



통합수자원평가계획모형 소개

- K-WEAP (Korea-Water Evaluation And Planning System) -



이 동 일 |

한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원
dryi@kict.re.kr



최 시 중 |

한국건설기술연구원 수자원연구실 전임연구원
sjchoi@kict.re.kr

수량-수질의 통합을 기반으로 수자원 평가 및 계획을 지원하고 현장에 적용을 목표로 개발되었다. K-WEAP은 한국건설기술연구원과 SEI-US (Stockholm Environment Institute-U.S. Center)와 공동연구로 기존의 WEAP의 기능을 개선하여 우리나라의 환경과 수자원 계획수립 과정을 재현할 수 있도록 개발한 모형이다. K-WEAP은 물수지 모의시간의 다양화, 하수처리수 재이용, 물 공급의 신뢰도 분석, 하천수질 모의, 수원의 수질에 따른 수자원의 가용성을 평가하기 위해 수요처의 허용최대수질을 설정하여 공급수원의 다변화를 평가할 수 있는 기능들을 추가로 개발하였으며 사용언어를 한글화하여 기존의 WEAP과의 차별화를 도모하였다.

K-WEAP은 수요와 공급 균형을 평가하는 물수지 분석을 기반으로 운영되며 분석대상 지역으로서 도시, 농업지역, 단일 소유역이나 복잡한 하천 유역 또는 수계의 물수요-공급 시스템에 적용할 수 있다. 또한 K-WEAP은 용수목적별 수요량 분석, 수요관리, 수리권과 공급우선순위, 하천유량-지하수 연계이용, 저수지 운영, 수력발전, 수질모의 및 생태계 필요수량의 충족도 분석과 같은 광범위한 부문의 실무문제들을 다룰 수 있다.

이용자는 대상 지역의 수자원 시스템을 하천, 지하수, 저수지와 같은 다양한 공급원, 취수, 도수, 하수처리시설, 하천유지유량, 물 수요 및 오염부하량 등과 같은 항목으로 표현한다. 자료의 구조와 이들의 세부 수준은 분석 필요성이나 사용자에 따라 또는 제한된 자료에 의해 발생하는 한계들을 반영할 수 있도록 조정할 수 있다.

1. 개발 배경 및 프로그램 개요

1990년대 이후 물 관련 사회적 큰 이슈들은 전통적인 공급 중심의 계획방향과 다른 새로운 수자원 정책과 계획의 변화를 요구하였다. 수자원 계획에서 물 수요관리, 댐 건설계획 과정의 객관성과 투명성 및 수자원 개발의 명확한 기술적 타당성 확보는 중요한 요소가 되었다. 따라서 가용수자원의 연계운영, 수량-수질의 연계, 하수 재이용 등의 통합적인 수자원 평가에 의한 계획기술의 개발이 필요하게 되었다. 또한 시설물에 의한 수자원 확보와 함께 한정된 수자원의 효율적 이용에 의한 가용수량을 확대할 수 있는 기술개발도 요구되었다.

이런 배경에서 개발된 K-WEAP(Korea-Water Evaluation And Planning System)은 21세기 프론티어연구개발사업의 “수자원의 지속적확보기술개발사업단”의 지원 하에 개발된 한국형 통합수자원평가 계획모형이다. K-WEAP은 가용수자원의 연계이용,

