

지속가능한 하천관리를 위한 금강의 환경유량 산정

Environmental Flow Assessment for Sustainable River Management in Guem River

김정곤¹⁾, 김기형²⁾, 고익환³⁾, 박상영⁴⁾, 서진원⁵⁾, 장창래⁶⁾

Jeongkon Kim, Geehyoung Kim, Ickhwan Ko, Sangyoung Park, Jinwon Seo, Changlae Jang

요 지

최근 하천의 모습은 이수 및 치수를 위해 설치된 수공구조물과 각종 오염원으로 인한 수질악화, 산업화 및 도시화에 따른 물순환시스템의 변화로 하천의 물순환 시스템이 바뀌게 되고 하천을 찾는 시민들의 환경의식 미성숙으로 인한 직간접적인 하천오염 활동이 이루어지고 있다. 하천에 대한 이러한 변화는 수질, 수량 및 하천의 구조적 측면에서 하천 생태계에 많은 영향을 끼치고 있다. 따라서 하천의 정상적인 기능을 회복시켜 하천 생태계 보전과 환경적으로 안정된 하천 조성이 이루어지도록 하기 위해서는 하천을 보다 자연스럽고 지속적으로 관리하기 위한 효율적인 환경유량의 관리가 필요하다.

하천의 전체적인 생태시스템을 고려한 환경유량의 관리를 위해서는 기존 환경유량의 개념, 산정방법 등 현황을 분석하고 하천 생태계에 영향을 미치는 인자들에 대한 관리방안을 마련하는 것이 중요하다.

본 연구의 목표는 하천생태계에 대한 영향인자의 장단점을 분석하고 이들이 어느 정도의 영향을 미치고 있는지를 정량적으로 파악함으로써 사회적으로 요구되는 환경유량을 산정할 때 어류 및 식생 등 하천의 생태계와 하천의 수량 및 수질, 하천의 수리구조물 등 하천의 구조적인 변화를 고려할 수 있는 방안을 마련하는 것이다. 이를 위하여 우선적으로 국외 선진국에서 활용되고 있는 다학제간 전문가 그룹(Multi-disciplinary Expert Team, MET)을 통해 하천 생태시스템을 분석하고 환경유량 산정 모형을 활용하여 저수지 댐과 연계 운영 함으로써 어류 및 식생 등 생태서식처와 사회환경 개선에 필요한 유량을 유지할 수 있는 방안을 적용하고자 한다.

본 연구에서는 대상유역인 금강유역에 대해 환경유량을 산정하기 위한 개념모형을 구축하였다. 개념모형은 대청댐 건설 이전, 대청댐 건설이후~용담댐 건설 이전, 대청댐과 용담댐 건설 이후 등 3개의 시나리오를 통해 하도 및 수변공간과 유량변화에 따른 유황분석 등을 통해 손실된 생태시스템을 정량화하여 궁극적으로는 복원을 위한 대응방안을 마련하도록 할 수 있도록 구축되었다. 또한 댐으로 인한 하류지역의 영향범위 및 하천생태계에 미친 영향을 감소하기 위하여 적절한 환경유량을 산정하기 위한 것이다. 구축된 개념모형을 바탕으로, 금강유역에 대한 기초적인 수문, 하천특성, 현장조사 등을 실시하였다.

향후에는 본 연구결과를 기초로 하여 환경유량을 산정하기 위한 모형을 개발하고 산정된 환경유량을 확보 및 관리하기 위한 방안과 친환경적인 댐 운영방안을 마련하게 될 것이다.

1. 서 론

최근 하천의 모습은 이수 및 치수를 위해 설치된 수공구조물과 각종 오염원으로 인한 수질악화, 산업화 및 도시화에 따른 물순환시스템의 변화로 하천의 물순환 시스템이 바뀌게 되고 하천을 찾는 시민들의 환경의식 미성숙으로 인한 직간접적인 하천오염 활동이 이루어지고 있다. 하천에 대한 이러한 변화는 수질, 수량 및 하천의 구조적 측면에서 하천 생태계에 많은 영향을 끼치고 있다. 따라서 하천의 정상적인 기능을 회복시

