

## 기후변화에 따른 미래 유출 및 수질 모의를 위한 SWAT 모형의 적용

### Application of SWAT Model for Simulating Runoff and Water Quality Considering Climate Change

정 은 성\*      김 상 옥\*\*      김 형 배\*\*\*  
Chung, Eun-Sung      Kim, Sang Ug      Kim, Hyeong Bae

#### Abstract

In the face of increasing impact of climate change due to human activities, there has been an urgent need to resolve the problem in water resources planning management and environmental engineering. Therefore SWAT model was used to identify the impacts and change in hydrological cycle and environmental aspect. The most important step for the development of SWAT model is calibration procedure. Therefore, SWAT-CUP automatic calibration module was used to find some optimal parameters in SWAT model. After calibration in the cheongmicheon basin, SWAT model is used for the projected precipitation and temperature of RCP 4.5 and 8.5 climate change scenarios in AR5. The quantity and quality using SWAT model from 2014 to 2100 were identified. Finally, this study can provide the reasonable finding on impact by climate change.

키워드 : 기후변화, RCP 4.5 & 8.5, SWAT 모형  
Keywords : Climate change, RCP 4.5 & 8.5, SWAT model

#### 1. 서론

최근 지구온난화로 인한 기후변화는 우리 삶에 다양하게 영향을 미치고 있다. 강수 또는 기온의 비정상성으로 대표되는 기후변화에 따라 수문순환의 변화 역시 자명하게 받아들여지고 있다. 기후변화에 따른 위험요소를 전망하기 위한 최우선 사항은 수문상황을 명확하게 진단하는 것이고 그 다음은 현재기후를 대비 미래의 변화를 전망하는 것이다. 그러나 우리나라는 수문관측의 역사가 짧고 관측 자료의 불확실성으로 인하여 수문상황의 진단을

위해 수문모형의 모의에 의존하는 경우가 많다.

일반적으로 수문모형은 입력 자료와 지형자료를 구축하고 주요 매개변수를 선택하여, 매개변수를 변화시켜가며 관측에 가장 가까운 결과를 가져오는 상태를 구성한다. 이와 같은 과정은 수문모형의 매개변수 보정이라 불리우며, 사용자의 직관에 따른 시행착오법에 따른 수동보정 방법이 사용될 수도 있고 특정 목적함수를 채택하여 수학적 알고리즘에 의해 매개변수를 보정하는 자동보정 방법이 사용될 수도 있다. 그러나 미래 수문변화 전망은 특정 유역을 대상으로 장기간의 수문자료를 모의하는 것이므로 수동보정보다는 자동보정이 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 청미천 유역의 기후변화로 인한 미래 수문상황의 변화를 모의함에 있어 강우 유출모형 중 하나인 SWAT 모형을 이용하였으며, 신뢰도 있는 매개변수의 추정을 위하여 SWAT-CUP을 이용하여 매개변수를 객관적으로 최적화하였다.

\* 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 조교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 토목공학과 조교수, 공학박사, 교신저자  
\*\*\* 강원대학교 토목공학과 석사과정

## 2. SWAT 모형의 이론적 배경 및 연구동향

### 2.1 이론적 배경

SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기-강우 유출모형으로서 4가지의 부 모형(sub-model)인 수문모형, 토양모형, 영향물질모형, 하도추적모형으로 구분된다. 이 중에서 수문모형은 저류방정식으로 일 단위 물수지를 산정하며, 차단, 지표면유출, 중간유출(측방유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다.

SWAT 모형의 입력자료는 GIS를 통해 작성되는 기상, 하도추적, 지하수 등의 자료와 GIS와 수동입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력 자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과값으로 구분된다.

SWAT 모형을 이용함에 있어 물수지분석은 유역 내에서 발생하는 모든 상호작용 중에서 가장 중요하다. 물과 유사, 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위해서는 모형에 의해 모의되는 수문순환 과정이 유역 내에서 발생하는 현상과 일치하여야 한다. 따라서 SWAT 모형은 유역의 수문순환에 대한 모의를 크게 두 부분으로 나누고 있다. 첫 번째 부분은 토지부분으로 각 소유역의 주 하천에서의 물, 침전물, 영양물질, 살충제의 부하량을 조절한다. 두 번째 부분은 추적부분으로 유역의 하천조직에서 출구까지의 물과 유사 등의 이동으로 정의될 수 있는 수문순환의 추적에 관한 부분으로 나누어진다. SWAT 모형에서는 토지부분의 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표 유출, 기저 유출, 지하수 등의 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다.

SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 다음 식과 같다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_t$ 는 최종일의 초양 수분량 이며  $SW_o$ 는 초기토양부수분량,  $R_{day}$ 는 강수량,  $Q_{surf}$ 는 지표유출량,  $E_a$ 는 증발산량,  $Q_{gw}$ 는 회귀수량,  $w_{seep}$ 는 토양면에서 투수층으로 투수되는 총량을 나타낸다.

또한 SWAT 모형에서는 유역을 다양하게 구분하면 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산을 반영할 수 있으며, 각 수문반응단위에서 유출이 구분되어 계산되어지는 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 하도 추적이 이루어진다. SWAT 모형에 관한 설명은 매우 광범위하여 본 논문에서는 가장 중요한 물수지 방정식에 관해서만 간단히 요약하였다.

### 2.2 연구동향

Arnold et al. (1996)은 Illinois 유역의 중부와 서부에 있는 3개의 소유역에 SWAT 모형을 적용하였다. 표면유출량, 지하수량, 지하수의 증발산량, 지하수 함양량, 지하수위 높이 등 기존에 구축된 관측자료와 모형의 결과를 비교함으로써 SWAT 모형의 적용가능성을 확인하였으며 그 결과 SWAT 모형을 통하여 유역단위의 다양한 토지이용 관리를 할 수 있다는 결론을 내린 바 있다.

FitzHugh and Mackay (2000)은 SWAT 모형 사용 시 유역을 분할하였을 때 분할된 유역의 크기와 개수가 총 유출량과 총 유사량에 미치는 영향을 분석하였다. SWAT 모형을 Dane 주의 Pheasant Branch 유역에 적용한 결과 유역을 더 작게 나누어 소유역의 개수를 늘리어서 소유역의 면적을 줄인 결과 유역출구지점에서의 총 유출량에는 거의 영향을 미치지 않지만 총 유사량의 경우는 이와 달리 최대 44% 정도가 감소함을 보여 유역분할 개수가 유사량에 민감하게 반응함을 밝혀내었다.

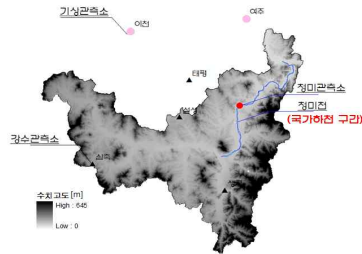
Luzio et al. (2007)은 GIS 자료의 질이 소유역의 유출량과 유사량에 미치는 영향을 SWAT 모형을 이용하여 연구하였다. Mississippi 주의 북쪽에 위치한 GoodwinCreek 유역에 지형고도자료(DEM)를 서로 다른 해상도의 자료를 통하여 사용한 결과 해상도가 낮은 지형고도자료를 사용한 경우 소유역에서는 유출량이 감소함을 확인하였지만 대유역에서는 큰 영향을 미치지 못함을 도출하였고, 정밀하지 못한 토지이용도를 사용한 경우 토양침식과 유사량의 예측에 많은 영향을 미치기 때문에 소유역에서는 낮은 해상도의 지형고도자료와 정밀하지 못한 토지이용도를 사용하지 말 것을 강조하였다.

장철희 등 (2003)은 SWAT 모형이 국내유역의 토지이용 및 토양특성을 적절히 반영하는가에 대한 평가를 위하여 용담댐 유역에 AVSWAT 2000 모형을 적용하였다. 모의 결과와 관측자료를 통해 모형의 보정 및 검정을 실시하였으며 국내 유역에 적용 가능함을 도출하였다.

