

기후변화에 따른 저수지 탁수거동 예측 기법 제안



하 림
건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
rim486@konkuk.ac.kr



박 종 운
건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
bellyon@konkuk.ac.kr



강 부 식
단국대학교 토목환경공학과 교수
bskang@dankook.ac.kr



정 세 응
충북대학교 환경공학과 교수
schung@chungbuk.ac.kr



김 성 준
건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
kimsj@konkuk.ac.kr

1. 서언

지금까지 미래 기후변화에 따른 수자원 영향평가는 주로 장기유출해석에 의한 수문학적 영향 및 사회·경제적 영향평가에 치중되어왔다. 미래 기후변화에 따른 기온의 증가는 증발산량의 증가 및 토양수분의 감소 등

으로 이어지며, 그로 인한 하천의 건천화 문제나 수온 상승으로 인한 하천수질 악화 등의 문제를 발생시킬 수 있다(박종운 등, 2009). 또한 홍수와 가뭄 같은 극한 상황 발생 빈도가 늘고 있으며, 강우강도가 큰 집중호우 발생 빈도 또한 과거에 비해 약 3배 정도 증가할 것으로 예상된다. 이러한 강우의 강도 증가와 집중호우 빈발,

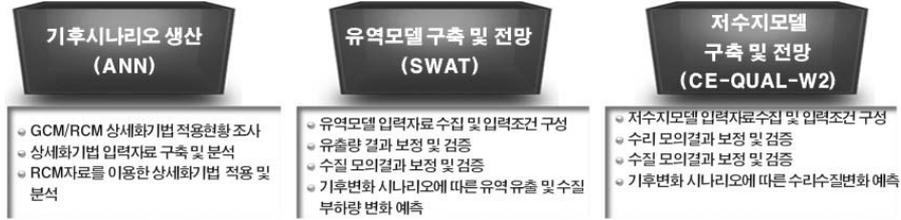


그림 1. 기후변화에 따른 저수지유역 수질 예측을 위한 연계 기법

식생변화 및 유역 관리 소홀 등 복합적 원인에 의해 유역 내 탁수가 증가하고 있으며, 특정 지점에서만 발생하는 것이 아닌 전 수계에 걸쳐 발생하고 있다.

현재 전국에는 17,569개의 농업용 저수지와 20여개의 다목적 댐 및 여러 저수지가 존재하며, 이곳으로 유입되는 탁수로 인해 관리 및 방지 대책 또한 시급한 실정이다. 특히 기후변화에 대비한 치수능력 증대와 저수지의 탁수 관리를 위한 주요대책의 일환으로 한국수자원공사에서는 소양호에 보조여수로 설치공사와 선택취수설비 설치 등 구조적 대책을 실시하고 있다. 소양호는 한강수계에서 영향력이 가장 크며 탁수 장기화 문제를 겪고 있는 저수지로, 상류의 토지이용과 지형학적 특성 때문에 홍수기에 지속적으로 탁수가 발생하면서 수질환경이 크게 악화되는 등 계속해서 문제가 되어 왔다. 하루 하천 구간으로 방류되는 탁수로 인한 피해 또한 심각한 환경 문제로 대두되고 있다. 따라서 향후 기후변화에 의한 실질적인 탁수 거동 예측 기술이 필요하며, 취약성 평가를 통한 비구조적인 대응방안 '기후변화영향평가 및 적응시스템구축' 등이 체계적으로 이루어져야 할 것이다.

본 고에서는 기후변화 시나리오 / SWAT model / CE-QUAL-W2 model 연계(그림 1)를 통해 저수지의 탁수 검보정 및 기후변화에 따른 미래 탁수 거동 예측 기법을 소개하고자 한다. 기후변화 시나리오는 여러 가



그림 2. 각 모델 간 입력력 인자 연계

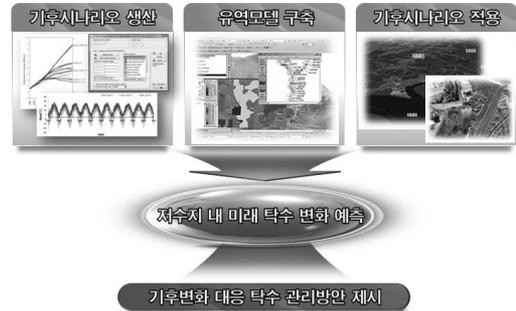


그림 3. 기후변화에 따른 탁수 관리 방안 제시 기법

지 요인에 의한 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에, 이에 따른 모의결과의 불확실성 또한 고려하지 않을 수 없다. 또한 토지이용 및 식생변화 등의 유역환경변화를 고려하지 않았기 때문에 절대적 판단기준으로 적용하기에는 무리가 있다. 하지만, 이를 감안하여 극한 시나리오를 선정하고 시나리오에 따른 결과를 통해 정책적 대응 및 의사결정에 활용할 수 있기를 기대한다.