- 1) 정회원·수자원연구원 수자원환경연구소 책임연구원-E-mail: jkkm@kwater.or.kr
- 2) 정회원·수자원연구원 수자원환경연구소 위촉연구원-E-mail: water0418@paran.com
- 3) 정회원·수자원연구원 수자원환경연구소장-E-mail: ihko@kwater.or.kr
- 4) 정회원·수자원연구원 수자원환경연구소 선임연구원-E-mail: sypark119@kwater.or.kr
- 5) 비회원·수자원연구원 수자원환경연구소 선임연구원-E-mail: jinwonseo91@kwater.or.kr
- 6) 정회원·수자원연구원 수자원환경연구소 선임연구원-E-mail: cjang@kwater.or.kr

켜 하천 생태계 보전과 환경적으로 안정된 하천 조성이 이루어지도록 하기 위해서는 하천을 보다 자연스럽게 지속적으로 관리하기 위한 효율적인 환경유량의 관리가 필요하다.

하천의 전체적인 생태시스템을 고려한 환경유량의 관리를 위해서는 기존 환경유량의 개념, 산정방법 등 현황을 분석하고 하천 생태계에 영향을 미치는 인자들에 대한 관리방안을 마련하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 대상유역인 금강유역에 대해 환경유량을 산정하기 위한 개념모형을 구축하였다. 개념모형은 대청댐 건설 이전, 대청댐 건설이후~용담댐 건설 이전, 대청댐과 용담댐 건설 이후 등 3개의 시나리오를 통해 하도 및 수변공간과 유량변화에 따른 유황분석 등을 통해 손실된 생태시스템을 정량화하여 궁극적으로는 복원을 위한 대응방안을 마련하도록 할 수 있도록 구축되었다. 또한 댐으로 인한 하류지역의 영향범위 및 하천생태계에 미친 영향을 감소하기 위하여 적절한 환경유량을 산정하기 위한 것이다. 구축된 개념모형을 바탕으로, 금강유역에 대한 기초적인 수문, 하천특성, 현장조사 등을 실시하고 금강유역의 유출량 자료를 이용하여 금강유량의 시계열 분석을 실시하였다. 본 논문에서는 환경유량을 산정하기 위한 기본적인 절차와 활용되는 모형에 대해 기술하였다.

향후에는 본 연구결과를 기초로 하여 환경유량을 산정하기 위한 모형을 개발하고 산정된 환경유량을 확보 및 관리하기 위한 방안과 친환경적인 댐 운영방안을 마련하게 될 것이다.

2. 환경유량 산정을 위한 준비

2.1 대상유역 현황

금강유역은 동경 126°41' ~ 128°25', 북위 35°35' ~ 37°05'에 걸쳐 남한의 중앙 북서측에 위치하며 유역면적이 9,835.3km³, 본류의 유로연장은 395.9km, 유역평균폭 24.8km, 유역형상계수 0.063인 남한 제3의 유역으로 남한면적의 약 1/10을 차지한다. 유역의 지세는 북쪽으로 차령산맥을 끼고 남한에서 제일 큰 한강유역에 접해있으며, 동쪽은 소백산맥에 접해 있어 남한에서 두 번째로 큰 낙동강유역과 접하고 있다. 또한 남쪽은 섬진강 및 만경강 유역에 접해있고 서쪽으로는 황해에 연하여 있으며 유역의 동서장은 130km, 남북장은 160km이다.

유역내 주요 지류는 상류로부터 남대천, 봉황천, 송천, 갑천, 미호천, 유구천, 지천, 논산천 등이 있으나, 미호천을 제외한 유역들은 본류 면적의 3~6% 정도밖에 되지 않는 소하천들이다. 금강본류는 소백산맥의 주봉인 해발 1,594m의 덕유산에서 발원하여 북쪽으로 흐르다가 중류 옥천부근에서 노령산맥을 관입사행하면서 지류 미호천과 합류되는 곳에서 남서쪽으로 흐르다가 마침내 군산지점에서 서해로 유입한다. 하류유역 강경부근을 제외하고는 평야부가 거의 없는 편이며 본류에 유입되는 대부분의 지류는 거의 만곡됨이 없이 직류하고 그 양안은 500~1,000m의 폭을 가진 협장한 곡저평야를 형성하고 있다. 이들 지류의 하천구배는 일반적으로 급한 편이다(그림 1).