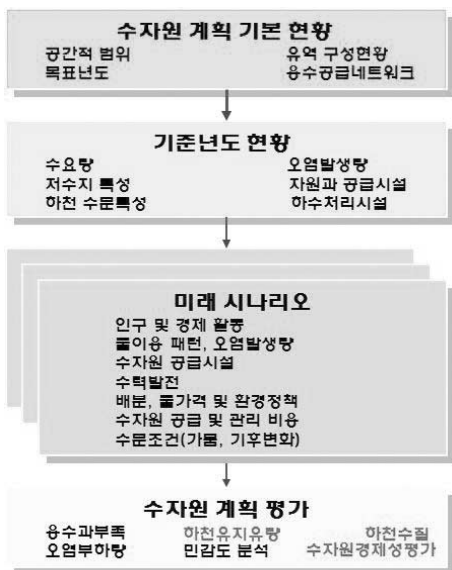


그림 1. K-WEAP의 수자원계획과정

K-WEAP에 의한 수자원 계획과정은 일반적으로 4단계 과정을 통하여 적용된다. 먼저 수자원 계획의 기본현황으로서의 계획 목표연도, 대상지역의 공간적 경계, 지역 내 수요-공급 관련 현황들이 반영된 네트워크를 구성한다. 두 번째 과정은 계획 기준년도 시스템 현황으로서 실제 용수수요량, 오염부하량, 공급수원과 공급시설, 하천수문특성 및 하수처리시설 등에 대한 현황을 파악한다. 세 번째는 미래의 시나리오를 설정하는 것으로서 정책, 비용, 물 관리 기술발전과 수요, 오염, 공급 및 수문조건에 영향을 미치는 요소들을 기초로 미래를 가정하고 대안을 구성한다. 최종적으로 K-WEAP은 이 시나리오들에 의한 물 부족량, 하천수질, 하천유지유량의 충족도 및 주요 변수들의 불확실성에 대한 민감도들에 대해 평가하게 된다 (과학기술부, 2004).

2. K-WEAP의 주요 기능

2.1 시나리오 생성과 관리

K-WEAP은 미래 상황에 대한 사회·경제·환경

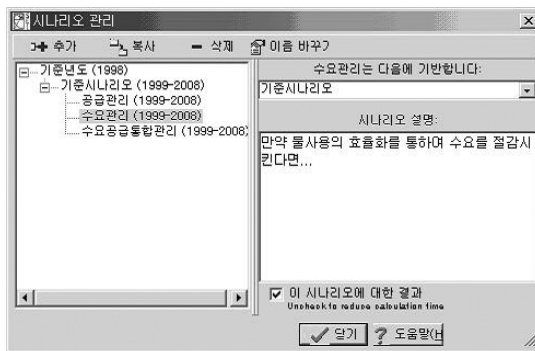


그림 2. 시나리오 생성과 관리

인자들의 변화를 다양한 시나리오로 구축하여 분석할 수 있다. 또한 장애인구, 수요관리정책, 공급관리, 하천생태유량, 기후변화 및 경제성장 등 다양한 시나리오 인자의 변화에 대해 의사결정수행도를 이용하여 여러 가지의 시나리오를 손쉽게 구축하고 동시에 이들을 분석할 수 있는 기능을 가지고 있다. 이렇게 구축된 시나리오들이 대상 지역의 수자원 시스템에 미치는 영향은 서로 비교하기 쉽도록 결과에서 동시에 평가할 수 있다.

2.2 물이용 순환 네트워크 구축

K-WEAP에서는 대상 지역의 하천유역을 배경으로 GIS를 통해 화면상에 하천, 공급시설, 수요처, 하수처리장 등을 실제와 같이 물리적인 수자원 시스템으로 재현을 통해 물이용 순환 네트워크를 구축할 수 있다. K-WEAP에서는 화면 좌측상단에 있는 공급원(하천, 댐, 지하수), 취·배수로, 수요처 및 하수처리장, 유량관측소 등의 각 객체를 끌어넣기 방식으로 실제와 같은 물리적인 물수급망의 위치에 구축할 수 있다. K-WEAP은 유역의 위치 및 특성 등을 공간적으로 표현할 수 있도록 데이터 구성과 모형 구조를 그래픽의 객체 지향적으로 개발되었다. 따라서 K-WEAP에서는 새로운 공급시설과 수요처 등을 손쉽게 추가하거나 삭제할 수 있고 수정된 내용이 자동적으로 계산과정에 반영되어 물리적인 요소의 변동을 손쉽게 할 수 있어 수자원 평가의 효율을 획기적으로 향상시



켜준다.

물수급망에 구축된 각각의 공급원과 수요처의 객체에는 공급과 수요의 제약조건 등 필요한 데이터를 입력하게 되어있다. 데이터는 여러 가지 조건들을 K-WEAP에서 제공되는 함수와 수식을 통해 입력할 수 있어 사용자가 원하는 형태로 모형구축이 가능하며 특히 엑셀과의 호환을 통해 자료 입력이 보다 쉽도록 개발되었다. 데이터 입력 시에는 기준년도 뿐만 아니라 비교·분석하고자 하는 여러 가지 대안을 통해 개발된 시나리오에 대한 데이터도 입력해야 한다.

