2003년까지의 37개 수문년을 이용하였다. 이 기간의 하천유량 시계열이 미래에도 재현된다고 가정하여 물수지 분석을 수행하였다. 시나리오 개념을 도입하여 고수요, 기준수요 및 저수요의 세 가지 시나리오에 따라 수요관리 절감량을 고려하여 각 소유역별 목표연도별 (2011, 2016, 2020년) 수요량을 산정하였다. K-WEAP에 입력되는 수요량은 연간 총 수요량이며, 모형의 내부함수를 통해 연간 총 수요량을 물수지 분석의 시간 단위인 5일 단위의 수요량으로 시간 분포시킨 자료를 이용하여 분석을 수행하였다. 또한 Fig. 2와 같이 고수요, 기준수요 및 저수요 시나리오를 동시에 구축하고 각 시나리오에 대한 수요량을 입력함으로써 동일 네트워크를 이용하여 손쉽게 물수지 분석을 수행할 수 있게 하였다. 각 시나리오를 독립적으로 분석하는 다른 모형과는 달리 K-WEAP은 각각의 시나리오별로 네트워크 및 동일한 입력 자료를 새롭게 구축할 필요 없이 이들 세 가지 시나리오에 대한 결과를 동시에 평가하여 제시한다는 장점을 가지고 있다.

수자원 공급원으로써 하천유량은 강신옥 등 (2004)과 수자원계획에서 제시한 강우-유출 모형인 토양수분저류구조 4단 탱크모형에 의해 산정된 결과를 이용하였다. 댐의 경우 각 댐의 제원 및 특성을 모형에 입력하였으며 댐 연계운영 방식에서는 수자원장기종합계획 (Water Vision 2020) (건설교통부, 2000)에서 적용하였던 권역 내 모든 댐의 총 저수량 대비 각 댐별 저수량의 비율을 고려한 방법이 아닌 댐별 동일 저수율을 기준으로 적용하였다. 광역상수도는 현재 운영 중이거나 수도정비기본계획 (건설

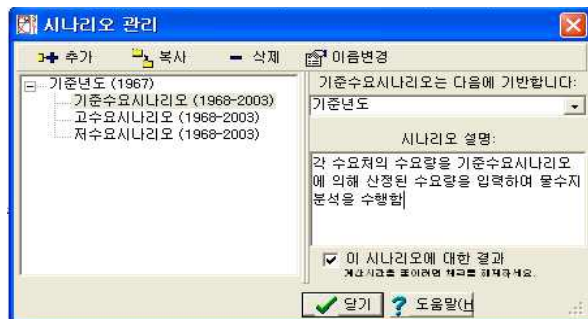


Fig. 2. Water Demand Scenarios Management

교통부, 2004)에서 반영된 계획현황을 고려하였다. 회귀율의 경우 수자원계획에서 이용하였던 값을 그대로 사용하였다. 생활·공업용수의 경우는 수요량의 65%, 농업용수는 35%를 적용하였으며 물수지 분석에서 농업용수는 각 소유역에서 반복이용의 효율성을 최대화하기 위하여 수요량의 65%인 순물소모량을 취수하여 공급하는 것으로 간주하여 물수지 분석을 수행하였다.

3.1.2 물수지 분석 결과

K-WEAP은 각 수요처 수요충족률의 최대화를 목적함수로 하천수와 댐의 연계운영 및 선형계획법, 공급우선순위와 수원선호도 등을 통해 최적의 물배분을 모의한다. K-WEAP의 적용성은 구축된 물이용 순환 네트워크와 이를 기반으로 하는 물의 최적공급이 실제 물이용 상황과 어느 정도 부합되는가에 의존된다. 따라서 수자원계획에서는 물수지 분석의 적정성을 평가하기 위하여 실제 물이용 상황에서의 실측치들과 K-WEAP의 결과에 대한 비교·검증이 필요하다.

(1) 물수지 분석을 위한 검증

장래 물수급 전망을 위해서는 먼저 구축된 물이용 순환 네트워크에서 실제 이용량과 하천유량을 이용하여 사전에 모형의 검증이 필요하다. 검증을 위해 2003년의 수요량 및 하천유출량 자료 등을 이용하여 분석을 수행하였다.