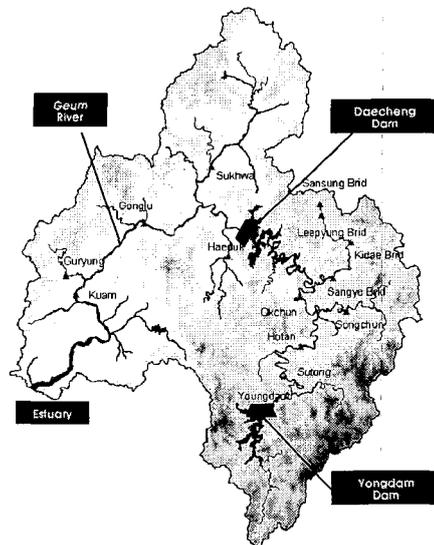


그림 1. 금강유역의 주요하천 현황

2.2 Conceptual Model

하천 및 홍수터의 생태계는 시간과 공간에 따라 변화하는 물리적 구성요소와 생물학적 구성요소로 이루어진 복잡한 환경을 이루고 있다. 시공간적인 생태계 구조는 생태계를 구성하는 물리적 틀에 유입되거나 관통하는 수문특성에 의해 만들어지고 유지된다. 결국 환경유량의 산정은 대상하천에 대해 적용 가능한 많은 시나리오를 통해 물리적 모델과 생화학적 모델을 적용함으로써 손실된 생태시스템을 정량적으로 파악하여 이에 대한 대책으로써 하천생태를 회복하는데 필요한 적정한 유량을 결정하는 것이다.

따라서 환경유량을 산정하기 위한 일련의 분석과정을 수행하기 위해서는 개념모형이 필요하다. 개념모형은 수문특성 및 하천환경특성 변화가 생태계에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여 정량화 하는 방법이다. 따라서 환경유량 산정을 통해 하천의 생태기능을 회복하여 지속가능한 하천관리를 위지하기 위해 구축되는 개념모형은 대상하천의 특성뿐만 아니라 유역의 개발현황에 따라 적절하게 구축되어야 한다. 본 연구에서는 대상유역인 금강유역에 대해 환경유량을 산정하기 위한 개념모형을 구축하였다. 개념모형은 대청댐 건설 이전, 대청댐 건설이후~용담댐 건설 이전, 대청댐과 용담댐 건설 이후 등 3개의 시나리오를 통해 하도 및 수변공간과 유량변화에 따른 유황분석 등을 통해 손실된 생태시스템을 정량화하여 궁극적으로는 복원을 위한 대응방안을 마련하도록 할 수 있도록 구축되었다. 또한 댐으로 인한 하류지역의 영향범위 및 하천생태계에 미친 영향을 감소하기 위하여 적절한 환경유량을 산정하기 위한 것이다. 그림 2는 대청댐과 용담댐이 설치되어 있는 금강유역에 적용하기 위해 미국 Lower Kootenai River의 개념모형(Jorde, 2004)을 수정하여 개발된 개념모형이다. 위에서 언급한 주요 하천구조물 외에도 유역의 변화에 대한 영향인자들을 종합적으로 고려할 수 있도록 구축 되었다.

그림 2에 나와 있는 바와 같이, 금강유역의 초기에는 대청댐과 용담댐 모두 건설되지 않은 상태로 물리적 특성과 수문특성은 자연(참고)상태로 가정될 수 있으며, 이후 대청댐 건설에 따라 물리적 특성 및 수문특성이 변화하게 된다. 이후 용담댐이 건설된 이후에는 또 다른 변화가 진행되었을 것이다. 그림에서 수평방향의 화살표는 현재 상황과 비교되는

하천 및 홍수터의 이력을 나타내는데 이 화살표가 제시하는 방향에 따라 모의가 진행되며 이를 통해 다른 이력이나 현재의 상태와 비교할 수 있는 물리적 과정을 표현하는 결론을 얻을 수 있다. 또한 현재의 홍수터 상황에 따른 수문특성을 조합하여 가상적인 상황을 모의하는 것도 가능하다. 물리적 과정의 모의 결과는 특정 유기체나 유기체 집단의 서식처 특성을 모의하는 생물학적 영역과 연계될 수도 있다. 이를 통해 최종적으로 모의결과에 의해 다양한 시나리오(그림 3)를 생태계 기능 상실의 관점에서 정량적으로 비교할 수 있다.