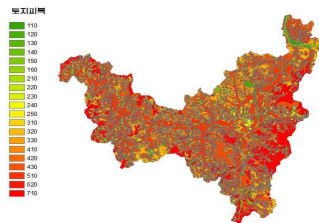
## 3. SWAT 모형의 구축 및 보정

모형구축을 위해서는 지형·기상학적 입력자료가 필요하며, 지형학적 입력자료에는 정방 격자크기가 30 m인 DEM(Digital Elevation Model), 1:25,000의 토지피복도와 토양도가 이용되었다(그림 1(a)-(c)). 요구되는 기상학적 입력자료는 일 강수(mm), 최고·저 기온(°C), 일사량(MJ/m<sup>2</sup>day), 풍속(m/s)과 습도(%)이다. 일 강수는 국토교통부 한강홍수통제소의 자료를 사용했으며 기온, 일사량, 풍속과 습도는 대상지 인근의 기상청 자료를 이용하였다. 모

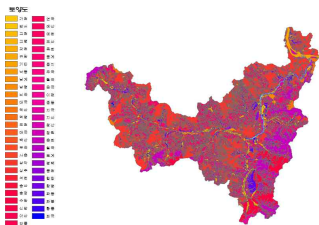
형 구축과 함께 검정을 위하여 검정 기준자료로써 한강홍수통제소에서 제공하는 관측유량과 환경부 물환경 정보 시스템에서 제공하는 수질(TN, TP) 자료를 수집하였다.



(a) 수문기상 관측소 위치도 및 고도



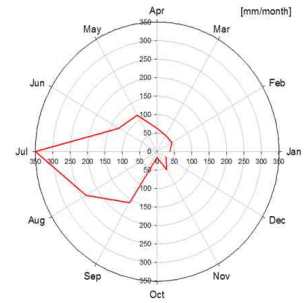
(b) 토지피복도



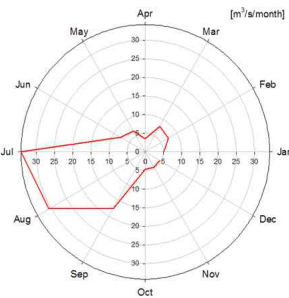
(c) 토양도

그림 1. 지형학적 입력자료

2013년 청미천 유역평균 강수량과 유량의 월 변동성은 그림 2와 같다. 청미천 유역의 2013년 강수량은 1,288 mm/yr로 같은 기간 전국 평균치인 1,163 mm에 비하여 약 120 mm 많았다. 여름철(6월-8월)에 연 강수량의 55%가 집중되었고, 특히 7월에 연 강수량의 27%가 집중될 정도로 월 강수 강도가 강한 편이었다. 연 평균 유량은 11.3 m<sup>3</sup>/s이며 강수와 마찬가지로 7월의 월 평균 유량이 가장 많았고, 그 다음은 8월과 9월 순(order)이었다. 일 변동성을 보면 2013년 유역평균 최대 일 강수량은 7월 중에 발생한 70 mm이었으며, 강수일수는 130일, 일 최대 유량은 157 m<sup>3</sup>/s이었다(그림 3).

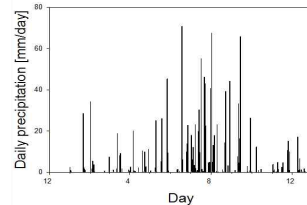


(a) 강수량

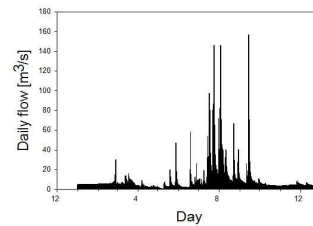


(b) 유량

그림 2. 2013년 기상 입력 및 검정 기준자료: 월 변동성



(a) 강수량



(b) 유량

그림 3. 2013년 기상 입력 및 검정 기준자료: 일 변동성

SWAT 모형에 포함된 매개변수 최적화를 위한 SWAT-CUP은 SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), GLUE(Generalized Likelihood

Uncertainty Estimation), ParaSol(Parameter Solution), PSO(Particle Swarm Optimization), MCMC(Markov Chain Monte Carlo)로 구성되어 있다. SUFI-2는GLUE 알고리즘의 개념과 유사하게 순차적으로 매개변수를 추정한다. SUFI-2 알고리즘은 개념적 모델, 매개변수, 추정값 그리고 강수량 등 모두가 불확실한 매개변수로 이루어져 있다고 가정한다. 불확실성의 정도는 P-factor로 불리는 95% 예측의 불확실성(95PPU)의 비율로 측정되며, 강수량, 온도와 같은 입력자료의 정확성은 모델 예측의 불확실성을 증가시키므로 예측의 불확실성에 의해 선택된 자료의 비율은 불확실성 분석의 강도를 평가하는 좋은 척도가 된다. 95PPU는 유의수준 5%에 해당되는 추정방법으로 Latin hypercube sampling을 통해 얻은 출력변수의 누적 분포 2.5%와 97.5% 수준에서 계산된다. SUFI-2는 추정값과 가장 작은 d-factor를 갖도록 매개변수를 보정한다.