2. 기후변화에 따른 저수지 탁수 거동 예측

기법 소개에 앞서, 소양호 유역을 살펴보면 유역면적은 2,602.9 km²로 전체 면적의 90 % 이상이 산림으로 이루어진 산악지역이다. 특히 114.3 km² (4.4 %) 정도에 해당하는 발면적 중에서도 약 60 %가 고랭지 밭으로 구성되어 있다. 강원도의 고랭지 밭과 같이 경사가 급하고 사질토 특성으로 인해 토양유실량이 많은 지형적 특성은 탁수 발생의 주원인이 된다. 여러 복합적인 요인으로 인해 소양호 유역은 지난 몇 년간 탁수 저감 대책에 대한 사업 추진이 적극 이루어 졌으며, 이와 동시에 각 기관에서는 토사유출 저감을 위한 밭 기반 정비 사업, 농업용 저수지 건설, 사방댐 건설, 임도 구조 개량 사업, 고랭지 밭 비점오염원 저감 사업, 지방 하천 정비사업 등을 연계한 대책을 추진 중이다.

이처럼 탁수 저감 대책을 필요로 하는 저수지들의 관리 및 대응을 위해 다음과 같은 세가지 연계기법을 적용할 수 있다. 현 상태를 분석하고 파악하는 것으로, 미래 기후변화에 의한 탁수 거동은 여러 가지 기후변화 시나리오에 의해 반응하므로 적절한 대응 방안을 세워야한다.

2.1 기후시나리오 생산 기법

먼저 기후변화로 인한 신뢰성 있는 영향평가를 위해 한반도 기후전망자료(RCM)를 협조 받아 이를 다시 수문학적 스케일로 통계적 상세화 과정을 거친 후 지역별 상세 수문시나리오를 생산하여 미래 유출 및 수질전망에 활용할 수 있으며(그림 3), 자료의 공간적 스케일의 상이성을 최소화하고자 강우관측소 지점 별로 인공신경망을 수행하는 다지점 인공신경망 기법을 적용할 수 있



그림 4. 기후모의 상세화(Downscaling) 기법 순서도 (강부식 등, 2012)

다. 또한 한반도의 계절성을 반영하고 있지 못하는 RCM자료의 보정을 위해 강우의 경우 홍수기간의 태풍사상을 분리하여 상세화를 수행하고, 특히 비선형성이 강한 강우의 경우 단국대학교에서 개발한 Stochastic Typhoon Simulation 기법 및 Dynamic Quantile Mapping 기법을 활용하면 기존 RCM보다 향상된 결과를 얻을 수 있다(강부식 등, 2012).

강우뿐만 아니라 SWAT과의 연계를 위한 입력 자료인 상대습도, 최고/최저온도에 대한 상세화 및 보정 과정도 같은 방법으로 수행한 후 적용 가능하다.

2.2 SWAT 유역모델 구축 및 전망

유역의 수문순환 모의를 위한 모형으로 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)은 GIS와의 연계성 및 토지이용변화 뿐만 아니라 기후변화에 따른 유출 및 수질 변동의 영향을 모의하기에 적합한 모형이다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출

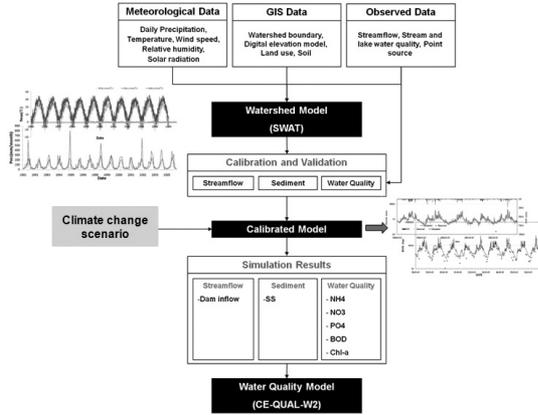


그림 5. SWAT 모델 적용 흐름도

과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발되었으며, 수문·토양유실·영양물질·하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어 있다(Arnold et al., 1998).

모형에는 지형입력 자료로서 수치표고모델 (Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도 및 토양도 그림4와 같이 구축하여 적용하며, 기상자료(강수량, 온도, 풍

속, 태양복사량 및 상대습도)는 기상청에서, 수문-수질 자료는 SWAT 모형의 다지점 검보정을 위한 관측지점에 따라 WAMIS 유량자료와 환경부 수질측정 자료를 활용할 수 있다.