물리적 특성, 수문특성, 댐운영 등의 3가지 지배인자들의 조합을 통해 하도 및 홍수터의 서식처를 결정할 수 있다. 즉, 특정한 서식처는 하천 및 홍수터 시스템에서 생태적인 기능이나 상황을 결정하게 되는 것이다. 시나리오는 과거의 상황을 재현하거나 개별적인 외부요인의 영향을 결정하거나 개선을 위한 미래의 댐 운영을 평가하도록 선정할 수 있다. 이때 과거의 상황을 재현하는 시나리오는 기준 시나리오가 된다. 과거 시나리오를 통해 시간에 따른 시스템의 변화를 검토할 수 있다. 개별적인 외부영향의 효과를 분리하기 위해서 지배인자에 대한 다양한 조합이 필요할 수도 있다.

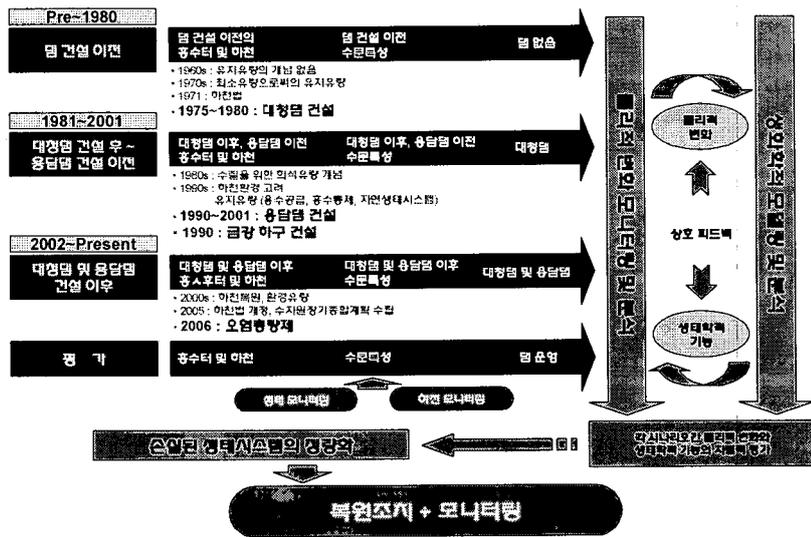


그림 2. 금강유역 하천생태계 영향평가를 위한 개념모형도

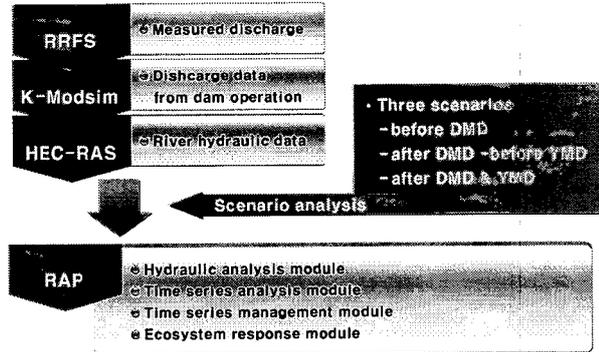


그림 3. 개념모형에 따른 시나리오 분석 절차

3. 환경유량 산정 방법

3.1 환경유량 산정 절차

환경유량의 산정은 단순히 어류생태만을 고는 것이 아니라 하천의 전반적인 생태시스템을 모두 고려하여야 하는데, 이를 위해 하천생태영향인자를 고려할 수 있는 RAP을 활용하였다. RAP을 운용하기 위해서는 RAP 이외의 모형으로부터 기본적인 입력자료를 제공받아야 하는데, 주로 하천의 수리, 수문, 생태자료가 그것이다. 하천의 수리자료는 HEC-RAS를 통해 제공받는데 대상 하천구간의 지형자료와 유량, 유속, 수심 등이며, 수문자료는 장기간의 유황자료로써 RRFs, K-ModSim 등의 모형을 통해 제공받으며, 생태자료는 어류, 식물, 조류, 저서생물 등 각 분야별로 만들어진 기초자료를 해당 분야의 전문가들로 구성된 다학제간 전문가 그룹(Multi-disciplinary Team, TEM)을 통해 각 분야의 상관성을 분석하여 제공받아 이를 기초자료로 활용하여 분석된 RAP의 결과는 다시 MET의 평가를 통해 feedback되어 최종적으로 하천의 생태 복원을 위한 대응 방안으로써 환경유량을 산정하게 된다(그림 4).

