

지속가능한 개발계획 수립을 위한 잠재적 위협 및 기회요인 규명



김 상 욱
강원대학교 토목공학과 부교수
sukim70@kangwon.ac.kr



손 민 우
충남대학교 토목공학과 부교수
mson@cnu.ac.kr



정 은 성
서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수
eschung@seoultech.ac.kr



변 지 선
충남대학교 토목공학과 박사과정
popo3501@cnu.ac.kr

로 인해 국지성 강우 발생으로 인한 홍수피해 증대, 극심한 가뭄 발생으로 인한 가뭄피해 증대 및 하천 환경 저하로 인한 생태계 변동 등과 같은 많은 피해가 전 지구적으로 발생되고 있다. 우리나라에서도 2017년 발생한 충청지역 및 인천광역시에서 발생된 높은 강우강도로 인한 홍수피해를 경험한 바 있으며, 2014년과 2015년에 걸쳐 발생한 극심한 가뭄은 다목적댐의 수위 저하 및 충남지역에서의 제한급수와 같은 실질적인 가뭄피해로 이어지고 있다. 또한 매년 발생되고 있는 녹조발생 등의 수질문제 역시 과거와 달리 점차적으로 심각해지고 있어 치수, 이수 및 환경적 측면에서 기후변화를 고려한 대책 및 계획이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구의 2차년도에서는 청미천 유역을 대상으로 하여 RCP 4.5 및 8.5 시나리오 극한강우사상의 통계적 특성 분석, 미래 기후변화 시나리오에 대한 가뭄예측을 위한 수문순환 모형을 구축 및 수문학적 가뭄의 분석, 미래 수질을 모델링하기 위한 기초자료를 수집 및 매개변수 보정과 같은 연구를 수행하였다. 또한 3차년도에는 극한강우사상을 이용하여 청미천 유역에서 발생될 수 있는 확률홍수량을 정상성 및 비정상성 빈도분석을 이용하여 파악하였으며, 다양한 기후변화 시나리오에 대한 미래의 가뭄현황을 여러 가뭄 지수를 이용하여 판단하였다. 본 연구의 마지막 년차인 4차년도 2017년에는 3차년도에서 산정된 12개 모형에 대한 확률홍수량에

1. 서론

최근 발생되고 있는 지구온난화로 인한 온도 상승은 지구전체의 수문순환에 영향을 미치고 있으며 이

대하여 기후변화 및 비정상성이 고려된 홍수위를 산정하고 이를 바탕으로 현재 수립되어 있는 하천기본계획에 대한 치수 측면에서의 수정 사항을 제시하였다. 이수측면에서는 유지유량의 부족일수를 감소시킬 수 있는 적정 대안을 선택할 수 있는 최적선택기법을 활용하여 청미천 유역의 적정 농업용수 공급량을 기후변화 미래 시나리오를 활용하여 선정하였다.

또한 환경적 측면에서는 청미천 유역에서 미래에 발생할 수 있는 비점오염원 저감계획을 수립함에 있어 유역 내 경작지 변경 방식을 채택하여 그에 따른 비점오염 저감량을 정량적으로 분석하였다. 본 글에서는 [그림 1]에서 제시한 연구 로드맵 중 마지막 연차인 2017년 진행된 본 연구의 4차년도에서 다루어진 내용 및 결과를 요약하였다.