본 연구에서는 2013년 관측유량에 대하여 SUFI-2 알고리즘으로 모의유량을 최적화하였고, 최적 매개변수로 모의된 유량과 관측유량을 비교하였다. 그림 4를 보면 월별 및 계절 변동성의 경향이 잘 재현되고 있음을 알 수 있으며, 대응하는 월별 유량의 수준도 적절히 모의되었음을 알 수 있다.

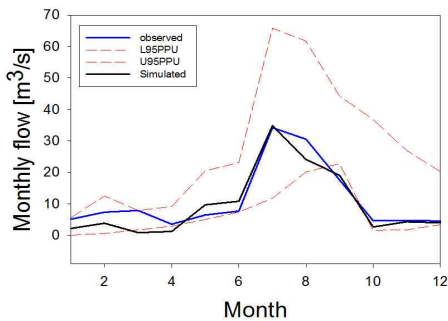


그림 4. 최적 매개변수로 모의한 월 유량, 관측유량과 신뢰구간

모형보정의 정확도를 정량적으로 비교하기 위하여 NSE(Nash and Sutcliffe, 1970)와 상관계수를 함께 비교하였는데 두 지수 모두 '1'에 가까울수록 구축한 모형의 관측에 대한 모의능력이 우수함을 의미한다. 비교결과, NSE는 0.88, 상관계수는 0.90로 모형 추정치가 관측의 경향 및 정량적인 크기 또한 잘 따르고 있었다(그림 5). 그림 5를 보면 최적화 이전에는 상관계수만 높은 수준, 즉 월별 경향성만 재현하였으나, 최적화 후에는 NSE 또한 두드러지게 향상되어 정량적인 크기까지 효율적으로 재현하고 있음을 확인하였다. 장기유출 모형은 일

반적으로 월 단위 모의에는 능하지만 일별 첨두유량 모의에 취약하다고 알려져 있어서 일 유량을 도시하여 검토하였다(그림 6). 검토 결과 구축한 모형이 다소 큰 수준의 일 유량들을 적절하게 재현하고 있음을 확인할 수 있었다.

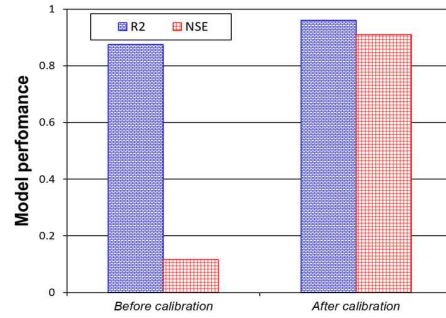


그림 5. 모형 수행능력 개선 전·후 비교

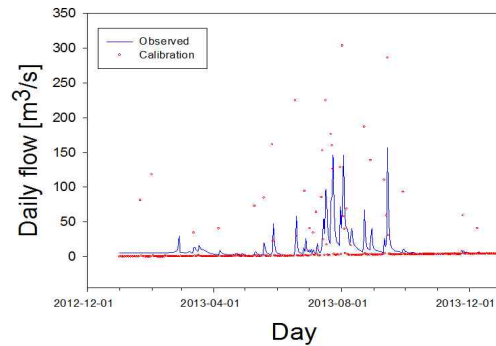
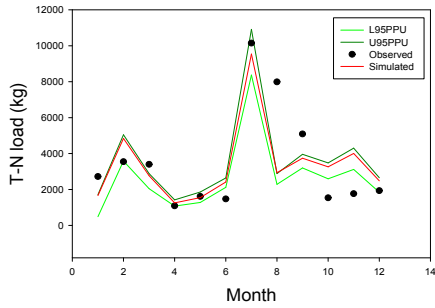
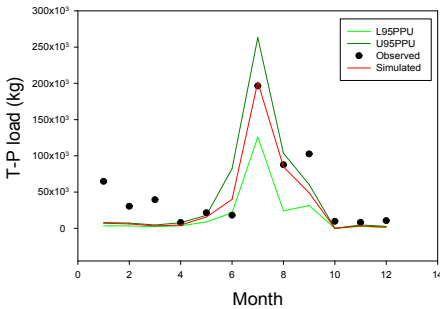