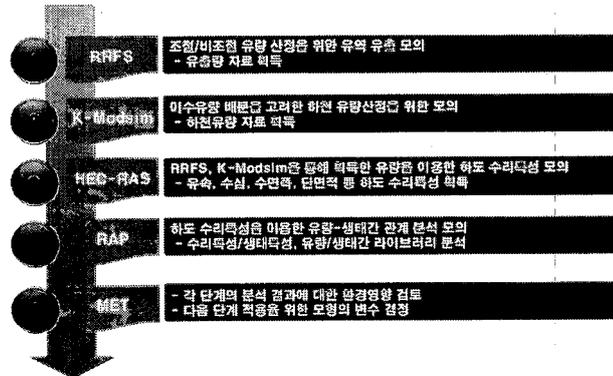


그림 4. 환경유량의 산정 절차

3.2 유역 유출 유량 산정

환경유량 연구는 광범위하고 다양한 수리, 수문, 생태자료를 필요로 한다. 본 연구에서는 K-ModSim모형을 이용하여 설정된 시나리오에 따른 유량자료를 생산하고, 시계열적인 유황 변화를 분석하였다.

KModSim모의를 위하여 금강유역을 14개 소유역으로 구분하고 일 단위 네트워크를 구성하였다. 금강유역에서 저류용량 1,000만³m 이상인 댐은 총 6개로써 다목적댐 2개소, 농업용수전용댐은 3개소로 백곡지, 미호지, 탑정지, 그리고 금강하구둑 1개소가 있다. 대형다목적댐의 유역면적은 금강유역의 총 32.3%인 3,204km², 발전시설용량은 90MW, 총 저수용량은 1,490×10⁶m³이고 댐마루 표고는 EL.83.0m이다. 용담다목적댐은 전주권 및 서해안 개발사업지역에 1일 1.35×10⁶m³의 용수와 금강분류로 1일 432×10³m³의 하천유지용수를 공급하며, 연간 198.5 GWh의 수력발전을 하고 있다. 본 연구에서는 대상 유역인 금강 수계의 대형댐과 용담댐 두 개의 다목적댐 운영만을 고려하였다. KModSim의 모의를 위하여 RRFs모형을 이용하여 구한 1984.1~2006.6 기간의 각 소유역별 유입량자료 및 이용량자료를 이용하였다. 과거자료로부터 강우-유출분석을 통해 14개 소유역의 자연유출량을 예측하기 위하여 농업용수 예측 수요량 및 생활, 공업용수의 이용량을 반영하였으며, 용담, 대형댐 및 공주지점에 대한 유출량자료를 실측치와 비교하여 오차를 최소화하는 방법으로 유출량을 예측하였다.

