

<2009 SWAT-KOREA 컨퍼런스 특별호 논문>

CGCM 미래기후정보를 이용한 기후변화가 병성천 유역 수문 및 수질반응에 미치는 영향분석

An Analysis of the Effect of Climate Change on Byeongseong Stream's Hydrologic and Water Quality Responses Using CGCM's Future Climate Information

최 대 규* / 김 문 성** / 김 남 원*** / 김 상 단****

Choi, Daegyoo / Keem, Mun Sung / Kim, Nam Won / Kim, Sangdan

Abstract

For the assessment of climate change impacts for the Byeongseong stream, CGCM 3.1 T63 is selected as future climate information. The projections come from CGCM used to simulate the GHG emission scenario known as A2. Air temperature and precipitation information from the GCM simulations are converted to regional scale data using the statistical downscaling method known as MSPG. Downscaled climate data from GCM are then used as the input data for the SWAT model to generate regional runoff and water quality estimates in the Byeongseong stream. As a result of simple sensitivity analysis, the increase of CO₂ concentration leads to increase water yield through reduction of evapotranspiration and increase of soil water. Hydrologic responses to climate change are in phase with precipitation change. Climate change is expected to reduce water yields in the period of 2021-2030. In the period of 2051-2060, stream flow is expected to be reduced in spring season and increased in summer season. While soil losses are also in phase with water yields, nutrient discharges (i.e., total nitrogen) are not always in phase with precipitation change. However, it should be noted that there are a lot of uncertainties in such multiple-step analysis used to convert climate information from GCM-based future climate projections into hydrologic information.

Keywords : Byeongseong stream, Climate change, GCM, SWAT, Water quality, Water quantity

* 부경대학교 환경시스템공학부 석사과정

Graduate Student, Dept. of Envr. Sys. Engr., Pukyong National University, Busan, Korea

** 부경대학교 환경시스템공학부 석사과정

Graduate Student, Dept. of Envr. Sys. Engr., Pukyong National University, Busan, Korea

*** 정회원 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 책임연구원

Research Fellow, Water Resource Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi, Korea

**** 교신저자, 정회원 부경대학교 환경시스템공학부 조교수

Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Envr. Sys. Engr., Pukyong National University, Busan, Korea

(e-mail: skim@pknu.ac.kr)

요 지

병성천의 기후변화에 대한 영향을 평가하기 위하여 CGCM 3.1 T63의 A2 시나리오를 미래기후정보로 선택하였으며, CGCM으로부터 획득된 강수량자료를 비롯한 미래기후자료는 다지점 강수발생기를 통하여 지역기후자료로 규모내림되어졌다. 상기 규모내림된 기후자료는 병성천의 유출량 및 수질을 예측하기 위하여 SWAT모형의 입력자료로 사용되었다. 간단한 민감도분석의 결과로서, 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 증발산량의 감소와 토양수분의 증가를 유발하여 유출량을 증가시키는 작용을 하는 것으로 분석되었다. 수문반응은 강수의 변화와 동조되어 2021~2030년의 경우 유출량 감소가 예측되었으며, 2051~2060년의 경우 봄철 유출량 감소와 여름철 유출량 증가가 예측되었다. 토사유출량 또한 수문반응과 유사한 반응을 보임을 확인하였으나, 총 질소와 같은 영양물질은 반드시 수문반응과 비슷한 반응을 보이진 않음을 확인할 수 있었다. 하지만, 본 연구에서 사용된 GCM-규모내림과정-유역모형의 적용과 같은 다중모형화분석에는 각각의 모형화과정에서 많은 불확실성이 내재되어 있음에 유의하여야 할 것이다.

핵심용어 : 병성천, 기후변화, 전지구기후모형, SWAT, 수질, 수량

1. 서 론

기후변화는 수문변화를 일으키는 주된 원인중 하나이다. 현재 전 세계적으로 연구된 여러 기후실험이나 과거 기상자료의 분석결과를 살펴보면 미래의 기후가 현재에 비해 많이 달라질 것으로 예측하고 있으며(IPCC, 2007), 우리나라의 과거 기상자료 분석결과를 보더라도 최근 10년(1999~2008년)과 과거 30년(1971~2000년)의 기후자료를 비교하였을 때 연평균 강수량과 기온이 각각 9.1%, 0.6℃ 상승하였다(기상청, 2009). 기후변화에 따른 수문변화는 단기적인 관점에서 보았을 때, 가뭄과 홍수 등과 같은 기상이변을 유발할 수 있으며 장기간 동안 지속될 경우 지역의 수자원 및 이와 연관된 수질, 식생에 영향을 줄 수 있다. 특히 수자원은 인류의 생활에 직접적인 관계를 맺고 있으며 토사, 영양물질과 같은 수질 및 생태환경 변화 등 인간에게 가해지는 영향력이 대단하다.

기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 연구가 국내외적으로 진행되고 있다. 외국의 연구 경향을 살펴보면 단일 혹은 여러 전지구기후모형(Global Climate Models, GCMs)으로부터 제공되는 미래기후자료를 바탕으로 이를 직접적으로 사용하거나 적절한 규모내림 기법을 적용한 기후자료를 강우-유출모형에 적용하여 유역의 유출반응을 살펴보는 연구가 일반적으로 진행되었으며(Hanratty and Stefan, 1998; Stonefelt, 2000; Gosain *et al.*, 2006; Jha *et al.*, 2006; Githui *et al.*, 2008) 더 나아가 수질에 대한 영향을 분석하는 연구사례도 살펴볼 수 있다(Bouraoui *et al.*(2002)). 한편, 여러 GCMs의 기후자료를 바탕으로 이에 의한 불확실성을 분석한다거나(Takle *et al.*, 2005) GCMs 기후자료를 유역모형에 적용함에 따라 발생하는 불확실성을 분석

한 사례도 찾아볼 수 있다(Jha *et al.*, 2004). 국내의 경우에도 민감도 분석을 통한 유출반응을 살펴보기거나(예령 등, 2009) 단일 GCM결과를 규모내림한 뒤 이를 유역모형에 적용하여 유역의 유출 및 수질에 대한 영향을 분석한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(Kim *et al.*, 2007; 이용준 등, 2008; 이길하 등, 2008, 한수희 등, 2009).