물수지 분석 결과의 검증을 위해 한강권역의 한강대교, 낙동강권역의 진동, 금강권역의 공주 및 섬진강권역의 송정 수위관측지점 자료를 이용하였다. 2003년 각 수위관측소별 실제 관측치와 수요량, 댐, 하천유출량 등 자료를 입력하여 K-WEAP을 통해 계산된 하천유량 모의치를 비교·분석하였다. 이를 위해 K-WEAP의 기능 중 하나인 네트워크상의 비교하고자 하는 지점에 관측지점 객체를 위치시켜 실측치를 입력함으로써 하천유량 분석결과와의 차이를 쉽게 판단할 수 있는 유량관측지점 기능을 이용하였다. 이 기능을 통해 K-WEAP은 관측치와 모의치의 편차 및 관측치 대비 모의치 비율을 그래프나 테이블로 제시한다. K-WEAP의 유량관측지점 기능을 이용하여 4개의 지점에 대한 분석 결과는 Fig. 3에 도시하였다. 결과를 평가하기 위해 2가지 지표를 사용하였다. 사용한 평가지표는 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)와 체적비 (Ratio of volume, ROV)이다. NSE는 관측값의 표본분산에 대한 오차분산의 상대적인 크기를 나타내며, 최적값은 1이고, ROV의 최적값도 1이다. 각각의 관계식은 Eqs. (1) and (2)와 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_{mean}^{obs})^2} \quad (1)$$

$$ROV = \frac{\sum_{t=1}^N q_t^{sim}}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}} \quad (2)$$

여기서, q_t^{obs} 는 반순별 관측유량, q_t^{sim} 는 반순별 모의유량, q_{mean}^{obs} 는 반순별 관측유량의 평균값이다. Eqs. (1) and (2)의 분석 결과는 Table 1과 같으며 평균, 표준편차, NSE, ROV, 상관계수를 보면 실제 관측치와 K-WEAP의 모의치가 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 본 연구에서는 농업용수의 경우 2003년 추정치를 입력하였고, 생활·공업용수의 경우 65%의 회귀율을, 농업용수의 경우 65%의 순물소모량을 모든 수요처에 일률적으로 가정하였기 때문에 실제 관측치와 다소 차이를 보이고 있다. 특히 한강권역의 경우 홍수기에 하천유량이 크게 산정되어 실제 관측치보다 모의치가 크게 나타났으며 3~6월의 경우 하

천유량으로 충족시키지 못한 각 수요처의 수요량만큼을 저수지에서 방류하는 K-WEAP의 최적 물배분 모의방법으로 인해 한강대교의 하천유지유량만을 충족시키기 위해 상류의 저수지에서 물을 공급하므로 실측치와 모의치의 차이를 보이고 있다. 그러나 Fig. 3과 Table 1을 통해 K-WEAP에 의해 구축된 물이용 순환 네트워크와 물의 연계이용 방법 등이 적정하다는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 댐 운영 결과

K-WEAP의 댐 운영은 하류의 하천유량에 의해 물 부족이 발생할 경우 댐에서 방류하는 물 부족공급 (water deficit supply) 방식을 이용하였다. 이때 상류의 댐군은 저수율을 동일하게 유지하는 제약조건에 의한 선형계획법을 통해 하류로 물을 공급한다. Fig. 4는 K-WEAP에서 제공되는 저수지 운영결과로서 목표년도 2011년의 기준