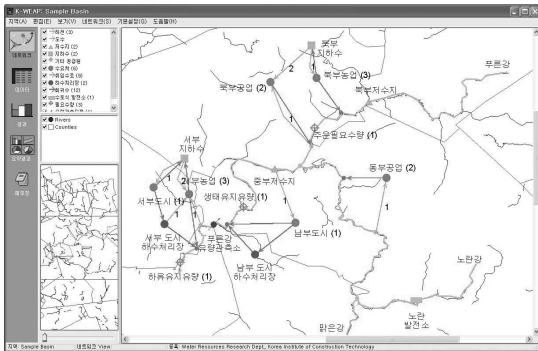


그림 3. 물이용 순환 네트워크 구축

2.3 수요량과 수요관리

K-WEAP은 외부에서 산정된 수요량을 직접 입력할 수 있고 내부에서 추정할 수도 있다. 또한 수요관리의 평가를 위해 보다 세분화된 수요량을 추정할 수 있게 개발되었다. 사용자는 용수사용의 목적과 방법에 따라서 최종 용도까지 단계를 구분하고 원단위와 인구, 산업 등의 사회·경제지표를 이용하여 수요를 추정하는 방법을 각각 다르게 설정할 수 있다. 즉 다단계로 용수의 목적을 분류하여 수요 추정이 가능하도록 하고 있으며, 최종적으로 사용하는 기기에 따른 분류까지도 포함할 수 있도록 세분하여 자료를 구축하고 수요를 추정할 수 있다. 이를 통해 수자원 시스템에서 수요관리의 영향을 평가할 수 있는 독특한 기능을 가지고 있다. 생활, 공업 및 농업용수 부문별 수요는 최종적으로 사용되는 각 용수 이용기기 및 공급

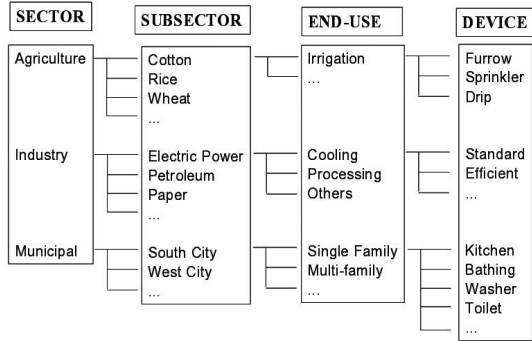


그림 4. 수요량 및 수요관리 구조

방법의 효율성을 파악하여 수요관리 분석을 위한 기반으로 제공하는데 목적이 있으며, 절수기술의 개선과 물 값에 대한 물 수요량의 변화효과를 평가할 수 있다.

2.4 하천수 공급 시나리오 결정

K-WEAP은 내부에 강우-유출 모형을 가지고 있지 않기 때문에 하천유량은 별도로 산정할 필요가 있다. K-WEAP에서는 하천유량을 외부에서 산정하여 ASCII 데이터 파일 형태로 읽어 들일 수 있는 방법이 있고, 자체 내에서 평균, 극한풍수 및 갈수년도 등을 설정하여 입력하거나 수식에 의해 하천유량을 표현할 수 있다.

2.5 우선순위를 이용한 물 수급 모의

K-WEAP은 지표수, 지하수, 대체수자원 등 다양한 공급원에 대해 수요처 공급우선순위와 수요처의 수원선호도를 기반으로 하는 우선순위 시스템을 적용한 물수지 분석을 통해 실제와 유사한 용수수급상황을 재현할 수 있다. 공급우선순위란 여러 개의 수요처 중에 어떤 수요처에 먼저 물을 공급하여야 할 것인가를 결정하기 위해서 사용되며 수요처의 수원선호도는 수요처로 유입되는 공급원이 여러 개일 때 어떤 공급원에서 먼저 취수하기를 원하는가 하는 것이다.