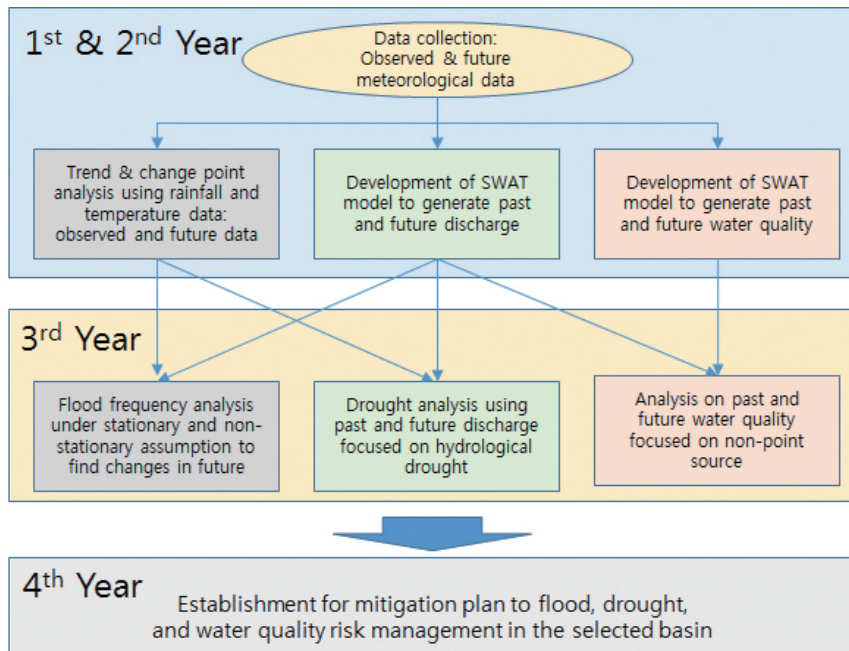


그림 1. 연구과제의 로드맵

2. 4차년도(2017년) 연구내용

2.1 기후변화를 고려한 홍수 대응방안의 제시

본 연구에서는 정상성 빈도분석 및 비정상성 빈도분석의 결과를 비교함에 있어 ①강우빈도분석을 먼저 수행하여 확률강우량을 선정하고 이를 강우-유출모형에 입력하여 확률홍수량을 산정하는 방법과 ②2차년도를 통해 산정된 SWAT 모의유량을 활용하여 직접 홍수빈도분석을 수행하여 확률 홍수량을 산정하는 방법을 먼저 고려하여 모형을 구분하였다.

본 연구의 4차년도에서는 두 가지 접근 방식으로 구분된 빈도분석 방식을 사용된 자료의 특성 및 비정상성의 고려 여부에 따라 다시 세분화하여 빈도분석 모형의 조합을 2(접근방식)×3(강우자료의 종류)×2(정상성 or 비정상성)=12가지로 구분하였으며, 모형에 따른 명칭은 다음과 같다.

- ① Model 1: 관측자료 + 정상성 강우빈도분석 + 강우-유출모형
- ② Model 2: 관측자료 + SWAT 모의유량 + 정상성 홍수빈도분석

- ③ Model 3: 관측자료 + 비정상성 강우빈도분석 + 강우-유출모형
- ④ Model 4: 관측자료 + SWAT 모의유량 + 비정상성 홍수빈도분석
- ⑤ Model 5: RCP 4.5 미래자료 + 정상성 강우빈도분석 + 강우-유출모형
- ⑥ Model 6: RCP 4.5 미래자료 + SWAT 모의유량 + 정상성 홍수빈도분석
- ⑦ Model 7: RCP 4.5 미래자료 + 비정상성 강우빈도분석 + 강우-유출모형
- ⑧ Model 8: RCP 4.5 미래자료 + SWAT 모의유량 + 비정상성 홍수빈도분석
- ⑨ Model 9: RCP 8.5 미래자료 + 정상성 강우빈도분석 + 강우-유출모형
- ⑩ Model 10: RCP 8.5 미래자료 + SWAT 모의유량 + 정상성 홍수빈도분석
- ⑪ Model 11: RCP 8.5 미래자료 + 비정상성 강우빈도분석 + 강우-유출모형
- ⑫ Model 12: RCP 8.5 미래자료 + SWAT 모의유량 + 비정상성 홍수빈도분석

본 연구의 3차년도(2016년)에서는 위에서 제시된 12개 모형에 대한 빈도분석을 이미 시행한 바가 있으며, 따라서 4차년도 연구에서는 기존에 산정된 빈도분석 결과를 이용하여 12개 모형에 따른 100년 빈도 및 200년 빈도 홍수량을 홍수위 분석 모형의 입

력자료로 활용함으로써 기후변화에 따르는 각종 시나리오 및 비정상성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 해당되는 청미천 수위가 어떻게 변화되어 질 수 있는지에 대한 정량적 검토를 수행하였다.

12개의 빈도분석 결과를 이용하여 청미천에서 발생될 수 있는 홍수위를 산정하기 위하여 먼저 기존의 청미천 하천기본계획(국토해양부, 2011)을 검토하였으며, 당시 계획과의 일관성을 유지하기 위하여 홍수위 산정을 위한 단면 자료구성, 측정별 조도계수, 홍수위 산정 방법 및 계산절차, 홍수위 산정을 위한 하도의 분할과 같은 모든 자료는 당시의 계획과 동일하게 설정하였다. 특히 홍수위 산정을 위한 기점수위는 100년 빈도에 대한 과거 및 미래 홍수위를 산정하였으므로, 해당 기점 수위도 48.90 EL. m로 설정하였다.