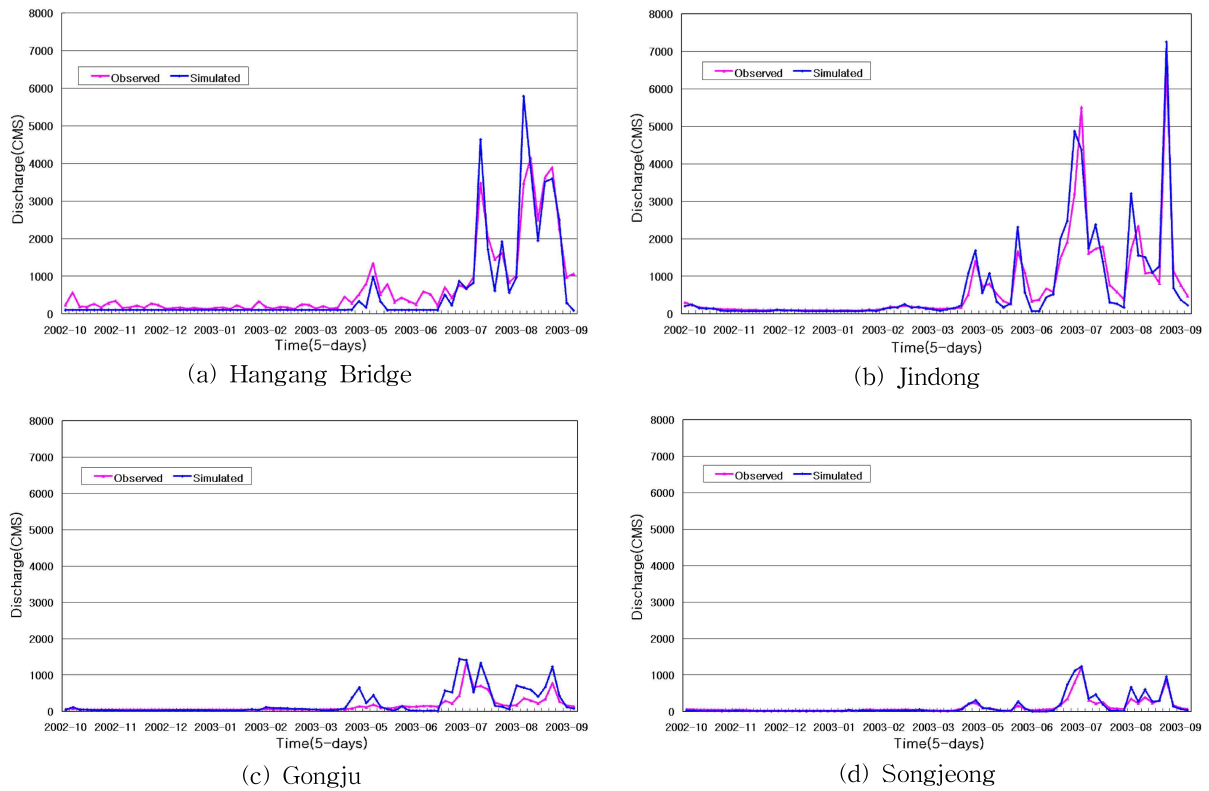


Fig. 3. Verification Results of K-WEAP Water Budget Analysis

Table 1. Statistics Comparison of Observed and Simulated Discharges of K-WEAP

Station	Statistics		Mean		Std		NSE	ROV	R
	obs	sim	obs	sim	obs	sim			
Hangang Bridge	711.7	585.7	973.9	1144.9	0.820	0.823	0.944		
Jindong	688.7	705.4	1123.6	1254.2	0.995	1.024	0.950		
Gongju	156.2	218.6	213.8	345.1	0.976	1.399	0.857		
Songjeong	123.3	132.5	200.7	256.8	0.993	1.075	0.959		

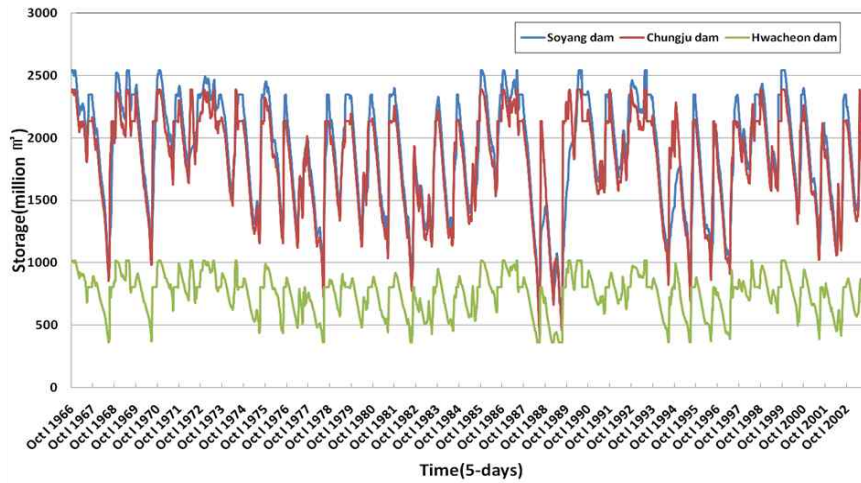


Fig. 4. Storage Variations (Hwacheon, Soyang, and Chungju dam)

Table 2. Total Water Shortage Prospects in Korea

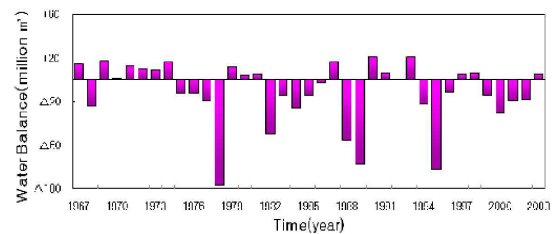
(unit : million m³)