2.6 선형계획법을 이용한 물 배분

수요처의 수요량 공급을 최대화하고 공급우선순위와 수요처의 수원선호도, 물수지 및 기타 제약조건을 고려하여 물 배분 문제를 풀기 위하여 표준선형계획법이 사용된다. K-WEAP은 수요처의 수요량에 대한 공급충족률(공급량/수요량)을 최대화하고 동일 우선순위를 갖는 수요처에 동일한 충족률을 보장하기 위하여 선형계획법을 이용한다. 물수급망은 공급원, 수요처, 저수지, 합류점, 취수지점, 회귀지점 등의 노드(Node)와 하도, 취입수로, 회귀수로, 도수로 등의 링크(Link)로 구성되며 각각의 노드와 링크는 물수지 원리에 의하여 제약조건을 갖는다. K-WEAP의 목적이 모든 수요처에 대한 충족률을 최대화하는 것이기 때문에 목적함수는 최종충족률을 최대화하는 것이다. 같은 우선순위를 가진 모든 수요처의 요구량을 만족시킬 수 있는 충분한 양의 물이 없는 경우 K-WEAP은 모든 수요처의 수요 요구량에 대한 같은 비율만큼만 만족시키게 된다. 다시 말해 모든 수요처의 우선순위가 동일하다면 최종충족률을 최대화함으로써 가용한 수자원을 모든 수요처에 공평하게 배분할 수 있다.

K-WEAP은 우선순위 1을 가진 수요처에 물을 먼저 분배하고 그 이후에 우선순위 2, 3, ... 등 하위순위에 대해 순차적으로 계산한다. 따라서 선형계획법은 각각의 우선순위와 모의단위에 대해 모두 적용된다. 우선순위 1에 대해 계산할 경우, K-WEAP은 일시적으로 우선순위 2와 그 아래 우선순위에 대한 수요는 고려하지 않으며 우선순위 1을 가진 모든 수요처의 최종충족률을 최대화시키도록 물을 배분한다. 우선순위 1에서 결정된 최종충족률과 유량들은 우선순위 2에 대한 선형계획법 적용 시 고정된 상수 값으로 사용됨으로써 우선순위 2를 가진 모든 수요처의 최종충족률을 구할 수 있는 것이다. 이 과정은 최하위 우선순위까지 축차적으로 반복되고 모든 수요처에 대한 물수지 계산이 완료된다.

2.7 저수지 운영

K-WEAP에서는 총 저수량을 4개의 저수공간으로 구분하여 운영한다. 홍수조절용량은 홍수 시 조절을 목적으로 사용하는 용량으로 하류의 수요와는 상관없이 방류되는 양이다. 따라서 이 영역은 홍수기에는 항상 비어있게 된다. 유효저수량은 하류에서 공급요구가 있을 시 필요한 수량만큼을 방류한다. 조절방류용량은 가뭄기간에 물 부족 피해를 경감하기 위하여 조절방류가 적용되는 공간으로 하류 필요수요량에 대해 공급요구량 전체를 방류하지 않고 필요수요량의 일정비율(조절방류계수)만큼만을 방류하게 된다. 조절방류계수를 1이라 가정하면 하류의 수요가 완전히 만족될 때까지 조절방류용량의 물을 모두 방류하게 됨으로써 유효저수량과 같은 역할을 하게 된다. 사수량은 사용이 불가능한 저수량을 의미한다. 저수지 운영은 4개의 저수공간과 조절방류계수를 통해 이루어지며 총 저수량과 사수위는 결정되어야 하는 값인 반면, 상시만수위와 조절방류수위, 조절방류계수는 시간적 특성에 따라 그 값을 변화시킬 수 있어 저수지 운영을 유연하게 할 수 있는 장점을 가지고 있다. K-WEAP에서는 저수지군으로 운영될 때에는 각 저수지가 동일한 비율의 유효저수량을 유지할 수 있도록 각 저수지의 방류량을 조절한다.