그림 6. 최적 매개변수에 의한 일유량과 관측유량

유역의 수질관리에 있어서 부영양화 현상을 제어하는 것은 무엇보다 중요하다. 부영양화 현상을 유발하는 주요 오염물질은 질소(nitrogen)와 인(phosphorus)의 화합물이다. 이러한 이유로 수질환경 기준에도 부영양화를 억제하고 관리하기 위한 목적으로 질소와 인이 포함되어 있다. 따라서 본 연구에서는 유량과 함께 수질(총질소와 총인)을 유역의 위험요소로 보고 수질모형을 구축하였다. SWAT의 수질 모듈을 활용하였고, 유량 모의같이 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 총인과 총질소에 대한 반복 모의(5,000회)를 통하여 매개변수를 최적화하였다. 2013년 관측자료로 검증한 결과는 그림 7과 같으며, 그림을 보면 부하량의 월 변동성이 관측을 잘 따라가고 있으며, 부하량의 정량적 크기도 관측을 잘 재현하고 있었다. 모형 추정치의 관측에 대한 NSE와 상관계수는 총질소의 경우 각각 0.65와 0.70, 총인의 경우 각각 0.75와 0.84로 높은 수준이었다.



(a) 총질소



(b) 총 인

그림 7. 최적 매개변수로 모의된 월 수질, 관측수질과 신뢰구간

#### 4. 미래 기후변화(RCP4.5/8.5)에 따른 유량 변화 전망

본 연구에서는 한국수자원학회 IHP 프로그램을 통해 다년간 시험유역으로 운영된 바 있는 청미천 유역을 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 그림 8에 나타난 청미천 유역의 총 유역면적은 596.6 km<sup>2</sup>이며 표 1에서 제시하는 바와 같이 6개의 표준유역으로 구성되어 있다.

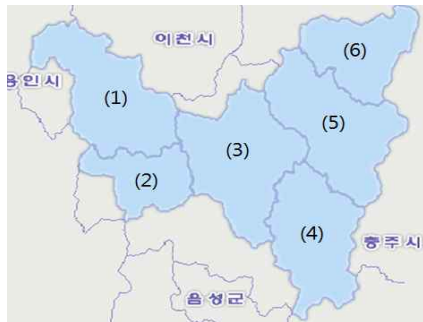


그림 8. 청미천 유역의 표준유역 현황

표 1. 청미천 유역 내 표준유역의 구성

표준유역 명칭	유역 면적 (km <sup>2</sup> )	표준유역 구분
청미천 상류(1)	116.17	청미천-죽산천하구
죽산천(2)	54.16	죽산천-죽산천하구
청미천 중류(3)	126.21	죽산천하구-응천하구
응천(4)	103.06	응천-응천하구
청미수위표(5)	119.91	응천하구-청미수위표
청미천 하류(6)	77.09	청미수위표-청미천하구

청미천 유역에는 설성, 삼죽, 생극 강우관측소에서 각각 1990년, 1990년, 1970년부터 강우자료가 측정되고 있고, 이천측후소에서 1973년부터 온도자료가 측정되고 있다. 본 절에서 검토되어지는 강우, 온도 및 증발산 자료는 크게 과거 관측자료와 미래 예측자료로 구분된다. 관측 강우자료는 3개 강우관측소(설성, 삼죽, 생극)의 개시년도부터 2013년까지의 일강우자료를 취득하여 연구에 사용하였으며, 관측 온도자료는 이천 측후소의 개시년도부터 2013년까지의 일평균온도자료를 취득하여 연구에 사용하였다. 또한 미래 예측자료는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 따라 GCM모형 중 HadGEM2-AO 모형(135 km×135 km)에서 생성된 2011년부터 2100년까지의 자료를 12.5 km×12.5 km 크기의 격자로 변환시키는 RCM 모형인 HadGEM3-RO의 생성 자료를 청미천 유역에 대해 환산하여 사용하였다. 미래 예측자료는 2개의 RCP 시나리오에 따라 일강우자료, 일평균온도로 환산되었다.