본 연구에서도 이러한 연구 경향에 동조하여 우리나라의 대표적인 농촌지역인 병성천 유역을 대상으로 IPCC에서 제시한 표준시나리오중 하나인 A2 온실가스 배출시나리오가 적용된 CGCM3.1 T63으로부터의 미래 기후정보를 통계학적으로 규모내림한 후, 이를 SWAT 모형의 입력자료로 사용하여 기후변화에 따른 병성천 유역의 수문 및 수질 반응을 살펴보고자 한다. 본 연구에서 주요하게 사용된 모형의 목록과 이를 통한 분석절차를 정리하면 아래와 같다.

사용된 모형의 목록:

- 전지구기후모형의 적용: CGCM 3.1 T63 A2 온실가스 배출시나리오(CCCma, 2008)
- 규모내림 기법: MSPG(김문성 등, 2008)
- 유역모형: SWAT 모형(Neitsch *et al.*, 2005)

분석절차:

- CGCM3.1T63-MSPG를 이용한 현재 강수량 및 기온 재현 검증
- 유역모형의 보정 및 검증
- 모의된 현재기후자료에 대한 유역의 수문 및 수질반응과 관측된 현재기후자료에 대한 유역의 수문 및 수질반응 비교 검증
- 대기 중 이산화탄소 농도에 대한 수문반응모의
- 미래기후조건에 대한 수문 및 수질 영향 분석

2. 연구 방법

2.1 대상유역

병성천은 낙동강 하구로부터 상류 약 258.9 km 지점에서 낙동강의 우안 측으로 유입되는 낙동강의 제1지류로서 그 유역면적은 433.11 km², 유로연장은 32.79 km, 주하천길이는 5.51 km 이다. 병성천 유역은 대체로 남북으로 뻗은 장방형의 형상을 이루면서, 동경 127°58' 19" ~ 128°14' 52", 북위 36°14' 3" ~ 36°32' 16" 사이에 위치하고 있으며 남북의 길이는 약 33.5 km 동서로는 약 25.0 km가 된다.

병성천 유역의 토지이용은 주로 산림과 농경지의 비중이 매우 높으며 농경지의 경우 대부분이 논과 과수원으로 구성되어 있다. 토양은 대부분이 사양질 또는 식양질로 배수가 잘되는 특성을 지니고 있다(상주시, 2007)(Fig. 1).

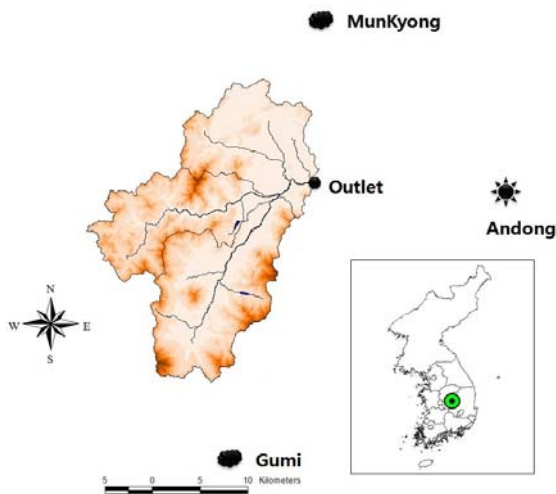


Fig. 1. Location of Byeongseong Stream Watershed

2.2 현재 및 미래기후자료 구축

기후변화를 예측하기 위해서는 온실가스 증가 시나리오가 적용된 미래의 기후변화 시나리오가 필요하다. 전 세계적으로 이를 위한 기본적인 도구로 GCM을 통한 기후변화모의가 광범위하게 이용되고 있다. 본 연구에서는 IPCC AR4의 추천 GCMs 중 하나인 IPCC의 SRES의 A2시나리오가 적용된 Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis에서 개발한 CGCM 3.1 (T63)의 결과를 이용하였다. CGCM3의 한반도 예측결과를 살펴보면(Fig. 2), A2 시나리오의 경우 일 최대 기온은 21세기 말에 약 4°C 정도 상승하고 일 최소 기온은 약 3.5°C 정도 상승하는 것으로 예측되고 있으며 연

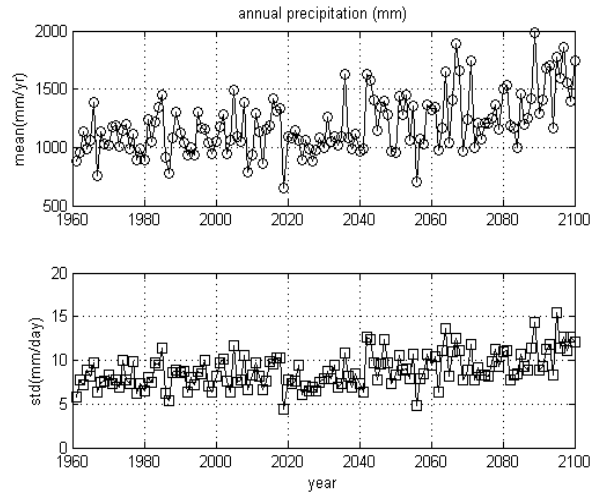


Fig. 2. Yearly Precipitation Projection from CGCM3.1 T63 A2 Scenario

강수 총량의 경우에는 30 % 이상 상승할 것으로 예측되고 있다.

GCM은 그 사용목적 특성상 대체적으로 낮은 해상도에서 미래기후에 대한 정보를 제공하고 있다. CGCM 3.1 (T63)의 경우에도 해상도가 경위도 2.81°× 2.81°이며 대략 한 개의 격자크기가 300 km×300 km를 보이고 있다. 우리나라의 면적이 약 10만 km² 임을 생각해볼 때, 격자 한 개에서 모의된 결과가 우리나라의 전체의 기후를 설명하고 있음에 따라, 병성천 유역에 대한 기후변화의 영향을 살펴볼 목적으로 GCM의 기후정보를 직접 이용하기에는 적절하지 않음을 알 수 있다.

따라서 CGCM의 결과로부터 김문성 등(2008)에서 제시한 다지점 일강수발생기를 이용하여 병성천 유역에 대한 미래강수자료를 재구성하였다. 이후 습도, 일사량, 풍속, 최고/최저기온의 경우 과거 1979~2008년의 관측 자료를 우기일과 건기일로 구분지어 각각에 대하여 대수정규분포에 근거한 난수발생을 통하여 미래기상자료를 생성하였다. 기온의 경우 과거관측자료를 통하여 구현한 자료에 GCM에 의하여 예측된 미래자료와 현재자료와 차이를 단순 편차보정한 후에 미래기후자료를 생성하였으며, 습도, 일사량, 풍속의 경우에는 과거 관측 자료의 통계적 특성이 미래에도 동일하다고 가정하여 미래기후자료를 생성하였다.