Scenarios	2006		2011		2016		2020	
	water demand	water shortage	water demand	water shortage	water demand	water shortage	water demand	water shortage
High Demand	34,546	866	36,201	952	37,079	1,437	37,222	1,494
Medium Demand	34,378	846	35,498	797	35,800	975	35,568	925
Low Demand	34,030	814	34,504	685	34,062	623	33,301	559

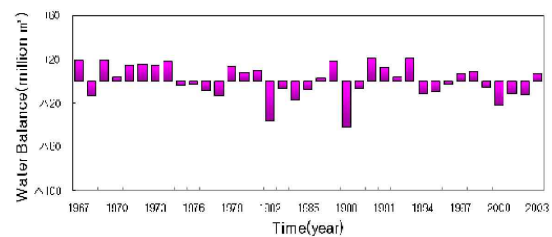
수요 시나리오에 대한 한강권역의 화천, 소양 및 충주댐의 1967~2003년 기간 저수량 변화이다. K-WEAP은 모든 저수지들에 대해 동일저수율이라는 제약조건에 의해 최적 물배분을 수행하기 때문에 각 저수지가 모의단위별로 동일한 저수율(모의단위 저수량/유효저수량)을 가지며 이에 의해 각 저수지의 저수량 변화패턴이 동일함을 알 수 있다. 한강권역의 경우 1978, 1982, 1988년 등에서 심한 가뭄이 발생하였으며 이들 시기의 저수량이 낮은 상태임을 알 수 있다. 이들 분석을 통해 각 댐의 물 공급 능력에 대한 안전도를 평가할 수 있다.

(3) 물수지 분석 결과 표출

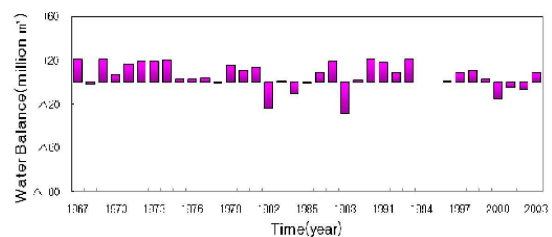
검증된 K-WEAP을 통해 수자원계획의 수요량에 따라 구축된 각각의 시나리오에 대한 2011, 2016, 2020년의 목표연도별 모든 권역의 물 부족량을 산정하였다. 물수지 분석을 통한 물 부족량은 1967년 이후 37년 동안 최대가뭄이 목표연도에 발생한다는 가정 하에서 산정하였으며 K-WEAP의 분석을 통하여 각 권역별 용수별(생활·공업용수, 농업용수, 하천유지용수)로 물 부족량을 산정하였다. K-WEAP을 통해 물수지 분석을 수행하면 물 부족량뿐만 아니라 물수요량, 공급량, 충족률, 하천유지유량 결과 등 수요처와 관련된 결과도 함께 제시한다. 또한 공급원과 공급시설로써 하천유량, 저수지운영결과, 취입·



(a) High demand Scenario



(b) Medium demand Scenario



(c) Low demand Scenario

Fig. 5. Prospects of Water Shortage in the Han River Basin (2011)

회귀수로 등의 결과를 제시한다. K-WEAP을 통해 분석한 소유역별 물 부족 결과와 함께 각 유역별 기타 공급원(농업용 저수지, 지하수, 생·공용수전용댐, 하구언 등)을 고려하여 장래 물 수급 전망을 수행하였다. 전국의 물수지 분석한 결과는 Table 2와 같다.

Fig. 2와 같이 구축된 시나리오에 대해 동시 모의를 수행한 후 각각의 시나리오별 물수지 분석 결과를 비교·분석하였으며, Fig. 5는 물 수급 전망 결과 중 한강권역의 목표연도 2011년에 대한 시나리오별 1967~2003년의 수문 조건에서 평가된 과부족량이다. Fig. 5에서 한강권역에 대해 고수요 시나리오의 경우 19회 물 부족, 기준수요에서는 18회 물 부족 및 저수요에서는 9회의 물 부족이 나타났다. 이는 공급의 신뢰도에서 48.7%(고수요 시나리오), 51.4%(기준수요 시나리오), 75.7%(저수요 시나리오)에 해당되는 결과이다.