본 연구에서는 미래기간을 21세기 초반, 중반과 후반으로 구분(그림 9)하였으며, 위험요소 중 유량 변화를 전망하기 위하여 앞서 검토를 끝낸 SWAT 모형에 2종의 대표농도경로(RCP)에 따라 전망된 강수량과 기온 등과 같은 기후 자료를 입력하여 미래 기후에서의 유량 변화를 전망하였다.

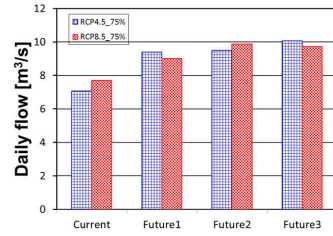


그림 9. 분석 기간 설정

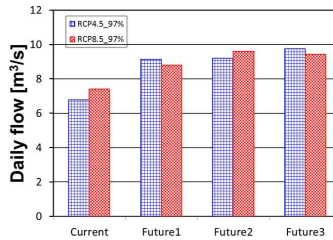
RCP8.5(미래 온실가스 증가가 2100년경 지구기후시스템에 8.5 W/m<sup>2</sup>의 직접적 온실효과를 유발한다고 가정)는 4.5와 비교하여 극한상황을 가정하는 시나리오으로써, 구체적으로 가장 강한 온난화를 야기하는 고배출 온실가스 시나리오으로써, 미래에 특

별한 저감 정책이 없을 경우를 가정하여 온실가스 농도가 급격히 상승하게 된다. 구분된 기간에 따른 입력자료는 SWAT 모형으로 입력되어진 후 보정된 매개변수를 이용하여 다시 수행되었으며, 그 결과를 풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량로 구분하여 미래를 전망하였다(그림 10, 그림 11).

그림 10을 보면 시나리오에 관계없이 특정 초과확률의 유량들이 대체로 미래로 갈수록 증가하리라 전망되었다. 극적인 증가 경향이 확인되는 사례는 연 최대 일유량으로 RCP4.5에 따른 21세기 후반에는 현재기후에 비하여 27% 증가, RCP8.5는 50% 증가하리라 전망되었다. 지역기후모델은 비슷한 수준의 일 평균 강수를 재생한다는 특징을 가지고 있어서 극한기후를 재현하기 어렵다는 한계가 있었지만 본 연구에서 이용한 HadGEM3-RA는 극한기후 모사에 탁월하다는 장점이 있다. 하지만 기존 지역기후모델의 한계인 일 평균 강수의 재생은 여전히 문제이기 때문에 연 최대 일유량과 다소 다르게 풍수량, 평수량, 저수량과 갈수량의 차이가 크지 않다.

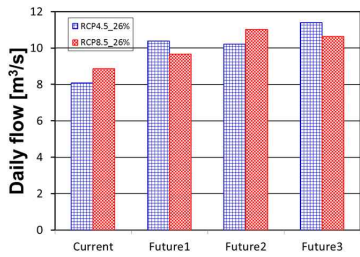


(c) 저수량 Q75

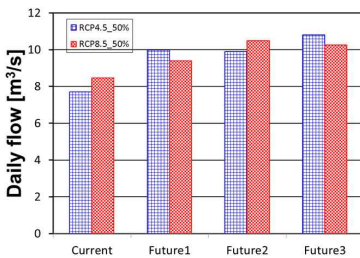


(d) 갈수량 Q97

그림 10. 미래 기후에서의 유량 전망

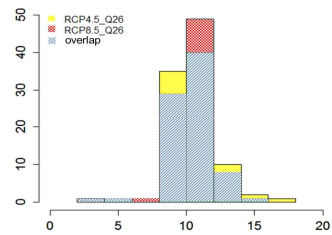


(a) 풍수량 Q26

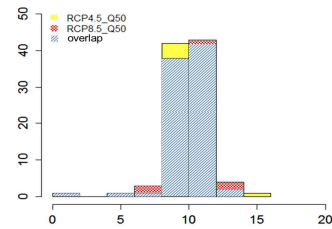


(b) 평수량 Q50

그림 11은 연도별 특정 초과확률에 대응하는 유량의 히스토그램이다. 히스토그램에서 우측 꼬리 부분이 두텁다면 특정 초과확률에 큰 수준의 유량이 발생할 빈도가 잦아지게 되며, 히스토그램의 좌·우 폭이 넓다면 분산, 즉 변동성이 큰 것으로 볼 때 더 크고, 작을 때는 더 작아지게 된다. 극한 홍수량의 히스토그램을 보면 RCP8.5가 4.5에 비하여 우측 꼬리부분이 길며 두터운데 이는 온실가스 감축이 시행되지 않았을 때에 더 큰 수준의 홍수량이 자주 발생하게 됨을 의미한다.