2.3 유역모형의 구축

본 연구에 적용한 유역모형인 SWAT 모형은 USDA Agricultural Research Service에서 개발된 모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 유역내의 장기 강우-유출, 유사의 이동, 농화학물질을 예측하는 준분포형 유역 모형이다(Neitsch *et al.*, 2005). Arcview

Table 1. Model Input Data Information

| Data Type | Source | Description |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| DEM | Water Management Information System | 30 m×30 m Resolution(grid. file) |
| SoilType | " | " |
| Landuse | " | " |
| Stream | " | " (shp.file) |
| Rainfall | Korea Meteorological Administration | Mungyeong and Gumi data(dbf.file) |
| Max/Min Temp | " | " |
| Wind speed | " | " |
| Humidity | " | " |
| Solar radiation | " | Andong data(dbf.file) |

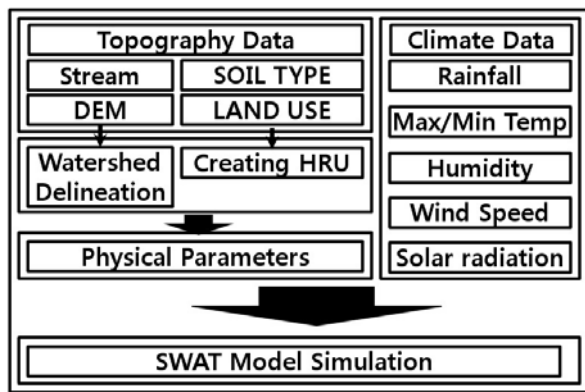


Fig. 3. Process of SWAT Model

GIS 소프트웨어와 연계되어 수치고도자료 및 하천망 자료를 통하여 전체 유역을 소유역으로 분할하고, 토양도와 토지이용도를 중첩하여 생성된 수문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)별로 수문량 및 오염물질 배출량을 계산한 후, 이를 하도 추적하는 방식을 취하고 있다.

Table. 1과 Fig. 3은 모형을 구축하기 위하여 요구되는 자료와 구축과정을 나타내고 있다. SWAT 모형을 구축하기 위해서는 크게 지형자료와 기상자료가 필요하다. 하천망도와 수치표고모형을 통하여 소유역을 분할하고 토양도와 토지이용도를 이용하여 수문학적반응단위를 만든 후 물리적 변수를 산정하며 이후 기상자료를 입력하여 모의를 진행할 수 있다. 병성천 유역 내 장기간 기상관측소의 부재로 인하여 인접지역인 구미와 문경의 기상자료를 이용하였으며, 일사량의 경우는 안동지점의 기상자료를 사용하였다.

장기간의 유역내의 수문변화를 분석하기 위해서는 장기간의 일단위 실측유량 및 수질자료가 필요하지만 병성천 유역에는 이러한 자료가 부족하다. 다만 국립환경과학원 낙동강물환경연구소에서 제공하는 병성천 유

역 출구지점의 2004년부터 관측한 8일간격 유량 및 수질 자료가 존재한다. 본 연구에서는 실측자료에 대한 차선책으로 5년간의 8일 간격 실측자료를 자료의 재현성이 우수한 TANK 모형(Suguwara, 2000)을 이용하여 1988~2007년간의 유량자료로 재구축하였다. 이에 대한 상세한 사항은 김상단과 김재철(2007)을 참조할 수 있다. 수질자료의 경우 한수희 등(2007a)의 연구를 바탕으로 최소분산 비편향 추정기법(Bradu and Mundlak, 1970)을 이용하여 유량과 오염부하량 사이의 관계를 정립하고 1일 간격으로 재구축된 유량자료를 이용하여 1일 간격의 오염부하량 자료를 재구축하였다. 이에 대한 상세한 사항은 한수희 등(2007b)을 참조할 수 있다. 이후 이를 병성천 유역 출구지점의 실측자료로 간주하여 SWAT 모형의 매개변수 보정을 실시하였다.

SWAT-병성천 모형의 유역분할도는 Fig. 4와 같으며, 1986~2007년 22년간의 장기간 기상자료를 이용하



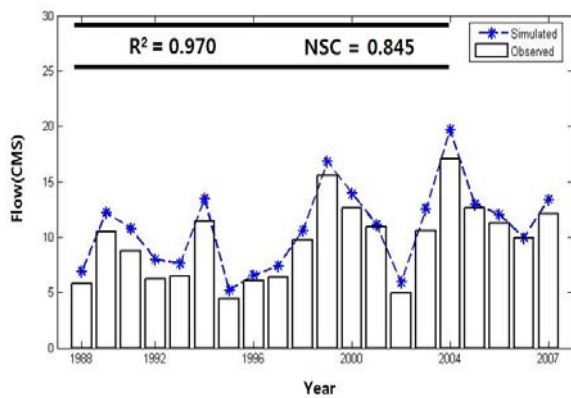
Fig. 4. Subbasins of Byonseong Watershed

여 모의할 때, 앞선 2년을 예비기간으로 두고 이후 10년간의 모의자료와 실측자료와의 비교를 통해서 유량, SS, TN에 대한 항목들의 보정을 실시하였으며, 1998-2007년 자료는 검증에 이용하였다. 모형 보정의 검증지표로서, 결정계수 R2 와 Nash and Sutcliffe (1970)에서 제안한 모형효율계수(Nash-Sutcliffe Coefficient, NSC)를 이용하여 $R^2 > 0.6$, $NSC > 0.5$

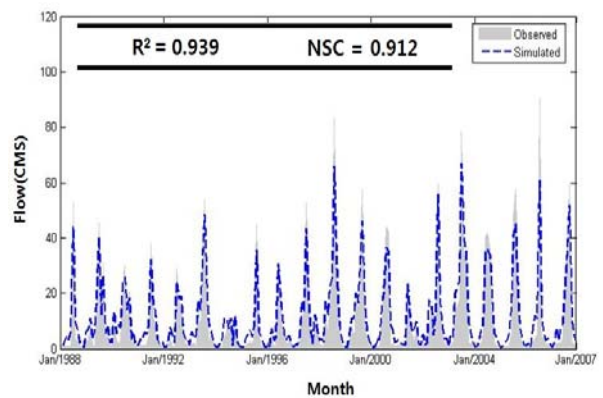
의 조건이 충족될 때까지 매개변수를 조절하여 모형을 보정하였다(최대규 등, 2008). 기본적으로 매개변수는 모형의 기본 값(default value)을 이용하였고 보정에 의해 변경된 매개변수는 Table 2에 명시하였다. 모의결과를 월별, 연별 비교하였고 구축된 모형으로부터의 모의자료와 실측자료의 비교를 Figs. 5~7에 나타내었다.