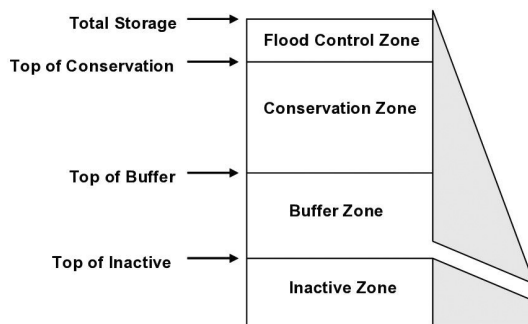


그림 5. 저수지 운영

2.8 지표수-지하수 연계이용 평가

K-WEAP은 지표수와 지하수의 연계 이용에 의한

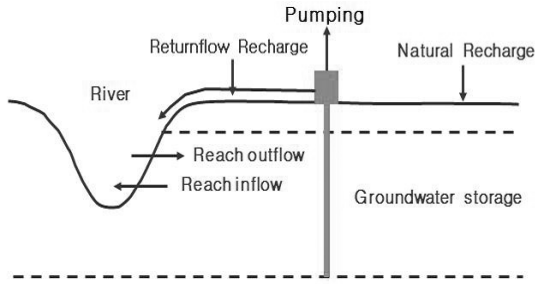


그림 6. 지표수, 지하수 연계운영

지하수의 영향을 평가할 수 있다. 기본적인 평가방향은 지하수 함양량과 유출 및 펌핑 등 지하수 물순환 체계를 구축하고 장래 펌핑에 의한 가용 지하수량의 변동을 분석하는 것이다. 장기적으로 지하수 이용이 과다하면 지하수량의 함양보다 펌핑이 많아 가용 지하수는 지속적으로 감소하여 회복할 수 없는 단계까지 이를 수 있다. K-WEAP에서는 미래의 지하수 이용량을 평가하여 지하수량의 감소가 예측되면 지표수로 수원을 전환할 수 있는 정보를 제공할 수 있다.

2.9 오염부하량 산정 및 하천수질모의

K-WEAP에서는 오염부하량 원단위를 이용하거나 회귀수 오염농도를 기반으로 오염원으로부터의 오염 발생량을 추정하고 오염원에서 하천까지의 저감효과 등을 고려하여 하천에 대한 오염부하량을 산정할 수 있으며, 점오염원 및 비점오염원의 하천오염부하에 대해 보존성 수질성분과 BOD, DO 등의 1차 분해성 수질성분에 대한 하천수질을 모의할 수 있는 기능이

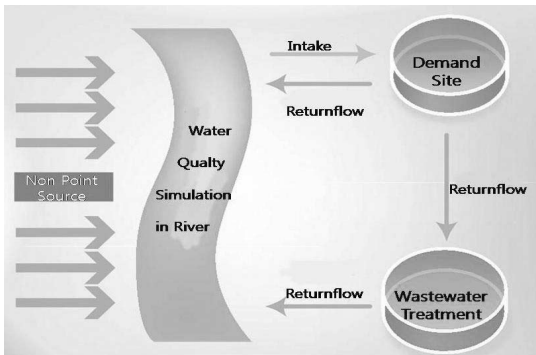


그림 7. 하천수질모의

있다. 점오염원은 하천으로 연결되는 회귀수로 표현되며, 비점오염원의 유량이나 부하량은 주하천의 길이를 따라서 일정하게 분포되거나 지류의 유입과 연결되는 점오염원으로 표현된다.

또한 보다 정확하고 다양한 하천수질 분석을 위해서 여러 오염원(pH, 질소, 인, 수온, BOD, 병원균, 조류 등)을 고려할 수 있도록 QUAL2E를 업그레이드 시킨 QUAL2K를 K-WEAP과 연계시킨 K-WEAPq(Korea-Water Evaluation And Planning System Linked QUAL2K)를 개발하였다.



그림 8. K-WEAPq 모의과정

2.10 수요처 최대허용수질기준 설정 기능

어떤 수요처에 풍부한 수원이 있어도 수질이 용도별 기준을 초과하면 수요처에서 이용할 수 없는 경우도 발생한다. 이런 경우 수량보다는 수질에 의해 달라지는 물 부족량을 평가할 필요가 있다. K-WEAP에서는 수요처에 수요량을 공급할 때 최소 수질기준을 설정하기 위해 용도별 최대 허용농도를 입력한다. 이 허용농도는 공급량의 제약조건이며, 수요처로 공급되는 모든 공급 가능량의 수질은 입력된 최대농도를 넘지 않아야한다. 수요처의 공급원이 다수라면 공급된 유량의 가중평균농도치가 최대 허용농도를 초과할 수 없다. 이는 선형계획법에 의한 물배분에서 새로운 제약조건이 된다.

2.11 수자원 시스템의 경제성 분석

K-WEAP의 경제성평가는 시나리오와 관련된 비



용 및 편익을 계산하는 방법을 제공한다. K-WEAP의 물수급망에 포함된 저수지, 취입수로, 하천, 도수, 회귀수로, 지하수 공급, 기타 공급원, 수력발전소, 하수처리장 및 수요처 각각의 항목에 고정비용과 변동비용, 고정수익과 변동수익을 입력하고 자본비용, 고정수익 및 운영비용은 전체 시스템에 입력할 수 있다. 경제성 분석 결과로는 순비용, 현재 순가치, 연평균 물값의 세 가지 형태로 제공된다.