(a) 풍수량 Q26



(b) 평수량 Q50

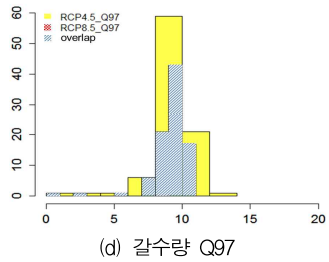
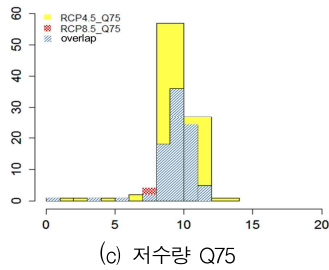


그림 11. 대표농도경로에 따른 유량 히스토그램

그림 12는 현재 기후와 미래 기후에서 유량의 월 변동성을 보여주고 있다. 그림을 보면 대표농도 경로와 관계없이 여름철과 그 중 7월의 유량이 가장 많았고, RCP4.5으로 전망된 유량이 RCP8.5에 비하여 더 많았다. 앞 선 결과에서 연 중 가장 큰 일유량은 RCP8.5에서 발생함을 확인했지만 월 평균 유량은 RCP4.5가 더 많았다. 이로부터 RCP8.5을 따른 기후자료가 큰 변동성을 갖고 있음을 재 확인하였다.

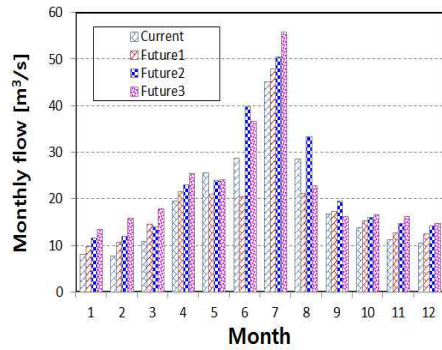
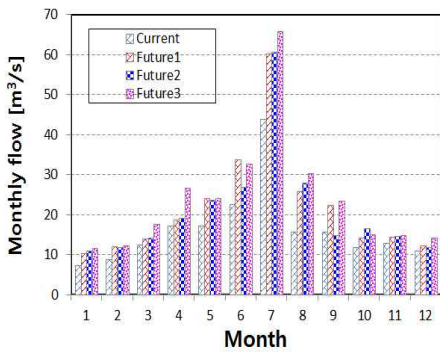
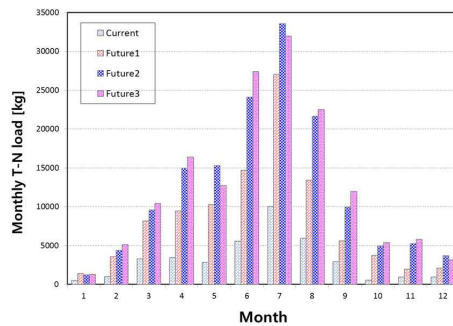
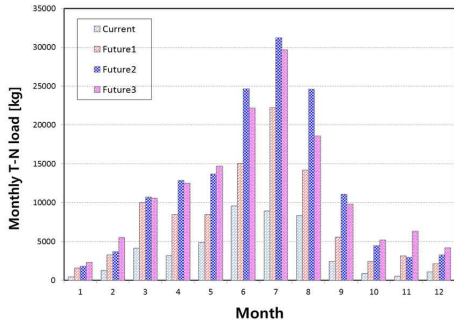