Table 2. Parameter Values in SWAT after Calibration

| Parameter | Model Process | Range | Calibration | Description |
|-----------|---------------|-------------|-------------|---|
| SPCON | Sediment | 0.0001-0.01 | 0.0003 | Coefficient in sediment transport equation |
| SPEXP | " | 1.0-2.5 | 1.2 | Exponent in sediment transport equation |
| RHOQ | Nutrient | 0.05-0.50 | 0.3 | Local algal respiration rate at 20°C |
| AI1 | Nitrogen | 0.07-0.09 | 0.09 | Fraction of algal biomass that is nitrogen |
| NPERCO | " | 0.00-1.00 | 1.0 | Nitrate percolation coefficient |
| SOL_ORGN | " | All | 600 | Initial organic N concentration in soil layer |
| SOL_NO3 | " | All | 5 | Initial NO3 concentration in soil layer |

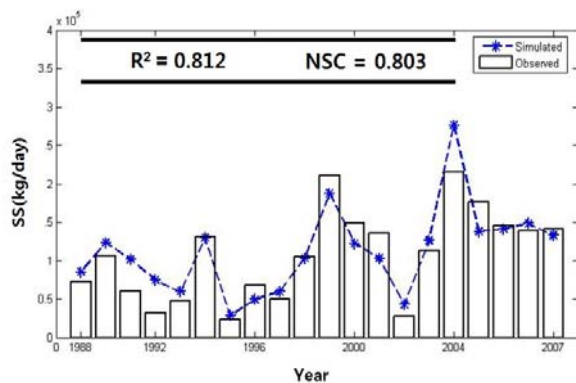


(a) Year

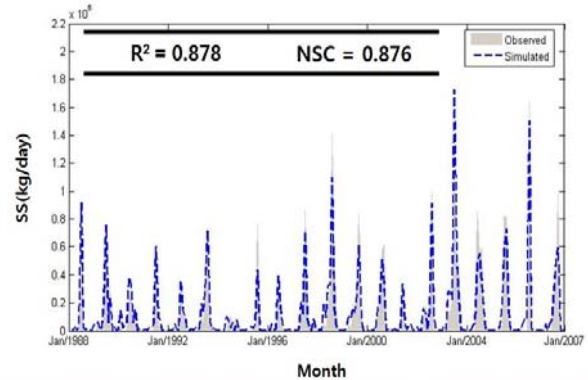


(b) Month

Fig. 5. Calibration of Simulated Flow against Observed Values

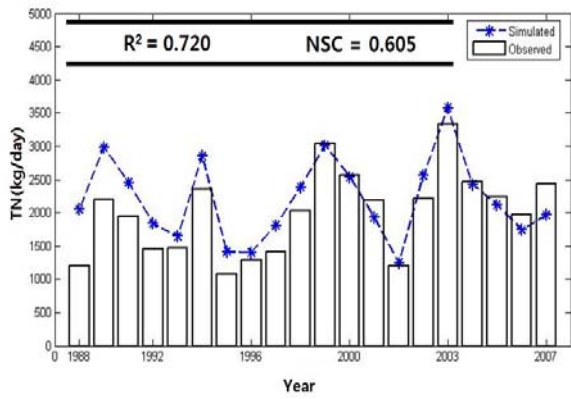


(a) Year

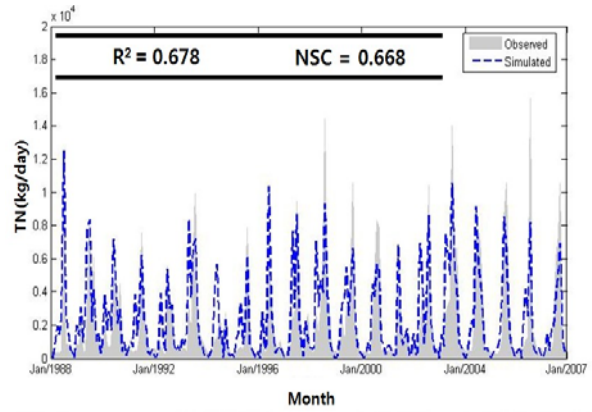


(b) Month

Fig. 6. Calibration of Simulated SS against Observed Values



(a) Year



(b) Month

Fig. 7. Calibration of Simulated TN against Observed Values

Table 3. Climate Change Scenarios

| No | Description | | | |
|-----|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|---------|
| | Scenario | Temperature difference | Precipitation difference | CO2 |
| 1-A | Present(GCM) : CGCM3.1 T63 1979~2008 | -0.3 °C | -4 % | 330 ppm |
| 1-B | Present(GCM) : CGCM3.1 T63 1979~2008 | -0.3 °C | -4 % | 660 ppm |
| 2 | Future 1 : CGCM3.1 T63 2021~2030 | +0.9 °C | -16 % | 660 ppm |
| 3 | Future 2 : CGCM3.1 T63 2051~2060 | +2.1 °C | +3 % | 660 ppm |

3. 결과 및 고찰

3.1 현재 및 미래기후자료 구축

CGCM3.1 (T63)에서 모의한 미래기후(2001~2100년) 중 2021~2030년, 2051~2060년 기간을 각각 Future 1, Future 2로 정하고 추가적으로 GCM으로 모의된 현재의 기후결과를 Present로 정하여 이를 적용 분석하였다 (Table 3). 특히 이산화탄소농도의 변화에 대한 유역반응의 민감도를 알아보기 위해 Present를 1-A와 1-B로 나누었다. 각 시나리오에 대해 10년 단위 총 20개의 sets을 모의하여 이를 SWAT 모형의 기상자료로 입력하여 분석을 실시하였다.