현재 및 미래 탁수 거동 분석을 위해 CE-QUAL-W2에는 SWAT의 기상자료 및 유출량 자료를 비롯한 SS, NO3-N, NH4-N, PO4-P, Algae(chl-a) 결과를 사용하여 연계성을 높인다.

2.3 CE-QUAL-W2 저수지모델 구축 및 전망

CE-QUAL-W2 모델은 2차원 횡방향 평균 (Laterally-averaged) 수리 및 수질 모델로써, 저수지 수위변동, 흐름방향 및 수심방향의 유속분포, 수온 그리고 28가지 수질항목의 모의가 가능하며 현재 W2 모형은 미 육군 공병단(US Army Corps of Engineers), 미 개척국(USBR), 테네시 유역 관리청(TVA) 등 미국의 주요 저수지 관리 기관에서 댐 저수지의 수질관리를 위한 모델로 광범위하게 활용되고 있다.

W2 모델의 주요 입력자료는 저수지 상류 및 하류의

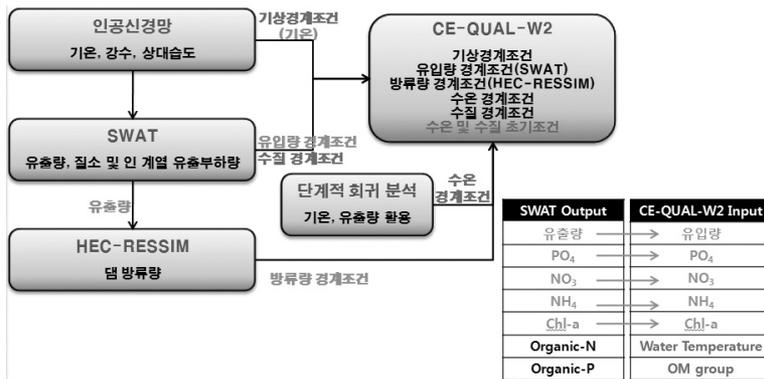


그림 6. 각 모델들 간의 입출력 자료 구성 및 연계 흐름도

유량과 수질 경계조건, 기상자료, 초기조건, 저수지 지형 및 단면자료, 그리고 수리와 수질해석을 위한 각종 매개변수 등이다.

입력자료는 SWAT 모델 출력자료와 연계되는데, 미래 기후변화에 따라 예측 모의된 일별 탁수 자료를 CE-QUAL-W2 모델 입력 자료로 활용한다.

현재 대부분 저수지 유입부의 실측수온자료가 없어서 실측 유량과 수온 및 기상자료를 사용한 단계적 회귀분석법을 통해 유입수의 수온을 산정하는 방법을 사용할 수 있다. 또한 유입수 수질경계조건을 구하기 위해 제한된 저수지 수질측정망 자료를 이용하여 망간법으로 측정한 화학적 산소 요구량(CODMn)과 총유기탄소(TOC)

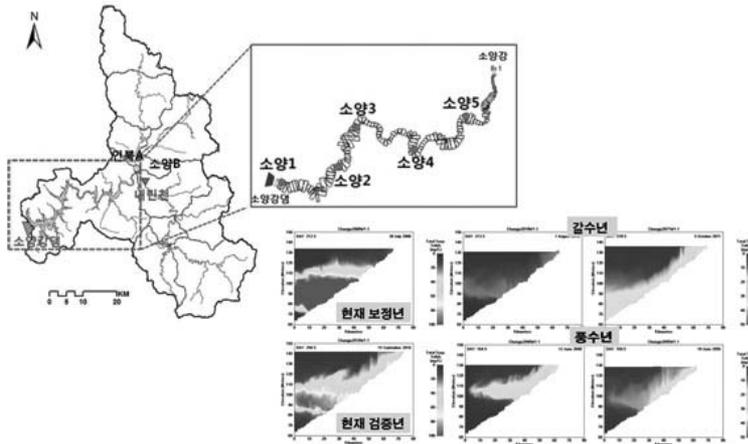


그림 7. CE-QUAL-W2 모델 적용 및 미래 전망

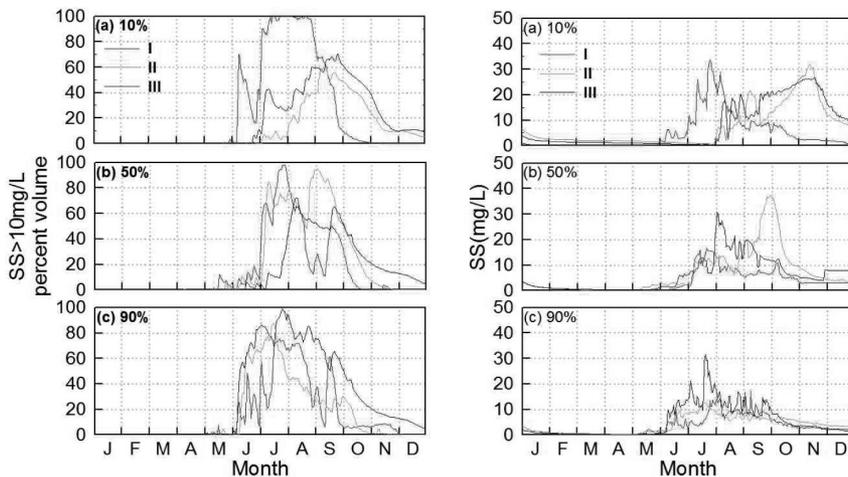


그림 8. 미래 연도별 저수지 내 SS 10mg/L 이상 점유율 및 저수지 방류수 SS 농도 예측

비를 이용하며, 환경부 월간 수질 측정망 자료인 CODMn으로부터 TOC를 구한 후 이를 다시 L-DOM, R-DOM, L-POM, R-POM으로 구분하여 적용 가능하다(정세웅 등, 2007).

세가지 기법의 연계를 통한 미래 저수지 탁수 변화를 전망을 위해 저수지의 수온 성층 형성 시기, SS 25mg/L 이상 유입일수 및 방류일수, 탁수 체류시간, 저수지 내 SS 10mg/L 점유율 등을 분석하고 예측할 수 있다.

3. 결론

기후변화에 따른 저수지 내 미래 탁수 거동을 예측하고 관리 대책을 수립하고자 본 고에서는 기상-유역-저수지 연계 모델링 및 분석 기법을 제안하였다. 비록 제안된 모델링 방법론이 기후변화에 따른 저수지 탁수환경 변화를 예측할 수 있는 기본적인 틀을 제공하고 있으나, 탁수발생 예측의 신뢰도를 높이기 위해서는 일부 모델의 기능적 개선이 필요하다. 특히, 탁수 발생의 규모가 강우강도에 크게 좌우되므로 유출모델의 수문해석을 일 단위에서 시 단위까지 세분화할 필요가 있으며, 장기 탁수에 영향을 미치는 유사가 대부분 10 μm 이하의 미립자이므로 유사해석도 부유사의 입자 크기별 침강특성을 고려하여 세분화해야 한다.

본 기법을 활용하여 다가올 극한 상황에 대비하여 현재 우리나라 곳곳에 위치한 농업용 저수지 및 댐들의 취약성 분석이 필요하다. 이를 통해 탁수 장기화 등에 대응하는 현실적인 방안 제시가 시급하다. 사실 탁수 발생의 근본적인 원인 규명을 위해서는 기후, 강수 및 수리수문 현상, 지형적 특성, 식생분포 및 토지피복 등 복잡

다양한 요인들을 고려하고 영향력을 분석하여야 하므로 되도록 많은 실측 자료를 이용한 검증이 필요하다.

또한 우리나라 지형 및 토양, 그리고 영농정책 등에 맞는 탁수 저감 기술이 요구되나, 현재로서는 국외 기술을 활용하는 데 그치며 현실적으로 활용하기 어려운 방법론들이 많다. 특히 소양호를 비롯한 우리나라 많은 농업용 저수지들의 탁수 장기화 및 고탁수 방류로 인한 2차 피해를 막기 위해서는 실제 탁수 유발 원인인 자연현상 외에도 농민들의 현장 대응 및 인식 전환에 힘써야 할 것이다.

참고문헌

1. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R., 1998, Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of American Water Resources Association, JAWRA, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
2. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.E., 1970, River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles. Journal of Hydrology, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
3. 강부식, 문수진, 김정중, 2012, 기후변화 영향평가를 위한 전지구기후모의의 지역단위 상세화시스템 : ARDAS, 한국수자원학회 학회지 '물과미래' Vol. 45 No. 8, pp. 106-111.
4. 박종윤, 박민지, 안소라, 김성준, 2009, 기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는 영향평가를 위한 유역 모델링, 한국수자원학회논문집, Vol. 42, No. 10, pp. 877-889.
5. 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완, 2007, 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용, Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 23, No. 1, pp. 52-63.

기획: 강문성(mskang@snu.ac.kr)