수요량은 광역상수도, 생활, 공업, 농업, 하천유지용수 등 5개 용수로 구분하고 전주권 용수 공급을 포함한 5개의 광역 상수도 공급량, 생활 및 공업용수 수요량, 농업용수는 이용량자료를 이용하여 산정하였다. 소유역별 자연유량 및 수요량에 대한 정보는 RRFs모형 연구에서 구해진 성과를 적용하였으며, 하천에서의 손실은 자연유량값에 기 반영된 것으로 가정하였다. 전체수요량 중 생활용수는 29%, 공업용수는 11%, 농업용수는 60%이며, 전체 수요량 중 4~9월의 농업용수가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 전체유입량 중 15%는 지천의 하천유지유량으로 가정하고 85%만이 각 소유역에서 소비되도록 모의를 수행하였다. 본류의 하천유지유량은 용담~대청 구간에 5CMS 그리고 규암지점의 30CMS를 고려하여 모의를 수행하였다. 전체 41개 수요량 노드 중에서 현재 운영하지 않는 청주 II와 유역외부로 공급되는 전주권 및 부여권 공급량 등 세 곳을 제외한 38 지점의 수요 노드에는 회귀 및 회귀지점이 설정되었다. 모의에 사용된 우선순위를 높은 것부터 낮은 순으로 나열하면 전주권 광역상수도, 하천 유지용수 (분류; 용담댐 하류, 규암), 저수지 목표저류량, 하천 유지용수 (지류; 각 유역의 보장수량; 전체유입량의 15%), 생활용수, 공업용수, 농업용수, 그리고 하구언

싱크 순이다. 본 연구에서는 Backrouting방법과 Muskingum 하도추적 방법을 사용하여 효율적인 모의를 수행하였다.

댐 건설 전 시나리오는 금강수계에 위치한 대청댐과 용담댐이 없다는 가정조건하에서 K-ModSim모델을 이용하여 1984년부터 2006년까지 22년간의 유량자료를 수통지점과 공주지점에 대하여 생산하였다.

댐 건설 후 시나리오는 1984년부터 2006년까지 대청댐과 용담댐 운영조건을 가정하고 K-ModSim모델을 이용하여 유량자료를 생산하였으며, 모델링 조건은 다음과 같다. 용담댐 건설 이전 기간에 대한 댐운영은 2002년부터 2006년 기간의 용담댐 유입량에 대한 저류량 자료와 K-ModSim에서 제공하는 수문학적 단계표를 사용하여 산정하였다. 목표저류량은 1984년부터 2001년 기간 동안의 운영을 사용하여 구한 목표저류량을 사용하였으며, 2002년부터 2006년 기간 동안은 실적저류량을 목표저류량으로 가정하고 모의를 수행하였다. 1984년부터 2006년 기간 동안의 수요량 및 유입량 자료는 RRFs 추정량을 사용하였다.

3.3 환경유량 산정

수리구조물에 의한 유량의 변화와 하천환경의 변화에 따른 생태계의 영향을 정량적으로 분석하고, 환경유량을 산정하기 위한 도구로서 RAP(River Analysis Package)을 사용하였다. RAP는 환경유량 관리(Environmental Flow management)를 목적으로 개발된 컴퓨터 패키지로서 호주의 eWater CRC(eWater Cooperative Research Centre)에 의해 개발되었다. RAP은 환경유량의 산정과정에서 이해 당사자인 정부기관, 엔지니어, 수자원관리자들의 원활한 의사소통에 기여할 목적으로 개발되었다. RAP 시스템은 하천관리자 및 하천환경, 수리, 수문 관련 과학자와 엔지니어들에게 유용한 몇 개의 모듈로 구성되어 있으며, 개별 모듈은 각각의 하위 메뉴로 구성되어 있다(그림 5).

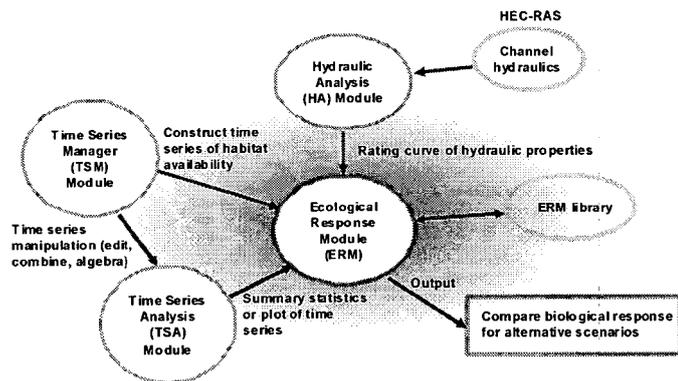


그림 5. RAP의 구성 시스템

가. 수리분석 모듈

수리분석 모듈(Hydraulic Analysis module, HA)은 하천의 수리학적 특성과 생태계 서식조건(e.g. 여울, 소 등)간의 관계를 분석하고 관계식(rating curve)을 도출하기 위하여 개발되었다.

나. 시계열분석 모듈

시계열분석(Time Series Analysis, TSA) 모듈은 일단위 시계열자료를 분석하고 통계학적인 분석과 그래프를 제공하며, 시간에 따른 변화를 분석할 목적으로 개발되었다. TSA 모듈은 유량의 변화에 따른 변화를 모의하고 통계분석을 통한 생태계의 영향들을 분석하는데 사용할 수 있다.

다. 시계열관리 모듈

시계열관리(Time Series manager, TSM) 모듈은 시계열자료의 결측치 분석 및 수식을 이용한 시계열자료의 합성, 관계식(rating curve)을 적용한 시계열자료의 생성 등을 수행한다.

라. 생태계반응 모델

생태계반응 모델(Ecological Response models, ERM)은 유량-생태계 관계모델의 라이브러리(library)로 구성되어 있다. 유량-생태계 관계 모델은 관련 문헌으로부터 도출될 수 있으며, RAP의 나머지 3개의 모듈과 상호보완적으로 사용될 수 있다.

4. 결론

본 연구의 최종 목표는 금강을 대상으로 하천의 건전한 생태계 유지를 위해 어느정도의 환경유량이 필요한지를 산정하는 것이다. 이를 위해 1차적으로 금강유역의 분석 및 환경유량 산정을 위해 각 분야별 전문가로 구성된 MET를 구성하였다. 본 연구를 위해 구성된 MET는 하천계획, 수리, 수문, 지형, 수질, 어류, 저서

생물, 식생 등 각 분야별로 호주 eWater CRC와 수자원공사의 전문가들이 참여하였다. 본 연구에서 대상유역인 금강유역에 대해 환경유량을 산정하기 위한 개념모형을 구축하였다. 개념모형은 대청댐 건설 이전, 대청댐 건설이후~용담댐 건설 이전, 대청댐과 용담댐 건설 이후 등 3개의 시나리오를 통해 하도 및 수변공간과 유량변화에 따른 유황분석 등을 통해 손실된 생태시스템을 정량화하여 궁극적으로는 복원을 위한 대응방안을 마련하도록 할 수 있도록 구축되었다.

연구를 위해 구성된 MET와 환경유량 산정을 위해 구축된 개념모형을 바탕으로 RRFS, K-Modsim, HEC-RAS, RAP 등의 모형을 활용하여 금강의 환경유량을 산정하게 된다. 본 연구의 1차적인 연구로 금강유역에 대한 유출량 자료를 이용하여 금강의 시계열분석을 실시하였다.

향후에는 1차적인 분석 결과를 바탕으로 환경유량을 산정하기 위한 모형을 개발하고 이를 통해 획득한 유량을 확보하기 위한 친환경적 댐 운영계획을 마련할 것이다.

참 고 문 헌

1. 고익환, 박명기, 박상근, 김정엽, 박종택, 2002. “실시간 물 관리 운영 시스템 구축 기술 개발(III) -저수지군 모의운영 모형 개발 부문-”, 대한토목학회 학술발표회.
2. Arthington, A. H., S. O. Brizga, S. C. Choy, M. J. Kennard, S. J. Mackey, R. O. McCosker, J. L. Ruffini, and J. M. Zalucki. 2000. Environmental flow requirements of the Brisbane River downstream from Wivenhoe Dam. South East Queensland Water Corporation, and Centre for Catchment and In-Stream Research, Griffith University, Brisbane..
3. Bunn, S. E. and A. H. Arthington. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4): 492-507.
4. Marsh, N. 2004. River Analysis Package Users Guide, CRC for Catchment Hydrology, Australia.
5. Jorde, K. 2006. Reservoir Operations and Ecosystem Losses, The 2nd International Workshop on River Environment, KICT, Korea, pp. 41-66.
6. Poff, N. L., Allan, J. D., Basin, M. B., Karr, J. R., Presegarrd, K. L., Ritcher, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. A. 1997. The Natural Flow Regime, *Bioscience*, 47(11), pp. 769-784.
7. Sparks, R. E. 1995. Need for ecosystem management of large rivers and floodplain. *BioScience* 45: 168-182.