2.12 K-WEAP의 결과와 정보 표출

K-WEAP을 통해 분석된 결과는 표와 그래프 및 지도 형식으로 제공된다. 물수요량, 물 부족량, 유자유량부족량 등의 수요량 정보, 하천유량, 저수지저수량, 지하수저수량, 회귀수량 등의 공급원정보, 하천수질, 오염부하량, 오염발생량 등의 수질 정보, 순비용, 현재 순가치, 연평균 물값의 경제성 평가결과 및 자료의 입력에러를 확인할 수 있는 K-WEAP 입력정보 등을 제공한다. 이들 정보들은 다시 엑셀로 내보낼 수 있게 하여 자료의 편집과 분석의 가용성을 높였다. 기준년도와 개발된 시나리오에 대한 결과 및 각각의 시나리오에 대해 사용자가 선택한 항목의 요약된 결과를 그래프와 표로 보여줌으로써 시나리오에 따른 결과들을 간단하게 비교해 볼 수 있으며, 요약결과는 엑셀로 내보내져 보고서 형식으로 작성하는데 도움을 준다. 또한 K-WEAP의 메모장 기능을 통해 분석 대상지역의 네트워크 구축 및 분석 시 필요한 메모나 조건 등을 입력해 놓을 수 있어 시스템에 대한 내용을 누구라도 쉽게 알아볼 수 있도록 하여 이해관계자들이 같은 모형을 통해 서로의 의견을 조율할 수 있는 참여 기반과 계획의 투명성을 조성하는데 도움을 줄 수 있다.

2.13 기타기능

K-WEAP은 앞서 기술한 기능과 함께 수요처와 하수처리장 회귀수를 다른 수요처에서 재이용할 수 있

으며, 수질모의결과의 검정, 물 공급의 안전도나 신뢰성을 평가하기 위해 연간 발생하는 물 부족의 일수나 특정유량의 발생비용 또는 확률을 보여줄 수 있는 초과비용 그래프 제공 등 다양한 기능을 갖추고 있어 보다 현실적인 유역관리가 가능하며 종합적인 수자원계획 및 평가가 가능하다. K-WEAP에 대한 소개 및 기능, 관련 자료 등을 제공하기 위해 2004년부터 K-WEAP 홈페이지(<http://www.drought.re.kr/>)를 개통하여 운영하고 있다.

3. 가격 및 유지관리

K-WEAP은 2004년 이후 인터넷 홈페이지 등 온/오프 라인을 통하여 평가판 및 관련 자료를 제공하고 있으며 2004년 DATAPCS와 K-WEAP에 대한 기술 실시계약을 체결함으로써 국내 판매를 시작하였다. 2009년에는 한국토코넷(주)와 K-WEAP의 기능을 향상시킨 K-WEAPq에 대한 국내 판매에 대한 기술 실시계약을 체결하였다. 현재까지 20 copy 정도가 판매되었으며, 비영리기관의 경우는 70만원, 영리기관의 경우 300만원의 가격으로 판매되고 있다. 기존의 K-WEAP을 구입한 경우 비영리기관의 경우 20만원, 영리기관의 경우 50만원의 가격으로 K-WEAPq로 업그레이드 할 수 있다. K-WEAPq에 대한 교육을 원하는 기관에 대해서는 비영리기관은 1인당 30만원, 영리기관의 경우 1인당 50만원의 가격으로 교육을 실시하고 있다.


사용자들의 편의를 위해 K-WEAP 사용자 안내서를 발간하여 제공하고 있으며, 지금까지 3회의 사용자 교육, 다수의 전시회 및 국제공동워크숍 등을 개최함으로써 K-WEAP 개요, 특징 및 적용 사례 등을 소개한 바 있다. 또한 K-WEAP에 대한 보다 많은 정보를 원하는 기관에 대해서는 교육을 실시함으로써 사용자가 더욱 손쉽게 K-WEAP을 활용할 수 있게 지원하고 있다.

K-WEAP은 향후 유역 차원의 수자원 평가 및 계



획수립과 우선순위와 선호도에 따른 합리적인 수자원 배분, 수자원 정책 연구 및 이해관계자의 참여유도, 수자원계획의 전문 능력 향상, 지역간 물 분쟁 해결, 오염총량규제 등에 폭 넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 1-5-2)에 의해 수행되었습니다. 

참고문헌

1. 과학기술부(2004), K-WEAP 사용자 안내서, 한국건설기술연구원.