Table 4는 병성천유역의 실측 강수량, 기온 및 시나리오 별 강수량, 기온이다. 현재기후상태를 표현하는 Present 시나리오의 경우 실측자료에 비해 연중 강수량이 -4%, 기온은 연중 -0.3°C 정도로 약간 작게 모의되었음을 알 수 있다. 연중 강수량과 기온이 전반적으로 관측자료와 유사하게 거동하고 있으나 상대적으로 여름철에 오차의 폭이 다소 두드러졌다. 이후 미

래기후 시나리오인 Future 1은 10~11월을 제외한 나머지 월에서 강수량이 크게 감소하였으며 기온의 경우 연 중 약 1°C 정도 상승하였다. Future 2의 경우 강수량이 봄, 겨울에 양이 약간씩 줄었지만 여름에는 증가하였으며 기온은 약 2°C 정도 매월 고르게 증가할 것으로 예측되었다. Fig. 8에 관측자료에 대한 모의된 자료(Present, Future 1, Future 2)의 편차를 도시하였다.

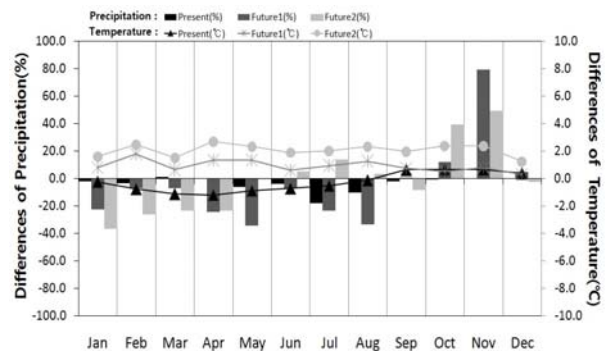


Fig. 8. Differences of Precipitation and Temperature between Observed and Future Scenarios

Table 4. Monthly Mean Precipitation and Temperature of Each Scenario

| | Observed | | Present | | Future1 | | Future2 | |
|------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| | Precip(mm) | Temp(°C) | Precip(mm) | Temp(°C) | Precip(mm) | Temp(°C) | Precip(mm) | Temp(°C) |
| Jan | 24.3 | -1.4 | 21.9 | -1.7 | 18.7 | -0.7 | 15.5 | 0.2 |
| Feb | 31.9 | 0.6 | 28.1 | -0.2 | 29.6 | 2.3 | 23.6 | 3.0 |
| Mar | 46.8 | 5.9 | 47.6 | 4.8 | 43.4 | 6.6 | 35.9 | 7.5 |
| Apr | 77.8 | 12.5 | 77.4 | 11.3 | 58.6 | 13.8 | 59.8 | 15.1 |
| May | 103.7 | 17.4 | 97.4 | 16.5 | 68.1 | 18.7 | 103.2 | 19.7 |
| Jun | 171.8 | 21.6 | 167.7 | 20.9 | 158.9 | 22.3 | 180.6 | 23.5 |
| Jul | 304 | 24.6 | 285.6 | 24.1 | 232.4 | 25.5 | 345.3 | 26.6 |
| Aug | 268.2 | 25 | 257.6 | 24.9 | 178.5 | 26.3 | 277.2 | 27.3 |
| Sep | 144.5 | 20 | 142.2 | 20.6 | 144.8 | 20.8 | 132.4 | 22.0 |
| Oct | 42.6 | 13.9 | 41.5 | 14.5 | 47.7 | 14.4 | 59.2 | 16.3 |
| Nov | 36.1 | 6.8 | 36.0 | 7.4 | 64.5 | 7.5 | 53.8 | 9.1 |
| Dec | 19.4 | 0.7 | 18.8 | 1.1 | 24.2 | 1.0 | 17.3 | 1.9 |
| Year | 1270.9 | 12.3 | 1221.8 | 12.0 | 1069.4 | 13.2 | 1303.7 | 14.4 |

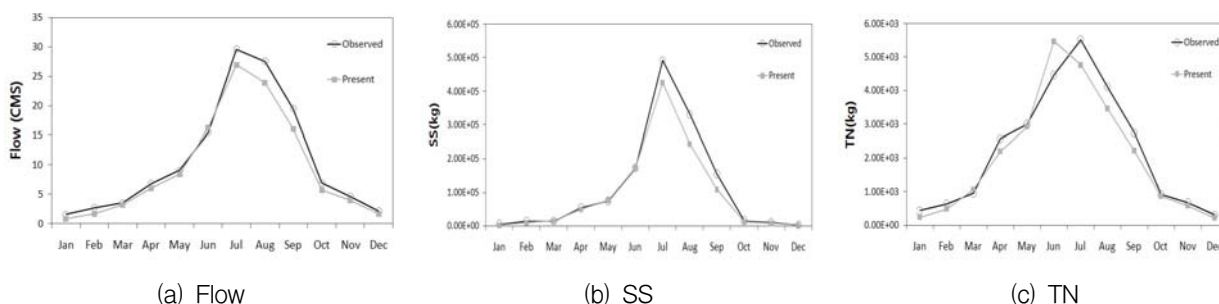


Fig. 9. Comparisons between Observed and Present Scenario

3.3 현재 기후 재현성 평가

미래기후에 대한 수문 및 수질반응의 영향분석을 하기에 앞서 기후모의기법이 과연 어느 정도 타당한지에 대한 검토가 필요하다. 따라서 실측 자료와 Present 기후모의자료를 이용하여 유량 및 수질을 모의한 결과를 서로 비교하였다. 이는 유역모형을 보정할 때와 유사한 과정으로 GCM으로 모의된 현재 기후가 얼마나 현재의 수문상태를 재현하는지에 대한 평가의 일환으로 볼 수 있다.

Fig. 9를 살펴보면, 유량과 SS의 경우 여름철에 양이 조금 감소하였으나 전반적으로 관측기후 자료로부터의 결과와 현재기후모의자료로부터의 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 하지만 TN의 경우 전반적인 거동은 잘 재현하였으나 연중 최고치를 기록하는 월이 7월에서 6월로 변경되었다. 따라서 이후 미래기후정보를

이용한 미래 수문 및 수질 반응에 대한 영향분석 시에 이 정도 만큼의 불확실성은 이미 내제되어 있다고 보는 것이 타당할 것이다.

3.4 시나리오 별 모의 결과

김문성 등(2008)에 의해 개발된 강수발생기 모형과 난수발생을 통하여 획득된 시나리오 별 기상자료를 SWAT 모형에 적용하여 분석하였다. 분석한 항목으로는 보정된 모형을 통하여 재현된 유량, SS, TN 항목 이외에도 SWAT에서 모의되는 증발산량, 잠재증발산량, 토양수분양에 대해서도 분석을 실시하였다.

SWAT모형에서는 Morris and Gifford (1983)의 이산화탄소의 농도가 330ppm에서 660ppm으로 증가 시에 기공전도도가 40 % 감소한다는 연구결과를 기초로 하여 이산화탄소 농도에 따른 잎의 변화에 대한 모의기능을 제공한다(Eq. 1)(Neitch *et al.*, 2005).

$$g_{i,CO_2} = g_i[1.4 - 0.4(CO_2/330)] \quad (1)$$

여기서, g_{i,CO_2} 는 이산화탄소 효과가 반영된 기공전도도 (m/s), g_i 는 최대 기공전도도(m/s), CO_2 는 대기 중의 이산화탄소 농도(ppm)이다. 따라서 이산화탄소의 농도에 따른 수문변화를 살펴보기 위해 시나리오 1-A, 1-B를 비교분석을 실시하였다. 분석결과 배증된 이산화탄소에 의해 증발산 및 잠재증발산량이 연간 약 -16%, -11%로 감소하였으며 토양수분량, 지표유출량, Water Yield는 연간 약 10% 내외로 증가하였다. 이는 대기 중으로 배출되는 증발산량 감소가 토양수분량의 증가로 이어졌기 때문이다(Fig. 10).

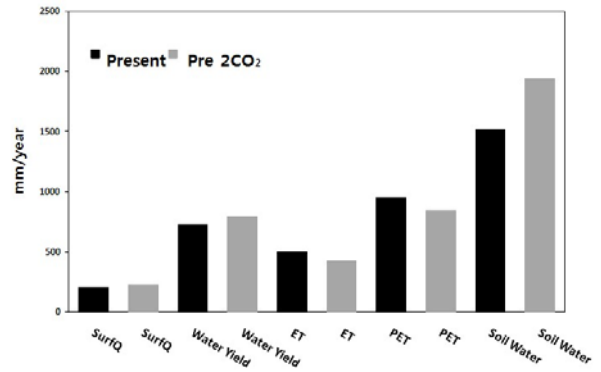
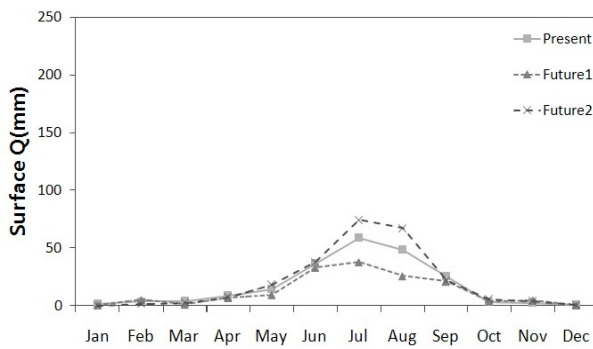
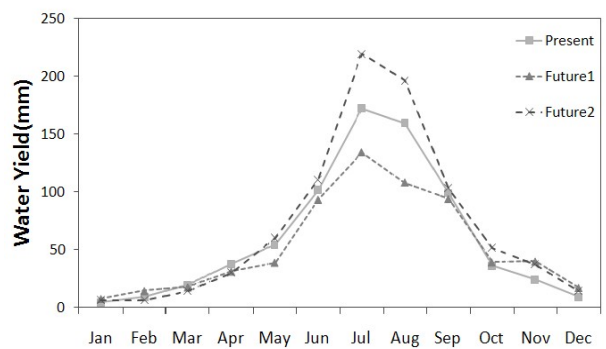


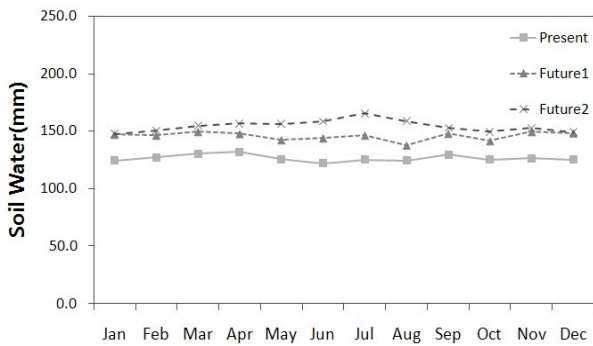
Fig. 10. Comparison of Hydrological Components between 1-A Scenario and 1-B Scenario



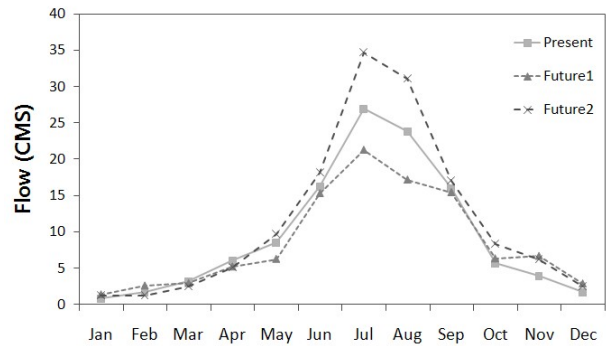
(a) Surface Runoff



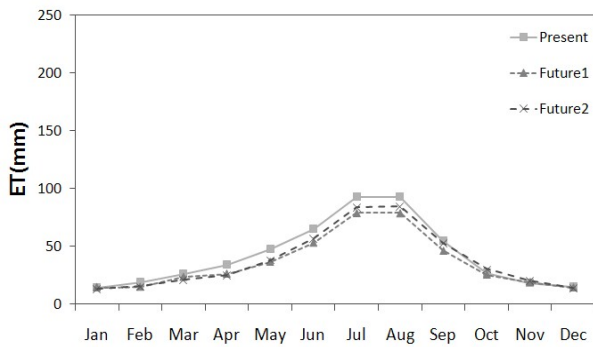
(b) Water Yield



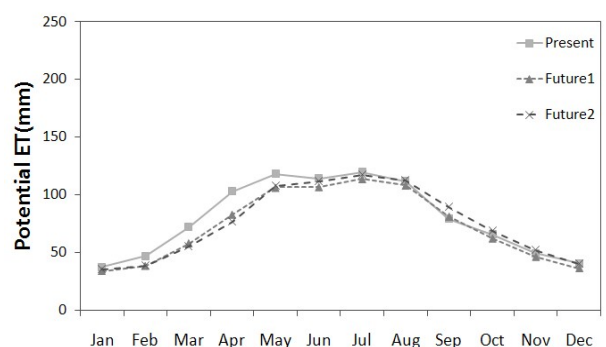
(c) Soil Water



(d) Flow(outlet)



(e) Potential evapotranspiration



(f) Evapotranspiration

Fig. 11. Comparison of Hydrological Components among Future Scenarios

Fig. 11은 Present와 각각의 미래 시나리오별 수문 변화에 대한 분석결과이다. Future1의 토양수분량을 제외한 모든 항목에서 감소하였다. 이는 Future1의 강수량이 줄었기 때문이다. 하지만 토양수분량이 증가한 것은 이산화탄소 농도의 증가로 인한 증발산량 감소의 효과로 토양수분량이 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 자세히 살펴보면 지표유출량 -29 %, Water Yield -13 % 토양수분량 15 %, 유역출구지점의 유량 -12 %, 증발산량 -14 %, 잠재증발산량 -9 %가 변화되었다. Future2의 경우 대부분의 수문성분이 양적으로 증가한 형태로 나타나고 있다. 특히 여름철의 양적 증가가 두드러지게 나타났는데 이는 Future2의 경우 여름철 강수량 증가와 이산화탄소 농도의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 자세히 살펴보면 지표유출량 15 %, Water Yield 17 % 토양수분량 22 %, 유역출구지점의 유량 17 %, 증발산량 -10 %, 잠재증발산량 -5 % 정도의 변화가 일어났다.

Fig. 12는 SS와 TN에 대한 분석결과이다. SS의 월별 거동은 Future1, 2 모두 Present와 유사하게 예측되었다. Future1은 10~11월 이외에 강수량이 감소하여 특히 여름철 SS의 양이 -36 % 감소하였고 연중 -26 % 감소하였다. Future2는 여름철 강수량의 증가로 인해 여름철 SS의 양은 30 % 증가하였으며 연중 28 % 증가하였다. 이를 정리하면 수문반응은 강수의 변화와 동조되어 2021~2030년의 경우 유출량 감소가 예측되었으며, 2051~2060년의 경우 봄철 유출량 감소와 여름

철 유출량 증가가 예측되었다. 토사유출량 또한 수문반응과 유사한 반응을 보임을 확인하였으나, 총 질소와 같은 영양물질은 반드시 수문반응과 비슷한 반응을 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 추후 이에 대한 보다 상세한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

Table 5는 연평균 값에 근거하여 기후시나리오별 편차를 비교한 결과이다. 관측자료와 비교한 Present 경우 강수량이 -4 % 감소함에 따라 유역출구지점의 유량 -12 %, SS -16 %, TN -7 %로 감소하였다. 여기서 주목할 만한 사항은 강수의 변화량보다 유역의 반응이 보다 증폭되어 나타난다는 점이다. Future1은 강수량이 Present에 비해 -13 % 감소하여 큰 폭으로 감소하였으나 이산화탄소 농도에 따른 토양수분량이 증가 등의 원인으로 유량의 감소는 -10 % 정도로 강수의 변화량보다 약화되었다. SS는 -26 %, TN은 -30 % 등으로 강수의 변화량을 초과하는 감소폭을 나타내는 것으로 살펴볼 수 있다. Future2는 강수량이 7 % 증가하였으며 그에 따라 유량의 경우에는 20 %, SS는 28 % 증가하였으나, TN은 오히려 -13 % 감소되었음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 영양물질의 거동이 수문반응과 동조하지 않는 현상에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 현재상태의 오차(Observed vs Present)와 미래상태-현재상태의 편차(Future-Present)의 비교에서 알 수 있듯이 미래기후정보를 이용한 미래의 수문 및 수질반응에는 제시된 결과에 많은 불확실성이 있음을 살펴볼 수 있을 것이다.

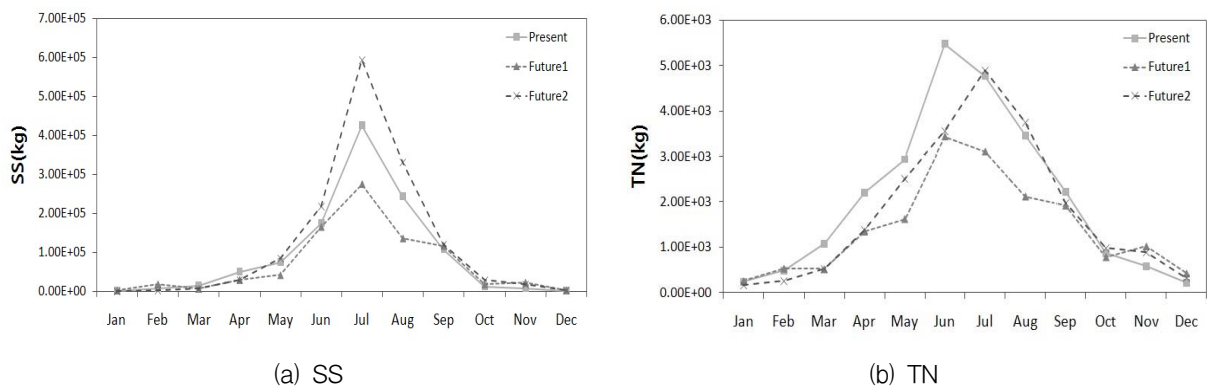


Fig. 12. Comparison of Water Quality Components among Future Scenarios

Table 5. Errors or Differences of Climate Scenario with Annual Values

| | Precipitation | Flow | SS | TN |
|-----------------------|---------------|-------|-------|-------|
| Present (vs Observed) | -4 % | -12 % | -16 % | -7 % |
| Future1 (vs Present) | -13 % | -10 % | -26 % | -30 % |
| Future2 (vs Present) | 7 % | 20 % | 28 % | -13 % |

4. 결 론

본 연구에서는 CGCM 3.1 T63의 A2 시나리오를 미래기후정보로 선택하였으며, CGCM으로부터 획득된 강수량 자료를 비롯한 미래기후자료는 다지점 강수발생기를 통하여 지역규모의 자료로 규모내림 되어졌다. SWAT 모형을 이용하여 병성천 유역을 구축한 뒤 미래기후 자료를 이용하여 유역의 수문, 수질변화에 대하여 살펴보았다. 1971~2000년 기간을 재현한 기후시나리오의 경우 연중 변화모습을 우수하게 재현하였으나 비교적 여름철에 감소가 두드러지게 나타나 이를 유역모형에 적용하였을 경우 유역출구지점의 유량, -12 %, SS -16 %, TN -7 %로 감소하였다. 같은 기후조건이더라도 이산화탄소의 농도가 증가할 경우에 증발산량의 감소로 인한 토양수분양의 증가를 유발하여 유출량이 증가하는 것으로 분석되었다. 2021~2030년 기간에는 기온은 0.9℃ 상승, 강수량은 -16 % 감소하였지만 배증된 이산화탄소 농도로 인하여 유량의 감소는 -10 %로 감소 폭이 강우량에 비하여 적게 나타났으며 SS는 -26 %의 감소가 예측되었다. 2051~2060년 기간에는 기온이 2.1℃ 상승하였으며 강수량은 3 % 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 유량 20 %, SS 28 % 증가하였다. 미래기후조건에서 유량과 SS의 경우 강수량의 연중 변동과 동조하였으나 TN의 경우 2021~2030년에는 -30 % 감소하였고 특히 강수량이 늘어난 2051~2060년 기간에는 오히려 -13 % 감소하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 많은 불확실성이 내재되어 있다. 이는 낮은 해상도를 지닌 GCM을 규모 내림하는 과정, 유역모형을 구축하는 과정, 미래기후 시나리오 적용에서 여러 가정과 불확실성을 지니고 있기 때문이다. 이러한 과정들은 분석기술 발전과 양질의 자료들이 확보하게 된다면 신뢰성 있는 결과를 도출 할 수 있을 것이라 사료되며 본 연구에서 진행된 여러 과정들은 앞으로도 계속될 유역규모의 기후변화에 대한 영향분석에 도움을 줄 수 있으리라 본다.

감사의 글

본 연구는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-521-D00499).

참 고 문 헌

기상청 (2009). 한반도 기후변화 추세 분석, pp. 2-12.
김문성, 안재현, 신현석, 한수희, 김상단 (2008). “다지점

일강수 발생모형 : 낙동강 유역 강수관측망에의 적용.”, **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회지, 제24권, 제6호, pp. 725-740.

김재철, 김상단 (2007). “오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유행분석.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제3호, pp. 332-338.

상주시 (2007). 상주통계연보. 75-5110000-000001-10.

예령, 정세웅, 이홍수, 윤성완, 정희영 (2009). “SWAT 모형을 이용한 대청댐 유역의 기후인자에 따른 유출 및 유사량 민감도 평가.”, **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제1호, pp. 7-17.

이길하, 이근상, 조홍연 (2008). “기후변화에 따른 임하댐 유역의 GIS 기반 토양침식 추정”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제3D호, pp. 423-429.

이용준, 안소라, 강부식, 김성준 (2008). “SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문-수질 변화 분석 (II)”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6B호, pp. 665-673.

최대규, 박무중, 김재철, 김상단 (2008). “SWAT 모형을 이용한 수변완충지대 설정에 따른 토사유출량 저감 효과분석”. **한국방재학회지**, 한국방재학회, 제8권, 제2호, pp. 111-118.

한수희, 강두기, 신현석, 유재정, 김상단 (2007a). “비편향 회귀분석모형을 이용한 낙동강 본류 부유사량 산정방법의 신뢰도 향상.” **수질보전한국물환경학회지**, 한국물환경학회지, 제23호, 제2호, pp. 251-259.

한수희, 신현석, 김상단 (2007b). “낙동강 유역관리를 위한 부하량 유행곡선의 적용 가능성.” **수질보전한국물환경학회지**, 제23권, 제5호, pp. 620-627.

한수희, 유가영, 김상단 (2009). “식생 물 부족지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향.” **수질보전한국물환경학회지**, 제25권, 제4호, pp. 507-514.

Bradru, D. and Mundlak, Y. (1970). “Estimation in Lognormal Linear Models.” *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 65, No. 329, pp. 198-211.

CCCma (2008). “<http://www.cccma.ec.gc.ca>”

Takle, E.S., Jha, M. and Anderson, C.J. (2005). “Hydrological cycle in the upper Mississippi River Basin: 20th century simulations by multiple GCMs.” *Ceophysical Research Letters*, Vol. 32, L18407, DOI. 10.1029/2005GL023630.

Githui, F., Gitau, W., Mutua, F. and Bauwens, W.

- (2008). "Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya." *International Journal of Climatology*. Wiley InterScience, DOI. 10.1002.
- Bouraoui, F., Galbiati, L. and Bidoglio, G. (2002). Climate change impacts on nutrient loads in the Yorkshire Ouse catchment(UK). *Hydrology and Earth System Sciences*, European Geosciences Unions, Vol. 6 No. 2, pp. 197-209.
- Gosain, A. K., Rao, S. and Basuray, D. (2006). "Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins." *Current Science Association*, Bangalore, INDE, Vol. 90, No.3 , pp. 346-353.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: Physical Science Basis*. Cambridge University Press, UK.
- James I. L., Morison and Gifford, R.M. (1983). "Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity." *Plant Physiology*, Vol. 71, pp. 789-796.
- Kim, B.S., Kim, H.S., Seoh, B.H., Kim, N.W. (2007). "Impact of climate change on water in Youndam Dam Basin, Korea." *Stoch. Environ. Res. Ris. Assess* Vol. 21, pp. 355-373.
- Jha, M., Pan, Z., Takle, E.S. and Gu, R. (2004). "Impacts of climate change on streamflow in the Upper Mississippi River Basin: A regional climate model perspective." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, D09105, DOI: 10. 1029/2003D003686.
- Jha, M., Arnold, J.G. Gassman, P.W., Giorgi, F. and Gu, R. (2006). "Climate Changes Sensitivity Assessment on Upper Mississippi River Basin Streamflows Using SWAT." *Journal of the American Water Resources Association*, American Water Resources Association, Vol. 42, No. 4, pp. 997-1015.
- Hanratty, M.P. and Stefan, H.G. (1998). "Simulating climate change effects in a Minnesota agricultural watershed." *Journal of Environmental Quality*, Vol. 27, pp. 1524-1532.
- Stonefelt, M.D., Fontaine, T.A. and Hotchkiss, R.H.(2000). "Impacts of climate change on water yield in the upper Wind river basin." *Journal of the American Water Resources Association*. American Water Resources Association, Vol. 36, No. 2, pp. 321-336.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No.3, pp. 282-290.
- Sugawara, M. (1995). "Tank model, in computer models of watershed hydrology." Water Resources Publications.

| | |
|------------------|------------------|
| 논문번호: 09-088 | 접수: 2009.07.24 |
| 수정일자: 2009.09.08 | 심사완료: 2009.09.08 |