산정된 입력자료는 HEC-RAS 모형에 입력되어져 정상부등류 산정절차에 따라 수행되었으며, 해당 결과는 지면 상의 문제는 생략하였다. [표 1]은 우안 및 좌안 제방고에 대하여 100년 빈도 홍수위 발생시 모형에 따라 제방이 부족한 측점을 별도로 산정하여 제시한 결과이다. 100년 빈도(우안)의 결과를 보면, 모형 9, 11, 12에 따라 우안 제방으로의 월류가 발생했음을 알 수 있고, 100년 빈도(좌안)의 결과를 보면 마찬가지로 모형 9, 11, 12에서 좌안 제방으로의 월류가 발생된 것을 알 수 있었다. 즉 관측자료

표 1. 100년 빈도 홍수위에 대한 좌안 월류량

우안 월류량 (m)				좌안 월류량 (m)			
측점	Model 9	Model 11	Model 12	측점	Model 9	Model 11	Model 12
25	-0.55	-1.28	-0.97	25	-0.72	-1.45	-1.14
21	0.48	-0.07	0.15	21	0.47	-0.08	0.14
20	0.11	-0.38	-0.19	20	-0.50	-0.99	-0.80
11	0.55	-0.10	0.17	15	0.60	-0.02	0.24
8	-0.29	-0.90	-0.65	14	0.57	-0.04	0.22
7	-0.36	-1.00	-0.74	10	0.56	-0.08	0.19
6	-0.65	-1.27	-1.02	9	0.45	-0.12	0.11
				7	-0.67	-1.31	-1.05

및 RCP 4.5 자료를 사용한 경우에는 좌안 및 우안 월류량이 발생되지 않았으나, RCP 8.5를 사용한 경우에는 대부분의 산정방법에 있어 월류량이 발생되어짐을 알 수 있었다. 따라서 향후 청미천 유역에 대해 기후변화를 고려한 하천기본계획을 수립하는 경우 이와 같은 결과를 바탕으로 불확실성을 고려하여 가장 합리적인 제방중고량 등을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 기후변화를 고려한 가뭄 대응방안의 제시

본 연구의 2, 3차년도에서는 가뭄 및 수질 대응방안의 수립을 위하여 관측자료 및 RCP 4.5와 8.5 기후변화 자료를 활용한 SWAT모형을 구축하고 보정 및 검증을 수행한 바 있으며 이를 활용하여 과거 및 미래에 발생가능한 가뭄을 다양한 가뭄지수를 이용하여 산정하여 제시한 바 있다. 본 연구의 4차년도에서는 이미 산정된 자료를 바탕으로 하여 유지유량 불만족 일수를 과거 및 미래별로 구분하여 제시하고, 이를 해소할 수 있는 시나리오를 작성하고 Minmax regret 방법(Loulou and Kanudia, 1999)을 이용하여 가장 최적의 농업용수 공급 시나리오를 선택함으로써 청미천 유역에 대한 가뭄 대응방안을

제시하였다.

먼저 유지유량에 대한 과거 불만족 일수 산정 결과, 평균 불만족일수는 54.94일이며 최대 불만족일수는 148일로 나타났으며, 현재 진행 중에 있는 농업용수 공급사업을 적용하면 평균 불만족일수는 45.33일, 최대 불만족일수는 139일로 감소되어지지만, 여전히 현재 진행 중인 사업만으로는 청미천의 유지유량을 만족시키기 어려운 것으로 분석되었다 ([그림 2]).

또한 미래 시나리오(가까운 미래: 2011-2040, 중간 미래: 2041-2070, 먼 미래: 2071-2099)의 경우는 RCP 4.5 시나리오의 불만족일수 산정 결과 가까운 미래의 평균 불만족일수는 78.27일, 중간 미래의 평균 불만족일수는 56.07일, 먼 미래의 평균 불만족일수는 14.97일 감소하였는데 RCP 4.5 시나리오 전체를 분석하였을 때 평균일수는 65.99일에서 54.17일로 11.82일이 감소하였다. 또한 RCP 8.5의 불만족일수 산정 결과 가까운 미래의 평균 불만족일수는 58.27일, 중간 미래의 평균 불만족일수는 42.93일, 먼 미래는 46.28일에서 37.03일로 9.24일 감소하였는데 RCP 8.5 시나리오 전체를 분석하였을 때, 평균일수는 49.16일에서 39.16일로 10일