그림 12. 대표농도경로에 따른 유량의 월 변동성

### 5. 미래 기후변화(RCP4.5/8.5)에 따른 수질 변화 전망

그림 13은 SWAT 모형을 이용하여 모의한 미래의 대표농도경로에 따른 총질소의 월 변동성을 보여주고 있다. 그림 13에서 보면 총질소, 총인과 같은 영양물질은 유사와의 연관성으로 유량의 영향을 많이 받아 유량이 많으면 많아질수록 농도가 강해진다. 그림을 보면 유량 전망과 같이 대표농도 경로와 관계없이 유량이 많아지는 기간인 여름철에 부하량이 많은 편이며, 그 중에서도 7월의 부하량이 많았다. 또한 유량 전망과 같이 미래로 갈수록 부하량이 많아지는 전반적인 추세를 보이지만 RCP8.5의 여름철 전 기간 전망에서 21세기 중반의 부하량이 21세기 후반보다 많은 역전 현상이 발견되었다. 또한 7월의 월 평균이 유량이 RCP4.5가 RCP8.5 보다 많은 만큼 7월 총질소의 부하량도 RCP4.5의 전망이 많았다.

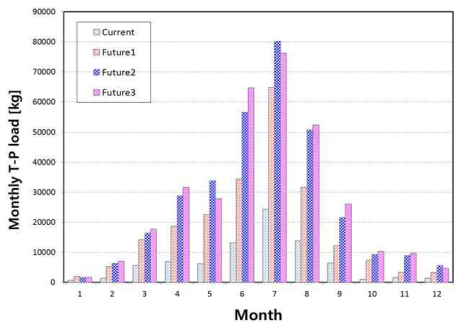




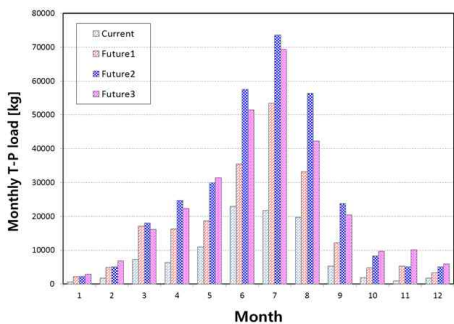
(b) RCP8.5

그림 13. 대표농도경로에 따른 총질소의 월 변동성

그림 14는 대표농도경로에 따른 총인의 월 변동성을 보여주고 있다. 현재 대비 미래 부하량의 증가 추세가 확인되었으며, 총질소와 유사하게 7월이 많았고 1월이 적은 월별 및 계절 변동성이 뚜렷하였다. RCP8.5의 여름철 전 기간 전망에서 21세기 중반의 부하량이 21세기 후반보다 많은 역전 현상 또한 발견되었다.



(a) RCP4.5



(b) RCP8.5

그림 14. 대표농도경로에 따른 총인의 월 변동성

## 6. 결론

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 청미천 유역에 대한 모델링을 실시하였다. 특히 GIS 소프트웨어인 ArcView와 연동되는 ArcSWAT 모형을 이용하여 실제유역의 물리적 모의가 가능하도록 하였다. 청미천유역에 대한 기후시나리오인 RCP 4.5 및 8.5를 토대로 하여 분석한 결과 8.5 시나리오에서 온실가스에 의한 지구온난화의 극심한 진행으로 인하여 연 및 월 강수량이 증가하고 무강수일과 강수강도가 증가할 것으로 예상되었으나 분석결과 극한 강수량은 RCP 4.5 보다 RCP 8.5 시나리오가 뚜렷하게 증가하지만 평균 강수 측면에서는 RCP4.5 시나리오가 더 큰 역전현상을 발생시키는 것으로 확인되었다. 또한 미래의 총질소와 총인의 수치변화를 분석한 결과 유량이 많아지면 오염물질의 이동이 많아짐에 따라 미래로 가면 갈수록 점차적으로 오염물질의 부하량이 증가됨을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] 장철희, 김현준, 김남원, “용담댐 유역의 장기-유출 분석을 위한 AVSWAT 2000 모형의 적용”, 한국수자원학회 학술발표회, 2003.
- [2] Arnold J.G., Allen P. M., “Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds.”, *Journal of Hydrology*, Vol.176, pp.57-77, 1996.
- [3] FitzHugh T. W., Mackay D. S., “Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model.”, *Journal of Hydrology*, Vol.236, pp.35-53, 2000.
- [4] Luzio M. D., Srinivasan R., Arnold J. G., “Integration of watershed tools and SWAT model into basins.”, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol.38, No.4, pp.1127-1141, 2007.
- [5] Nash. J. E., and Sutcliffe, J. V., “River flow forecasting through conceptual models: Part I: A discussion of principles.”, *Journal of Hydrology*, Vol.10, No.3, pp.283-290, 1970.