3.2 지하수 공급가능량 평가

수문순환과정에서 지하수는 지표수와 연결되는 수원으로서 지하수를 이용하는 경우 지표수인 하천유량을 감소시킬 수 있기 때문에 지속적인 지하수 이용을 위해서는 인근의 지표수 개발과 연계하여 지하수 이용계획을 수립할 필요가 있다(건설교통부, 2006). 또한 지하수 함양량보다 과잉으로 지하수를 이용할 경우 지하수가 고갈하여 지속적인 지하수의 이용이 불가능한 상황을 초래한다. 김용제 등(2009)은 국내 전국의 112개 층적층 지하수위의 변화 분석에서 50%인 56개소에서 지하수위가 감소하고 있음을 제시하였고 현재의 지하수위 감소추세를 반영하면 2020년도까지 지하수 저류량은 약 43.1억 m^3 /년이 감소할 것으로 추정하고 있다. 따라서 장기적인 차원의 수자원계획은 지하수의 물이용 순환과정을 기반으로 현재와 미래의 지하수 이용 현황과 전망을 통하여 지하수의 지속가능한 이용범위, 지하수 이용의 취약 및 보전 지역 등을 평가할 필요가 있다.

개발된 K-WEAP을 통해 Fig. 6의 지표수-지하수의 물

이용 순환과정을 기반으로 미래의 지표수와 지하수의 연계 이용에 의한 가용 지하수량의 변동을 분석할 수 있다. Fig. 6과 같이 K-WEAP에서는 지표수-지하수 연계운동을 위해 하천의 하도구간과 지하수의 상호이동량을 입력해야 하며, 지하대수층의 초기 저수량과 총 저수량을 알아야 한다. 또한 모의단위별 지하수량의 변화를 파악하기 위해 지하수 함양량과 최대 지하수 양수량을 정의해야 한다. 이렇게 입력된 지하수 관련 입력 자료를 통해 지표수-지하수 연계모의를 수행할 수 있으며 K-WEAP은 공급우선순위와 수원선호도를 통한 물배분 우선순위와 여러 제약조건식에 의한 선형계획법을 통해 지하수로부터 수요처로 물을 공급하게 된다. K-WEAP에서 제공하는 결과로는 각 모의단위별 지하수량과 지하수로부터 수요처로의 공급량 등이다.

지표수 개발이 더 이상 불가능할 경우 현 단계에서 추가되는 모든 공급요구량을 지하수원의 개발로 대체하였을 때 지하수량의 변동을 지표수-지하수 연계 운영 평가를 통해 분석하였다. 국내에서 수행되었던 물수지 분석은 공급원으로써 지표수만을 고려하여 분석한 후 지하수를 추가 공급원으로 간주하여 물부족량을 산정하였다. 본 연구에서는 지표수와 지하수를 동시에 공급원으로 입력한 지표수-지하수 연계 운영을 통해 보다 합리적인 물수지 분석을 수행함으로써 지하수의 공급가능량을 평가하였다. 수자원계획에서 이용하였던 금강권역 물이용 순환 네트워크에 대해 목표연도를 2011년으로 선정하고 기 산정된 하천유출량 자료를 사용하여 월단위 물수지 분석을 수행하였다. K-WEAP의 지하수 관련 입력 자료는 문장원 등(2004)의 금강유역 지하수 물순환 분석에서 제시했던 분석 결과를 이용하였으며 하천 및 지하수 소유역 현황은 Fig. 7과 같다. 각각의 소유역에 지하수 노드를 추가하여 인근 수요처에서 지표수가 부족할 경우 생활, 공업, 농업용수로 현재의 펌핑 시설용량으로 지하수를 공급할 수 있도록 물순환 네트워크를 구축하였다. 가용한 지하수의 정확한 예측보다는 지속가능한 지하수의 공급가능량을 평

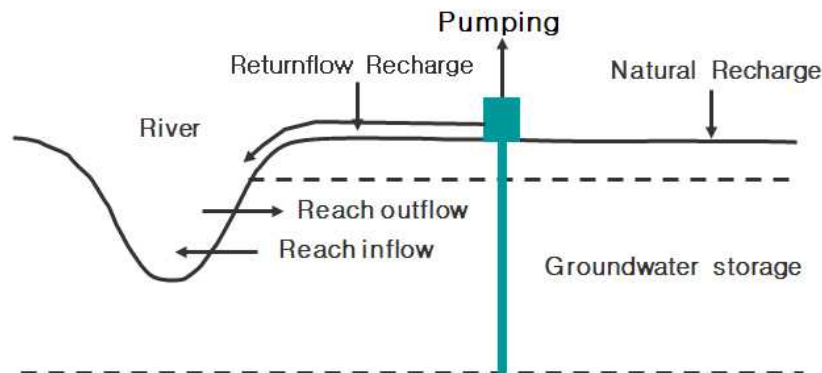


Fig. 6. Conjunctive Use of Surfacewater and Groundwater

가하고자 하였다. 따라서 지하수원의 저수용량, 최대양수량을 무한대로 가정하여 지하수량의 장기적인 변동을 평가하였다.

Fig. 8은 1967~1998년까지의 수문조건 하에서 공급원으로 지표수와 지하수를 모두 고려하여 K-WEAP을 통해 분석된 장기간 지하수 변동을 소유역별로 도시한 것이다. 미호천 (K7)과 금강하구 (K10) 유역의 경우 현재의 시설 용량에 의해 지속적으로 지하수를 이용할 경우 급격한 지하수량의 감소를 보이고 있기 때문에 증가하는 수요량에 대한 공급원으로 지하수만을 고려하는 것은 큰 문제가 발생할 것으로 판단된다. 지천과 유구천 유역 (K9), 갑천 유역 (K6), 초강천 유역 (K3)에서는 서서히 지하수량이 감소하고 있어 계획적으로 지표수와 지하수를 이용한다면 증가하는 수요량을 충분히 만족시킬 것이다. 나머지 유역에서는 지하수량이 일정하게 유지되거나 증가하고 있어

현재의 지하수 공급량을 그대로 유지할 수 있으며 물이 부족한 타 지역으로의 물이동도 가능하리라 판단된다. 이와 같이 K-WEAP은 지표수-지하수의 상호이동 및 함양량 등을 고려함으로써 물수지 분석 시 지표수-지하수 연계운영 즉 동시에 공급원으로 간주하여 분석함으로써 보다 합리적이고 지속가능한 수자원계획을 지원할 수 있다.

3.3 수량-수질 연계모의 평가

최근 수자원 개발의 한계와 수질오염은 수자원의 활용을 제한하고 있다. 수자원의 양적, 질적 제한을 적절하게 극복하기 위해서는 수자원계획 단계에서부터 수량과 수질이 종합적으로 고려되어야 한다. 또한 수질은 하천의 수량과 함께 물의 이용정도에 따라서 변동하기 때문에 하천수량-물이용량-수질의 연계평가가 필요하다. 개발된 K-WEAP은 상하류의 연속된 물의 흐름과 공급의 순환과정에서 수요처의 물 공급에 의한 하천수량의 변화와 수요처에서 배출되는 오염부하량의 변화에 따른 하천의 수질을 시간과 상하류의 연속된 공간의 변화에 따라 모의할 수 있다. 다시 말해, 수요처에서 발생하여 하수처리장에서 제거되고 지표수와 지하수로 유출되는 오염부하량 뿐만 아니라 K-WEAP에 내장되어 있는 함수를 통해 하천 수질을 모의하기 위해서는 각 수요처에서 발생하는 오염발생량 추정치 및 하천으로의 유달률을 입력하여야 한다. 또한 하수처리장에 대한 자료 (처리율, 처리용량, 방류농도), 하도구간 관련 자료 (구간거리, 수위-유량-하폭 관계, 기후자료 등) 및 하도구간으로 유입되는 점오염원과 비점오염원에 대한 유량 및 농도 자료를 입력함으로써 분석하고자 하는 수질성분에 대한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 수량-수질 연계모의가 가능하도록 개발된 K-WEAP의 검증을 위해 금강유역 석화천에 정상상태의

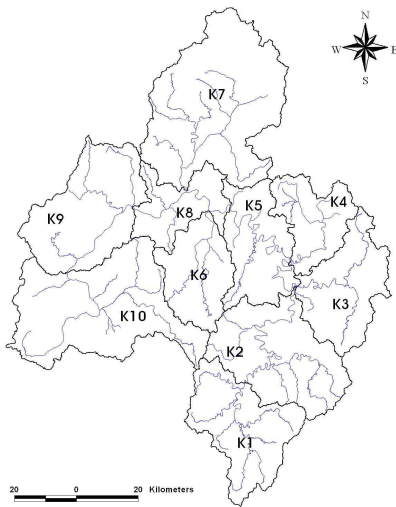


Fig. 7. River and Groundwater Basin in Geum River Basin

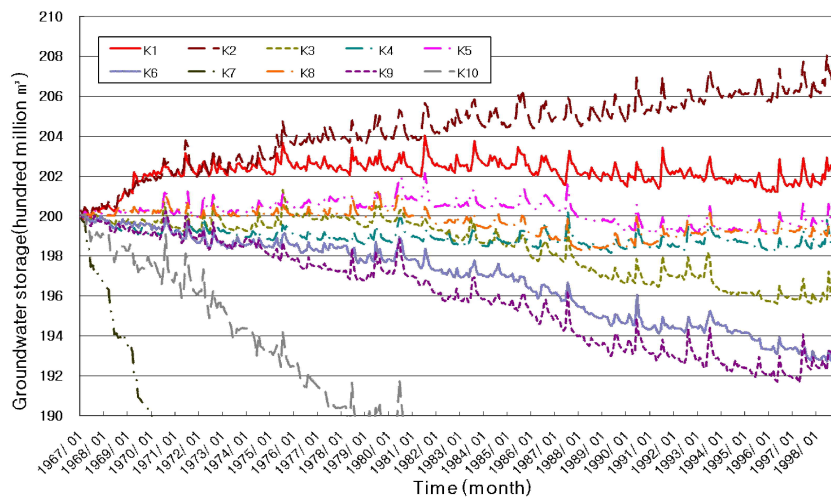
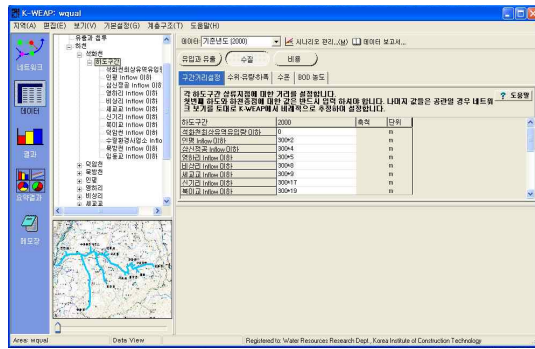


Fig. 8. Variations of Grounwater Storage in the Geum River Basin

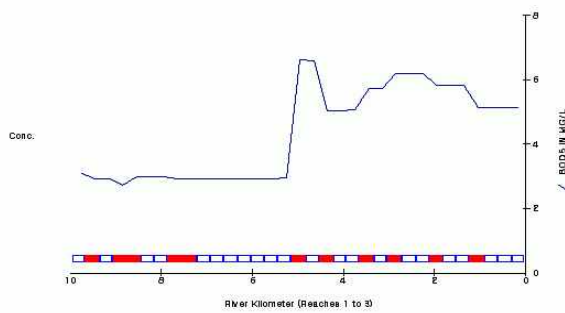


(a) Water Quality Simulation Network

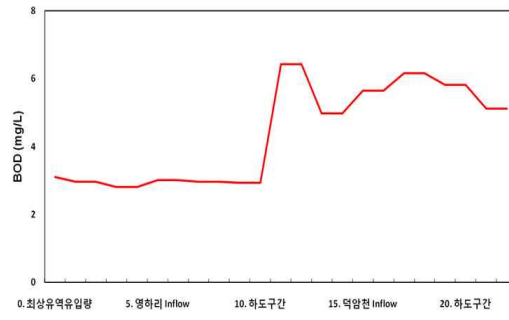


(b) Input Structures

Fig. 9. Structures of K-WEAP Water Quality Simulation



(a) QUAL2E model



(b) K-WEAP

Fig. 10. Results of Water Quality Simulation

수질 부하를 가정한 동일한 자료를 구축하여 QUAL2E와 K-WEAP의 두 모형에 동시에 적용하여 그 결과를 분석하였다. Fig. 9는 K-WEAP의 수질모의를 위하여 구축된 네트워크와 대표적인 수질모의를 위한 입력화면이다. K-WEAP을 통해 수질을 분석하기 위해서는 물수지 분석과 마찬가지로 물이용 순환 네트워크를 Fig. 9(a)와 같이 구축하여야 하며 구축된 네트워크에 존재하는 각각의 수요처, 하도구간 및 하수처리장 등에 대한 자료를 Fig. 9(b)와 같이 요소별로 입력해야만 한다.

석화천 지역의 하천 길이, 하천 단면 제원, 유량, 오염 부하량 등에 대해 두 모형에 동일한 값을 이용하였으며 모든 오염원은 점원으로 설정하였고, 두 모형에 설정되어 있는 기본 매개변수를 그대로 사용하였다. 모의 결과는 Fig. 10과 같이 동일한 결과를 보여주고 있다. 그러나 급격한 오염 부하지점의 농도변화에 있어서는 약간의 차이를 보이고 있으며 이는 K-WEAP과는 달리 QUAL2E에서는 오염부하 시 확산이 고려되기 때문이다. 두 모형의 확산관련 매개변수를 동일하게 입력할 경우에는 동일한 결과를 나타낼 수 있다. K-WEAP은 사용자가 수질에 대한 전문가가 아니라도 손쉽게 자료를 구축하고 실행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 국내 수질관련 분석에 널리 이

용되고 있는 QUAL2E와 동일한 분석결과를 나타내는 K-WEAP을 통해 수자원계획 수립 시 수량뿐만 아니라 수질을 함께 고려할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 종합적인 수자원의 평가와 계획수립을 지원하기 위해 개발된 통합수자원평가계획모형(K-WEAP)의 적용성을 평가하였다. 첫 번째로 K-WEAP을 통해 수자원장기종합계획(2006~2020)의 물수지 분석을 수행하였다. 모형의 신뢰성을 검증하기 위해 2003년 실제 관측치와 K-WEAP을 이용하여 모의된 하천유량과의 비교·분석을 수행하였으며 K-WEAP을 통한 물수지 분석이 적정하다는 것을 확인하였다. 또한 K-WEAP을 통해 여러 가지 시나리오에 대해 동시 모의를 통해 장래 발생할 수 있는 물부족량을 제시하였다. 두 번째로 금강 지역에 대해 지표수와 지하수를 공급원으로 동시에 고려한 물수지 분석을 수행함으로써 지역별 지하수의 변동 특성 및 지하수의 공급가능량을 평가하였다. 마지막으로 수량과 수질을 동시에 모의할 수 있는 K-WEAP은 수요처에서의 오염발생과 하천으로의 유달 및 하천 내에서의 수질 모의가

가능하여 종합적인 수질모의 모형의 형태를 갖추도록 개발되었다. 석화천을 대상으로 QUAL2E와의 결과를 비교함으로써 수자원계획 수립 시 수량-수질의 통합관리에 충분한 적용성을 갖고 있다는 것을 알 수 있었다.

K-WEAP은 지표수, 지하수와 대체수자원 등의 연계 운영과 수량-수질을 연계 모의하는 것이 가능하고 손쉽게 물이용 순환 네트워크를 구축하고 편집할 수 있고 데이터베이스화된 자료를 지속적으로 활용할 수 있다. 또한 뛰어난 시나리오 기능을 통해 여러 가지 정책들을 계획 속에 반영하여 평가할 수 있어 이런 K-WEAP의 특징을 잘 활용함으로써 기존 단순 물 공급만을 모의하여 수자원 계획을 수립하던 것에서 탈피해 여러 가지 대안들을 고려할 수 있는 통합적 수자원 평가와 계획수립이 가능할 것이다. 또한 지표수만을 공급원으로 분석하였던 기존의 물수지 분석 방법이 아닌 지하수를 함께 고려한 물수지 분석이 가능한 K-WEAP을 통해 장기적인 지하수의 변화를 모의할 수 있고 이에 대한 결과를 바탕으로 계획 측면에서 지하수 이용의 지속가능성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용한 사례 이외에도 K-WEAP을 통해서 유역통합관리, 지역수자원계획, 오염총량규제, 댐 운영관련 분석, 농업용 저수지에 대한 영향 평가, 간단한 경제성 분석 등 보다 폭넓은 활용이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의

지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원 (과제번호 1-5-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2000). **수자원장기종합계획 (Water Vision 2020)**. 건설교통부.
- 건설교통부 (2004). **수도정비기본계획**. 건설교통부.
- 건설교통부 (2006). **수자원장기종합계획 (2006~2020)**. 건설교통부.
- 강신욱, 이동률, 이상호 (2004). “토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 보정에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 133-144.
- 김용제, 김용철, 김규범, 문덕철 (2009). “지구환경변화에 따른 물부족 대응전략: 지하수 인공함양기술.” **2009 가물심포지엄: 가물의 역사, 현황, 대책 그리고 극복기술**, 수자원의 지속적확보기술개발사업단, pp. 213-228.
- 문장원, 이동률, 강신욱 (2004). “금강유역에 대한 지하수 물순환 분석.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 231-235.
- GWP (2003). *Sharing knowledge for equitable, efficient and sustainable water resources management: IWRM ToolBox Version 2*, Global Water Partnership.

논문번호: 09-098	접수: 2009.08.26
수정일자: 2010.04.02/06.21	심사완료: 2010.06.21