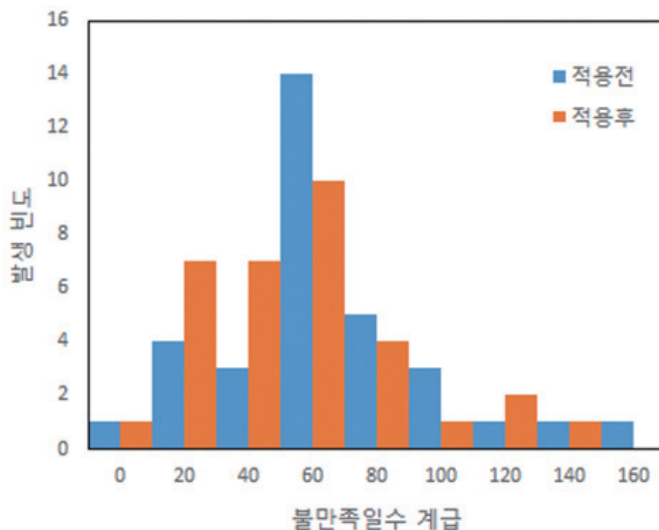


그림 2. 현재 사업의 적용 전후의 유지유량 불만족일수

이 감소하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 청미천 유역에서 유지유량 부족일수 발생되지 않을 가뭄대책을 제시하기 위하여 용수공급량을 10,000 m³/s 씩 증가시키며 불만족일수를 산정하였다. RCP 4.5 전체 평균은 10,000 m³/일 증가할 때마다 4.29일이 증가함을 확인할 수 있었으며, 가까운 미래의 경우 4.72일로 가장 많은 향상 일수를 보였다. RCP 8.5는 평균 10,000 m³/일 증가할 때마다 3.57일의 개선일수를 나타냈으며, 가까운 미래 구간에서 평균 4.28일로 가장 높은 개선 일수를 보였다.

본 연구에서는 위에서 제시한 여러 개의 시나리오 중 가장 최적의 시나리오를 Minmax regret 최적화 방법을 사용하여 결정하였으며, 이를 위하여 용량별 최대 유지유량 부족일 감소일수와의 차이를 Regret으로 정의하였다. 이와 같은 방법의 적용결과, RCP 4.5는 60,000 m³/일일 때 가장 효과적인 용수공급량으로 확인되었으며, RCP 8.5는 70,000 m³/일이 가장 효과적인 용수공급량으로 결정되었다. 따라서 향후 기후변화를 고려한 가뭄대책의 수립에 있어 이와 같은 추가적인 용수가 하천에 공급될 필요가 있다는 점을 제시할 수 있었다.

2.3 기후변화를 고려한 수질 대응방안의 제시

본 연구에서는 청미천 유역의 수질을 대표하는 인자로 총 부유물질(Total Suspended Sediment, TSS), 총 인(Total Phosphorus, TP), 총 질소(Total Nitrogen, TN)을 선정하여 검토하였다. SWAT-CUP (Abbaspour, 2008)을 이용하여 매개변수를 보정한 이후 모의 결과, 총 부유사량의 평균은 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오에서 94391.12 ton, 95429.1 ton으로 고농도 시나리오에서 더 크게 산정됨을 알 수 있었다. 특히 유출량의 경향과 같이 총 부유사량 또한 고농도 시나리오에서 더 큰 편차가 발생할 것으로 전망되었으며, 총 인 및 총 질소 또한 중간미래까지는 증가추세에 있으나, 먼 미래에 접어들면 감소하는 안정된 경향이 확인되고, 고농도 시나리오에서 평균 및 표준편차가 모두 크게 산정됨

을 확인할 수 있었다.

본 연구의 4차년도에서는 이와 같은 과거 및 미래의 청미천 유역의 수질전망을 기초로 청미천 유역에 대한 비점오염원 저감계획으로서 식생형 시설인 계단식 산비탈 설치에 관한 효율성을 분석하였다. 계단식 산비탈은 자연형 및 식생형 시설로, 토양이 여과·흡착 및 식물의 흡착 작용으로 비점오염물질을 감소시키고 동시에 녹지 경관으로 기능하는 시설이다. 이 시설의 설치 후 효율성은 SWAT 모형을 사용하여 분석하였다. 본 연구에서는 산비탈의 길이를 유출지점 이전 마지막 소유역의 면적이 546 km²임을 감안하여 약 20 m로 적용하였으며, 이를 활용하여 SWAT모형을 수행한 결과, 총 부유사량은 RCP 4.5 시나리오 하에서는 약 15.82% 감소하는 결과가 나타났으며 RCP 8.5 시나리오 하에서는 약 14.88% 감소하는 결과가 확인되었다. 또한 산비탈의 적용으로 인해 가장 많은 저감 효율을 보이는 수질 변수는 RCP 4.5 시나리오에서는 총 질소로였으며, RCP 8.5 시나리오에서는 총 인으로 분석되었다. 분석된 사례로 [그림 3]에 총질소에 대한 먼 미래에서 산비탈의 적용 전후를 비교하는 결과를 제시하였다.

3. 결론

본 연구는 미래 기후변화 시나리오를 고려한 청미천 유역에서의 치수, 이수 및 환경적 측면의 계획수립 절차는 향후 하천기본계획의 수립 절차에 있어 '기후변화'라는 키워드를 고려하는 경우 어떠한 변화가 발생할 수 있을 지에 대한 결론을 제시함과 함께 기후변화를 고려하기 위한 하천기본계획의 수립절차를 제시함으로써 향후 관련 계획의 변경에 있어 고려해야 하는 다양한 요소들을 제공하였다는 측면에서 연구 결과의 활용가능성이 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 청미천 유역을 대상으로 과거 관측자료와 미래 기후변화 시나리오(RCP 4.5 및 RCP 8.5)를 활용한 경우 치수, 이수 및 환경적 측면에서

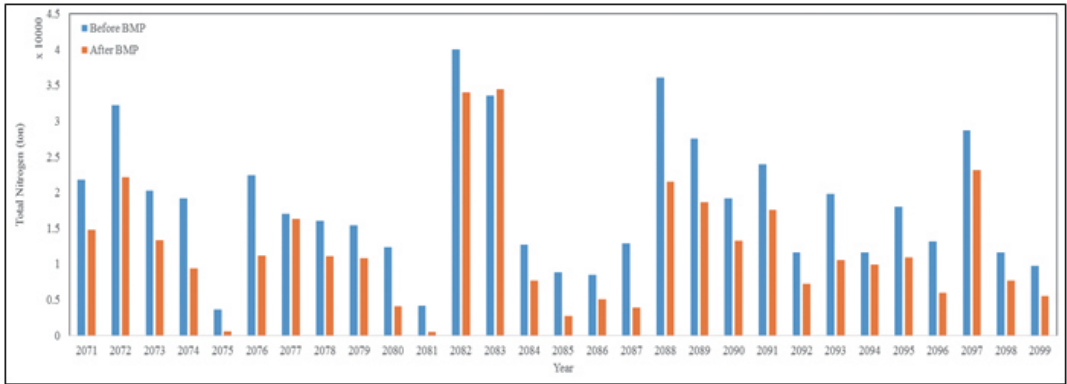


그림 3. RCP 8.5 만 미래에 대한 산비탈 기법 적용 전 및 후의 질소 산정결과

변동될 수 있는 수문학적 주요 인자들을 정량적으로 분석하고, 특히 미래에 발생할 수 있는 위험요인에 따른 저감 대책을 적용하여 그 결과를 제시하였다. 다만, 본 연구에서 진행된 사항 중 치수대책의 수립에 있어서 기점홍수위에 대한 적용은 한강 본류 전체에 대한 미래 시나리오를 활용한 홍수위 분석이 시행되어야 가능한 점으로서 이는 본 연구의 시간적 제약으로 인해 수행되지 못하였으므로, 향후 국내 주요 하천에 대한 기후변화 시나리오를 반영한 홍수위 산정과 같은 별도의 연구를 통해 시행되어야 할 것으로 판단된다. 특히 현재 국내에서 진행되고 있는 하천기본계획은 과거에 관측된 강우자료만을 대상으로 하여 주요 치수, 이수 및 환경계획이 수립되고 있어 하천기본계획을 포함한 각종 수자원관련 법

정계획의 수립을 기후변화 차원에서 지원할 수 있는 별도의 법정계획의 마련이 필요하다는 점을 제시할 수 있으며, 이를 위해서는 기후변화 시나리오에 대한 신뢰성 향상, 전국을 대상으로 하는 기후변화를 고려한 치수, 이수 및 환경적 요인의 분석결과 제시 등과 같은 기초적 작업을 통해 관련 제도의 개정에 필요한 공학적 관점에서의 분석이 추가로 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 2017년 국제수문학프로 그램(IHP) 연구지원 사업에 의해 수행되었습니다.



참고문헌

국토해양부 (2011). “청미천 하천기본계획(변경) 보고서.”

Loulou, R, and Kanudia A (1999). “Minimax regret strategies for greenhouse gas abatement: Methodology and application.” Operation Research Letters, Vol 25(5) pp. 219–230.

Abbaspour, K.C. (2011). “SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs.” Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf.