

연구논문

기후변화시나리오에 따른 댐유역의 장기 수질변화 예측

정제호* · 김동일* · 최현구** · 한건연***

경북대학교 건축·토목공학부 박사과정수료*, 국립환경과학원 연구사**, 경북대학교 건축·토목공학부 교수***
(2010년 11월 18일 접수, 2011년 2월 14일 승인)

The Effect of Climate Change on Water Quality Analysis in a Dam River Basin

Jung, Je Ho · Kim, Dong Il · Choi, Hyun Gu · Han, Kun Yeun

Ph.D. Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea*

National Institute of Environmental Research, Incheon, 404-170, Korea**

Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea***

(Manuscript received 18 November 2010; accepted 14 February 2011)

Abstract

To assess the impact of climate change on water quality in an impounded river basin, this study estimated future air temperature and rainfall in the years of 2020, 2050 and 2080 by statistically downscaling the simulation results from two GCM models combined with two emission scenarios (A2 and B1). Both scenarios were selected from the Special Report on Emission Scenarios (SRES) suggested by IPCC. The A2 scenario represents an extreme condition whereas the B1 scenario represents a clean and energy efficient condition which is similar to that of study basin. With the results of estimated climate factors and land use data, the discharge and the concentrations of BOD, TN and TP in the Andong dam basins were simulated using the SWAT model. The change in BOD concentration for the B1 emission scenario was greater than the A2 scenario in the annual increase range and the pollution level. The concentration of TN was decreased during March ? June which is drought period and increased again afterward. In contrast to TN, the concentration of TP was generally decreased. The change in TP concentration was greater for the B1 scenario than the A2 scenario.

Keywords : SWAT, Climate change, IPCC, Water Quality, GCM

I. 서론

현재 기후변화가 심화되면서 기상변동성이 커지고 이에 따라 사막화 현상의 심화, 엘니노(El Nino), 라니냐(La Nina), 태풍, 집중호우 등 이상기후 현상이 전 지구상에 걸쳐 광역적으로 나타나고 있는 실정이다. 국제기구인 정부간 기후변화협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC)에서는 이러한 기후변화가 기온 상승에 따른 증발산량의 증가, 강수량 및 유출량의 시공간적 분포의 변동 등을 초래하여 수자원의 효율적 관리 및 안정적인 공급에 어려움을 증대시킬 것으로 전망하였다. 또한 IPCC 4차 보고서에 따르면 21세기말 지구의 평균 기온은 현재보다 최대 6.3℃정도 더 상승할 것으로 전망하였다. 전구평균기온이 3.0℃ 증가할 경우 아시아에서만 연간 700만 명이상이 홍수피해 위기에 직면할 것으로 예상되고 있다. 국내의 경우 기온은 전구평균기온에 비해 2배 이상 높은 1.5℃ 정도 상승하였으며, 최근 50년간의 강우일수는 감소한 반면 일강수량이 80mm 이상인 호우일수의 발생빈도는 증가되고 있다고 보고되었다(Choi, 2002).

기후 시나리오에 따른 기후변화를 모의하기 위해서 여러 가지 기후수치모델들이 있으나 3차원 기후 시스템을 모의하는 전지구기후모형(General Circulation Model, 이하 GCM)을 주로 이용되고 있다. 그러나 GCM은 공간해상도가 낮기 때문에 GCM의 적용 결과를 직접 이용하여, 수문학적 측면에서 관심 대상이 되는 유역 규모의 지역적인 스케일 특성 및 물리적 특징을 설명하기에는 어려움이 따르며, 입력 자료 및 모형의 적용 결과에 대한 불확실성이 커지게 된다. 따라서 이러한 GCM의 불확실성을 최소화하고 지역규모의 유역모형에 적용하기 위한 상세화기법(Downscaling) 및 다양한 시나리오에 따른 연구들이 수행되고 있다.

II. 연구방법 및 대상지

1. 국내외 연구 동향

국외의 경우 기후변화에 대한 수자원 영향평가가 활발히 진행되고 있으며, 1990년대 이후 기후변화에 따른 수자원 평가를 위한 기후변화예측 시나리오와 수문모형을 이용하여 GCM을 수문모형과 연계하여 기후변화로 인한 수자원 변화연구를 수행한 사례가 많이 있다. Kwadijk와 Rotmaes(1995)는 GCM과 RHINFLOW를 연계하여 독일 라일강 유역을 유출량을 평가하였으며, Chlew와 McMachoe(1993)는 5개 Ma GCM을 이용하여 오스트레일리아 28개 유역에 대해 2030년과 2070년에 대한 유출과 토양함수비를 모의하였다. Seftoe과 Boormae(1997)는 2CO₂ 상황에서 GCM모의 결과를 IHACRES 모형에 적용하여 영국의 39개 유역에 대해 유출을 분석하였다. 또한 상세화 기법에 대한 연구로 Wood(2004)는 RCM과 GCM 비교에 대한 연구를 수행하여 RCM이 GCM에 비해 상세한 지역 기후모의 결과를 제공하나 수문학적 활용성에서는 크게 향상된 결과를 제시하지는 않는다고 제시하였다.

국내에서는 기후변화에 의한 수문모형의 해석은 한국과학기술연구원(2004)에서 기상청 기상연구소에서 GCM을 이용하여 5대강 유역에 적용하여 유출량을 추정된 결과 평균적으로 약 25%정도의 유출증가를 예측한바 있으며, 한국과학기술원(1995)에서는 6개 댐 유역에 대해 물수지 산출모형을 개발하고 이 모형에 근거해 유출량을 산정한 결과 강수량 증가에 비해 약 2.4배의 유출량 증가가 예측된다고 보고하고 있다. 안재현 등(2001)은 물수지모형을 이용하여 2CO₂에 따른 대청댐 유역의 유출의 영향을 평가하였으며, IRSHAM96을 사용하여 지구 온난화에 따른 수문기상인자인 기온의 변화를 한반도에 걸쳐 분석하였다. 정일원(2007)은 혼합상세화 기법을 이용하여 국내의 수자원의 기후변화를 평가하였다. 또한, 프론티어사업의 일환인 『수자원의 지속적확보기술개발사업단』에서 기후변화가 국내 수

자원에 미치는 영향을 정량화하기 위한 연구가 진행(2007~2011)되고 있으며, 한국환경정책·평가연구원에서 수행하는 『기후변화 영향평가 및 적응시스템구축(2005~2007)』과제와 환경부의 『기후변화에 의한 물순환의 예측 및 영향 평가(2005~2006)』에서는 기후변화에 따른 수자원 측면의 취약성 평가에 관한 연구 등 실시하고 있다.

2. 연구 방법

본 연구는 기후변화가 안동댐 유역의 유량 및 수질에 미치는 영향에 대하여 평가하고 그 대응 방안에 대하여 고찰하기 위해 수행하고자 한다. 구체적으로는 IPCC의 배출시나리오를 이용하여 이에 대한 유출량 및 수질 변화를 해석하였으며, 유출해석은 장기 유역유출 모형인 SWAT 모형을 이용하여 추정하였고, 이를 이용하여 안동댐 유역의 유출량 및 수질과 병행하여 모의하였다. 이러한 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

첫째, IPCC의 배출 시나리오(Special Report on Emissions Scenarios, 이하 SRES) 중 인구증가율이 높고 경제발달과 기술변화가 느리고 환경에 무관심한 극한현상을 나타내는 A2 시나리오와 청정 및 자원 효율적인 기술 등 급격히 발전하고 조사대상 유역특성과 유사한 B1 시나리오를 선정하고, 이에 대한 유역의 기온과 강우량을 GCM을 적용하여 모의하였다. 단, GCM은 공간적인 스케일이 일반적인 유역모형에 적용하기 어려운 스케일이므로 상세

화기법을 이용하여 GCM 자료를 Downscaling 한 뒤에 유출해석에 이용하였다.

두 번째로 향후의 기후변화가 유출·수질(BOD, TN, TP)에 미치는 영향을 2020년, 2050년, 2080년에 대하여 평가하기 위하여 GIS 기반의 유역 모형인 SWAT을 대상모형으로 선정하였다. 장기유출 모의가 가능한 GIS기반 모형으로 강우 및 기온 등과 같은 기후변화에 영향을 크게 받는 인자들을 입력 자료로 하고 있어, 기후변화에 평가에 유리할 것으로 판단된다. 이들 모형의 신뢰성 평가를 위해 현재 상태에서의 모의를 검·보정 하여 실제 A2, B1 기후변화 시나리오에 따른 기온 및 강우량 변화 등에 대한 영향을 모의하였다.

3. 기후변화 예측 시나리오

기후변화 시나리오는 인위적 온실가스 농도 증가 시나리오에 따른 기후시스템의 반응을 모의한 것이다. 최근 IPCC의 SRES에 기초한 시나리오 산출이 주를 이루는데, 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 배출시나리오에 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상당한 불확실성이 포함될 수밖에 없다. 따라서 이에 반응하는 미래 기후변화는 매우 불확실 하지만, 현재로는 기후가 어떻게 변화될지를 보여줄 수 있는 유일한 선택이 시나리오다(배티효 등, 2007).

표 1은 IPCC SRES에 대한 구체적인 사항을 나타낸 것으로, 크게 인구, 기술, 경제성장, 환경 등

표 1. IPCC 배출 시나리오(SRES)

인자	A1				A2	B1	B2
	A1C	A1G	A1B	A1T			
인구 성장	낮음	낮음	낮음	낮음	높음	낮음	중간
GDP 성장	매우 높음	매우 높음	매우 높음	매우 높음	중간	높음	중간
에너지 이용율	매우 높음	매우 높음	매우 높음	매우 높음	높음	낮음	중간
토지이용의 변화	낮음/중간	낮음/중간	낮음	낮음	중간/높음	높음	중간
재래식 자원에서 독특한 자원으로 변화 가능성	높음	높음	중간	중간	낮음	낮음	중간
기술개발의 속도	빠름	빠름	빠름	빠름	느림	중간	중간
기술개발의 방향	석탄	석유 & 가스	균형적	고효율 에너지	지역마다 다름	효율적인 청정자원	종래와 같은 역학적

미래 온실가스배출의 원동력이 되는 요소들을 광범위하게 다르며, 크게 4개 그룹(A1, A2, B1, B2)으로 배출시나리오를 제시한다. 여기서, A와 B는 경제(economic)지향인가 환경(enviromental)지향인가를, 1과 2는 지구주의(global) 지향인가, 지역주의(regional) 지향인가를 나타낸다. A1 시나리오에서 C, G, B, T는 각각 석탄 주도형, 가스 주도형, 밸런스형, 고효율 에너지 기술 주도형을 뜻한다. A1 시나리오는 미래의 세계가 매우 급격한 경제성장, 전지구 인구는 이번세기 중반에 최정점에 이르렀다가 그 후 감소하는 추세, 새롭고 좀 더 효율적인 기술의 급격한 도입 등으로 표현한다. 이에 비해 A2는 지속적인 인구성장과 지역적으로 편중된 경제성장 등을 표현한다. B1은 A1과 같이 세계 인구가 급세기 중반에 정점을 보이다가 감소하지만 서비스 및 정보 경제로 급격하게 경제구조가 변화하고, 청정 및 자원 효율적인 기술의 도입이 이루어지는 것을 가정하고 있다. B2는 A2보다 낮은 비율로 지속적으로 인구가 증가하고, 중간수준의 경제성장, B1 및 A2보다는 상대적으로 덜 급하고 다양한 기술변화를 가정하고 있다(IPCC, 2001a). 본 연구에서는 국내에서 많이 연구하는 A1B, A2, B1 등 3개 시나리오 중에서 인구증가율이 높고 경제발달과 기술변화가 느리고 환경에 무관심한 극단적인 사항을 나타내는 A2 시나리오(2100년경에 CO₂ 농도가 830ppm)와 청정 및 자원 효율적인 기술 등 급격히 발전하고 조사대상 유역특성과 유사한 B1 시나리오(2100년경에 CO₂ 농도가 550ppm)를 선정하여 대상유역의 각각 시나리오에 대한 2100년까지의 유출량과 수질의 변화를 파악해보고자 한다.

4. Downscaling

IPCC의 GCM에 대한 평가결과는 대체로 “현재의 기후모형들의 관측된 대규모(전구 혹은 대륙규모) 기후의 여러 양상들을 비교적 정확히 예측할 수 있지만 지역규모의 예측에서는 정확성이 떨어진다”고 지적하고 있다(IPCC, 2001). 이러한 기후변화 예측결과에 대한 불확실성을 최소화하기 위하여 상세화기

법(Downscaling)을 필수적으로 수행되어야 한다.

대규모의 대기 순환패턴이 지역기후의 대기 순환 패턴과 관계가 있다는 것에 착안하여 대규모의 GCM에서 모의한 값과 지역기후요소 사이의 통계적 관계를 찾아내어 상세화하는 방법으로 관측되는 지역적 또는 고해상도의 격자규모에서의 공간분포 특성 등을 이용하여 전지구규모의 GCM 모형 값을 공간적으로 상세화시켜 적절한 규모(Scale)의 수문학적 입력 자료를 변환하는 기법으로 크게 지역적 피복상, 육지와 바다의 분포, 대기의 순환과 해양순환이 서로 영향을 미친다고 가정하고 통계적 특성을 고려한 통계학 스케일 상세화기법과 GCM 모의 값을 경계조건을 하여 수평해상도의 크기를 20~50Km 정도의 공간해상도를 고려한 역학적 스케일 상세화 기법 및 GCM 모의 값과 관측소에서 관측된 관측 값과의 관계를 학습함으로써 대상유역의 시공간 특성을 고려한 인공신경망을 이용한 스케일 상세화기법으로 크게 나눌 수 있다.

본 연구에서는 통계적 특성을 고려한 통계학 스케일 상세화기법을 이용하였다.

5. SWAT 모형의 기본 이론

SWAT(Soil and Water Assessment Tools) 모형에서는 수정 SCS 방법을 이용하여 지표수를 산정하고 강수량에서 지표수를 뺀 나머지 양은 토양 표면 아래로 침투되도록 모형화되었다. 이 양은 기존 토양수분량에 추가되고 최대보수량(field capacity)을 초과하는 토양수분량은 중력수로 정의되어 측방흐름과 침투량으로 이동하게 된다. 나머지 토양수분량은 식생과 기상조건에 따라 영구위조점(permanent wilting point)에 도달할 때까지 모관수로 정의되어 증발산으로 토양층 내에서 제거된다. 마지막 토양층에서의 침투량은 지하수함양량으로 얇은 대수층(shallow aquifer)에 저장되어 있는 지하수에 추가된다. 이 양 중 일정부분은 하천으로 회귀하는 지하수로, 또는 깊은 대수층(deep aquifer) 및 토양층으로 이동한다.

SWAT 모형의 기본적으 GIS를 기반으로 하

는 유역모형으로, 주요 입력자료로는 우선 유역의 DEM과 토지이용도, 토양도를 이용하고, 그리고 강우의 영향을 고려하기 위해 강우 및 기온, 습도 등을 이용한다. 이 모형의 경우 장기유출모형이므로 한 기간동안의 Event를 고려하는 것이 아니라 장기간의 강우, 기온등의 변화를 고려하여 유출량을 계산하기 모형이므로 본 연구 목적에 잘 부합한다고 판단된다.

1) SWAT 모형의 수질분석 이론

탄소성 생물학적 산소 요구량(CBOD)는 지표 유출에서 이송되는 유기성물질을 분해하는데 필요한 산소를 이르며 최종 CBOD에 대한 부하함수는 식 (1)와 같이 Thomann과 Mueller(1987)에 의해 제시된 관계를 기반으로 하여 산정된다.

$$cbod_{surq} = \frac{2.7orgC_{surq}}{Q_{surq}A_{hru}} \quad (1)$$

여기서, $cbod_{surq}$ 는 지표 유출에서의 BOD농도(mg CBOD/l)를 나타내고, $orgC_{surq}$ 는 지표 유출에서의 유기성 탄소(kg orgC), Q_{surq} 는 지표 유출량(mmH2O), A_{hru} 는 수문학적 반응 단위의 면적(km²)를 나타낸다.

지표 유출에서 유기성 탄소의 양은 식 (2)과 같이 계산된다.

$$orgC_{surq} = 1000 \frac{orgC_{surf}}{100} \cdot sed \cdot \epsilon \quad (2)$$

여기서, $orgC_{surf}$ 는 토양 상층 10 mm에서의 유기성 탄소의 분율(%), sed 는 수문학적 반응 단위로부터 이송되는 유수량(톤), ϵ 은 탄소 농축비를 나타낸다. 여기서 탄소 농축비는 유사에 부착되는 유기성 탄소 농도의 농도비로 정의되며 유사농도에 대한 Menzel(1980) 경험식을 이용하여 산정된다.

각 수문학적 반응 단위로부터 발생한 유기성 탄소는 하도 내에서 추적과정을 통하여 특정 위치에서의 농도를 산정한다.

$$\Delta cbod = -(K_1cbod + K_3cbod)TT \quad (3)$$

유기성 탄소는 식 (3)의 메커니즘을 통하여 추적되며, 식 (3)는 물이 하류로 흐르는 과정에 자체 분

해 및 침전에 의하여 농도변화가 일어난다는 것을 의미한다. 여기서, K_1 은 CBOD 분해율(일-1), K_3 은 CBOD 침전율(일-1)을 나타내며, TT 는 도달시간(일)을 나타낸다.

2) SWAT 모형의 검 · 보정 이론

다양한 설계 해의 효율적인 탐색을 위해서는 확률적 탐색기법에 근거한 방법들이 효과적이며 유전 알고리즘(Genetic Algorithms, GA's) 등이 대표적으로 사용되고 있는데 이러한 방법들은 기초적 개발단계를 지나 현재에 와서 그 효율성을 인정받고 있으며 특히 유전알고리즘은 복합재료 구조물 등을 비롯한 다양한 구조최적화 분야에 적용되고 있다. 유전 알고리즘에서는 반복 과정 시 한 개의 해가 개선되는 것이 아니라 다수의 설계집단이 진화과정을 통하여 설계 목적에 대해 향상된 또 다른 다수의 설계집단으로 이동하므로 극대 및 극소해가 다양으로 존재하는 탐색문제에 적용할 수 있다. 또한 유전알고리즘은 함수의 미분 등을 요구하는 민감도 해석의 과정 없이 함수 결과 자체만으로 설계 해를 이동시키는 장점이 있다.

SWAT(Soil and Water Assessment Tools)에 적용된 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-UA)기법은 유전자 알고리즘의 일종으로 재생, 교배, 돌연변이의 과정을 통해 목적함수를 최적화하게 된다. 최적화 과정은 아래와 같다.

- ① 초기화하기 위해서 $p(\geq 1)$ 와 $m(\geq n+1)$ 을 선정한다. 여기서 p 는 복합체의 수이고, m 은 각 복합체 내에 존재하는 점의 수이고 n 은 차원을 나타낸다. 따라서 표본 크기 $s=pm$ 으로 계산되게 된다.
- ② 적당한 공간 $Q \subset R^n$ 내에 s 개의 점 $x_1 \dots x_s$ 를 표본을 생성시킨 이후 표본으로 생성시킨 점 X_i 에서 함수값 F_i 를 계산한다.
- ③ 함수 값을 오름차순으로 s 개의 점을 정렬한다. $D = \{X_i, F_i, i = 1 \dots s\}$ 와 같은 배열에 저장한다. 여기서 ϵ 은 함수 값이 가장 작은 점을 나타낸다.
- ④ 배열 D 를 p 개의 복합체 A^1, \dots, A^p 로 분할한다.

$\frac{orgC_{surf}}{100}$

각각의 복합체는 m개의 점을 포함하고 있으며

$$A^k = \{X_j^k, F_j^k / X_j^k = X_{k+p(j-1)}, j = 1..m\}$$

예를 들어 복합체의 개수가 3개이고, 각 복합체당 점의 수가 5개라고 가정하면 전체 점의 수는 15개가 되게 된다. 각 점에 대한 함수값을 계산하여 초기계산을 수행한 후 계산된 함수값을 바탕으로 하여 오름차순으로 정렬을 한다. 그리고 난 후 1, 4, 7, 10, 13번째로 정렬된 점을 복합체 1로 구성하고, 2, 5, 8, 11, 14번째로 정렬된 점을 복합체 2로 구성하고, 3, 6, 9, 12, 15번째로 정렬된 점을 복합체 3으로 구성한다.

다른 예를 들면 복합체의 수가 2개이고, 각 복합체당 점의 수가 5개라고 가정하면 전체 점의 수는 10개가 되게 된다. 각 점에 대한 함수값을 초기 계산한 후 오름차순으로 정렬한다. 그리고 난 후 1, 3, 5, 7, 9번째로 정렬된 점을 복합체 1로 구성하고, 2, 4, 6, 8, 10번째로 정렬된 점을 복합체 2로 구성한다.)

- ⑤ 복합체 진화에 따라 각각의 복합체 $A^k, k = 1 \dots p$ 를 진화시키도록 한다.
- ⑥ $A^1 \dots A^p$ 를 $D = \{A^k, k = 1 \dots p\}$ 로 치환하여 오름차순으로 D를 정렬한다.
- ⑦ 수렴성을 확인한다. 만약 수렴 기준이 만족되거나 시도하는 최대 수를 초과한다면 정지하게

된다. 그렇지 않으면 네번째 단계로 돌아간다.

6. 대상구역의 현황

유역모형의 입력자료로 지형 및 기상자료를 이용한다. 본 연구에서는 유역모형으로 SWAT을 이용하였다. 두 모형 공통으로 지형자료로서 유역의 DEM과 토지이용도와 토양도를 이용한다. 따라서 DEM과 토양도와 토지이용도는 국가지리정보에서 획득하였다. 다음 그림 1~3은 각각의 유역 모의에 이용된 DEM과 토지이용도, 토양도를 나타낸 것이다. 또한 기상자료의 경우는 GCM을 상세화 기법을 이용하여 대상유역에 적합하게 변화하여 강우자료와 기온, 습도, 풍속, 일사량 자료를 이용하여 모의를 수행하였다. 이 때 시나리오가 A2 시나리오와 B1 시나리오를 이용하여 각각의 시나리오에 대한 기상 및 강우자료를 구축하였다.

안동댐 유역은 낙동강의 본류에 위치하고 있다. 이 유역의 하천은 지방 2급인 낙동강, 회룡천, 현동천, 재산천, 운곡천, 법전천, 토계천, 동계천, 역계천으로 구성되어 있다.

유역 특성으로는 총 유역면적 1,628.68km² 이고 최원유로연장은 171.04km이다. 유로연장은 170.12km으로 하천의 총길이는 5,381.87km에 이

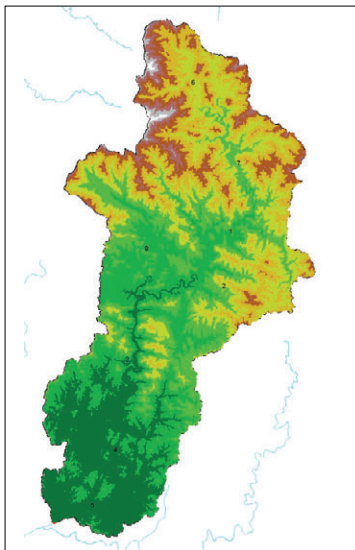


그림 1. 안동댐의 DEM

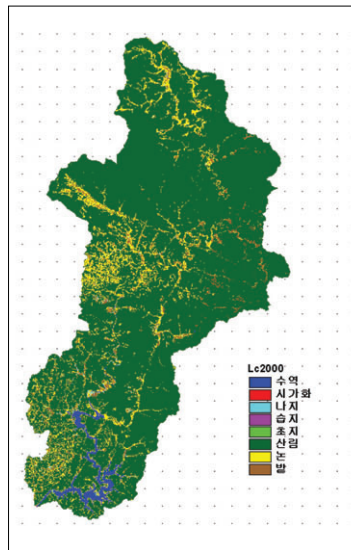


그림 2. 안동댐의 토지 이용도

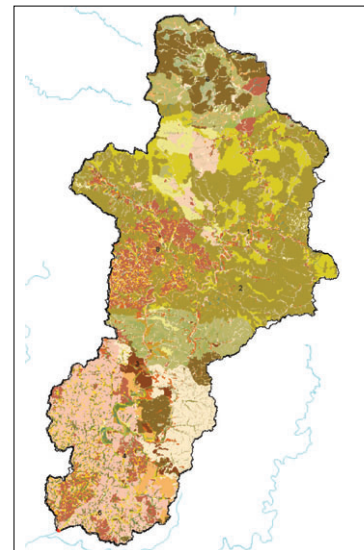


그림 3. 안동댐의 토양도

른다. 주하천의 길이는 114.80km이며 출구점의 표고는 96.32m인 유역이다. 유역의 최대표고는 1,568.82m이며 평균표고는 549.30m으로 구성되어 있다. 낙동강 유역의 하천의 평균폭은 9.52m이고 하천의 좌안면적은 783.09km²이고, 우안면적은 845.59km²이다. 또한 평균경사는 41.88%정도로 나타난다.

유역의 토지 피복 현황을 살펴보면 총 1,628.68km²중 논이 161.81km²으로 전체의 9.94%, 밭이 37.63km²으로 2.3%, 산림이 1,392.81km²으로 85.52%를 차지하며, 기타지역이 36.43km²으로 2.24%정도로 구성되어 있어 경작지 보다는 산림이 낙동강 유역에 많이 위치하고 있는 것으로 나타난다.

낙동강 유역의 유황분석을 살펴보면 평균 풍수량은 20.07m³/s이고, 평수량은 9.56m³/s, 저수량은 5.73m³/s 그리고 갈수량은 2.71m³/s로 나타나고 있다.

III. 결과 및 고찰

실제로 MIROC 3.2를 이용하여 구축된 GCM 자료의 A2, B1 시나리오를 이용하여 통계학적 상세화 기법을 통해 대상유역인 안동댐 유역의 기후변화를 예측하였다. 이렇게 예측된 기후변화 자료를 이용하여 유역모형인 SWAT모형을 이용해 SWAT의 경우는 각각의 유역에서의 유출량과 BOD, TN, TP에 대한 변화를 예측하게 된다. 이를 위해서 각각의 소

유역에 대한 지형자료를 구축하고, GCM을 이용하여 분석된 강우와 기온의 예측자료를 적용하여 모의를 수행하게 되며, 수행된 모의 자료를 현재에 대한 실측치와 비교 분석하여 검·보정을 수행하고 미래의 유량과 수질을 모의하게 된다.

본 연구에서 선정된 대상유역은 비교적 유량과 수질 자료가 잘 갖추어진 댐 유역으로 설정을 하였고, 그 중에서 낙동강 유역의 안동댐을 대상유역으로 선정하여 모의를 진행하였다.

1. 유역모형을 이용한 안동댐 유역 분석

장기유출모형인 SWAT의 경우 입력자료로서 기상자료를 이용한다. 이용되는 기상자료는 강우 및 기온을 이용하는데, 기후변화에 따른 수질의 변화를 분석하기 위하여 GCM을 통해 획득한 기상자료를 입력자료로 구성하였다. 본 연구에서는 GCM으로 MIROC 3.2를 이용하였고, 시나리오는 극한사항을 나타내는 A2 시나리오와 유역특성과 유사한 B1 시나리오를 이용하였다. GCM의 경우 공간적인 스케일이 일반적인 유역모형에 적용하기 어려울 정도로 큰 스케일이므로 통계학적 상세화기법을 이용하여 GCM자료를 Downscaling하여 유역모형에 적용 가능한 스케일로 변환하여 주어야 한다. 본 모형에서 적용한 MIROC 3.2의 경우 온도가 실제 관측치 보다 0.62℃~0.67℃ 정도 크게 나타나고 있어 이를 검·보정 하였다. 또한 강우량의 경우도 GCM의 강우가 실측치 보다 4%~6% 정도 과대 추정되어

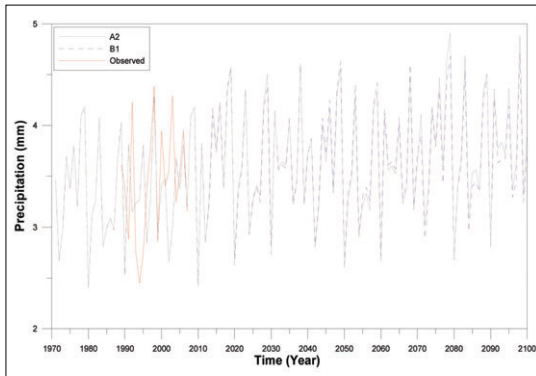


그림 4. 안동댐 유역의 강우 변화 예측

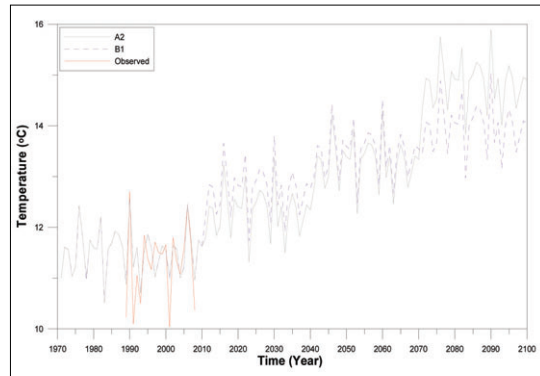


그림 5. 안동댐 유역의 기온 변화 예측

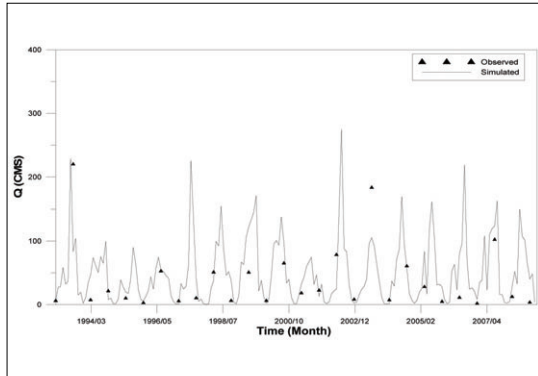


그림 6. 안동댐 유역의 유량 검·보정 결과

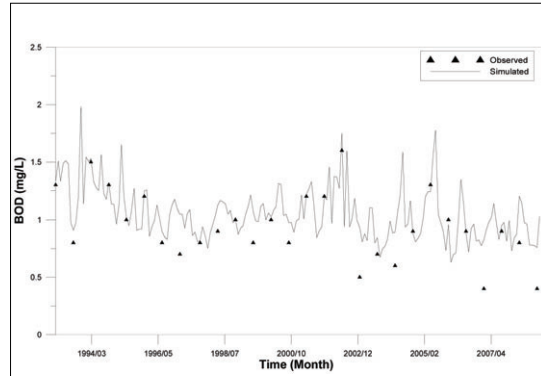


그림 7. 안동댐 유역의 BOD 검·보정 결과

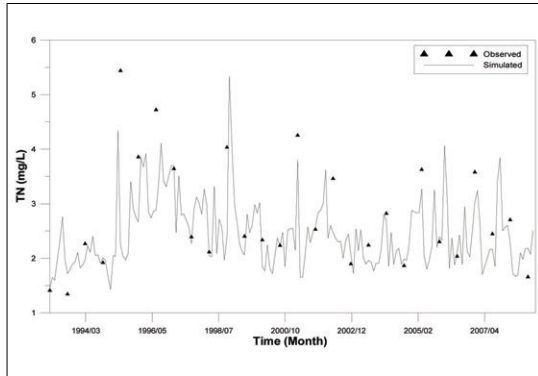


그림 8. 안동댐 유역의 TN 검·보정 결과

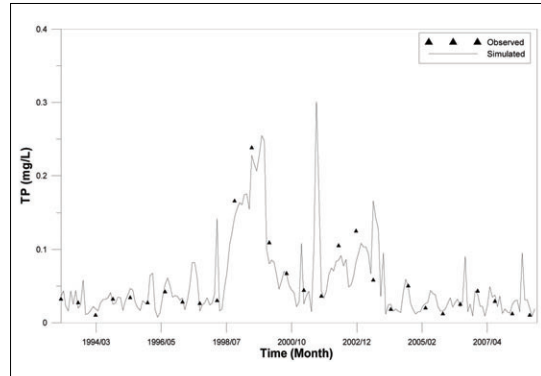


그림 9. 안동댐 유역의 TP 검·보정 결과

이를 보정한 후 강우량을 예측하였다.

이를 이용하여 유역에 대한 모의를 진행하였고, 이렇게 도출된 결과에 안동댐 유역의 실측치를 이용하여 검·보정 하였다.

검·보정 결과를 살펴보면 유량과 BOD는 비교적 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 유량에서 2005년에 갑자기 증가하는 부분은 모형의 한계로 인해 잘 반영되지 않았으나 전반적인 추세가 일치하는 것으로 나타났다. TN과 TP의 경우 1994년과 2007년에서 증가분이나 감소분이 일부 제대로 반영이 되지 않고 있으나 전반적인 추세가 실측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

2. A2 기후변화 시나리오 적용

기후변화 시나리오를 이용하여 안동댐유역의 기온변화를 예측하여 보았다. 결과는 다음 그림 과 같이 나타나고 있다.

안동댐의 강우추세를 살펴보면 A2 시나리오는 현재의 비해 2020년에 7.2% 증가하는 것으로 나타났으며, 2050년에 6.4%, 2080년에 13.3%가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 안동댐의 기온을 살펴보면, A2 시나리오에서는 2020년에 0.8℃ 증가하고, 2050년에 1.7℃, 2080년에 3.3℃가 증가하는 것을 나타냈다.

시나리오에 대한 GCM Downscaling 자료를 구축한 후, 이를 입력 자료로 이용하여 2020년, 2050년, 2080년에 대하여 각각 월평균 자료 예측 및 갈수기와 홍수기시의 영향을 각각 분석해 보았다.

유량은 강우의 영향을 많이 받는 인자이므로 강우가 감소하는 3월과 4월, 5월에서 유량도 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 강우가 감소하는 10월의 경우도 전월에 비해 증가폭이 급격히 감소하는 현상을 보였다. 또한, 2월의 경우 강우량 영향이 미미함에도 유량이 증가 하는 것은 용설(snowmelt)

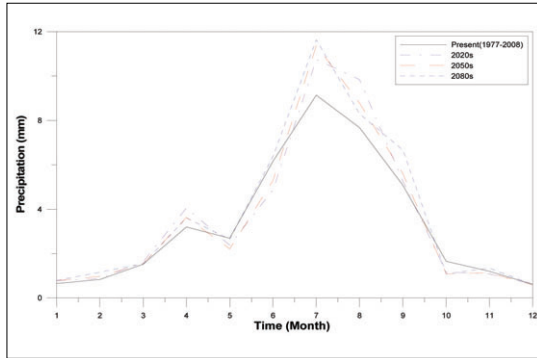


그림 10. 안동댐 유역의 월평균 강우 변화 예측 (A2 시나리오)

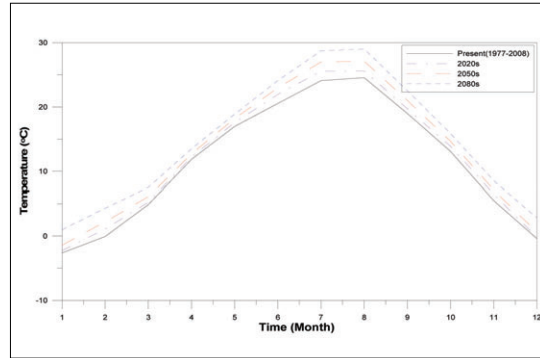


그림 11. 안동댐 유역의 월평균 기온 변화 예측 (A2 시나리오)

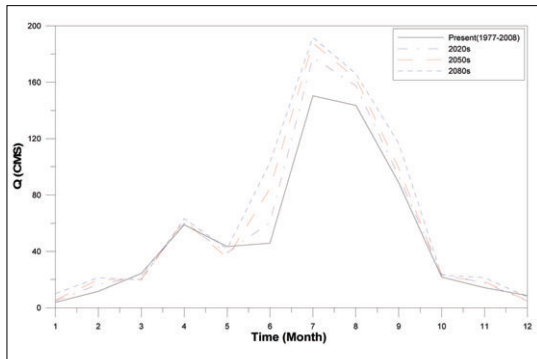


그림 12. 안동댐 유역의 유량의 변화 모의 (A2 시나리오)

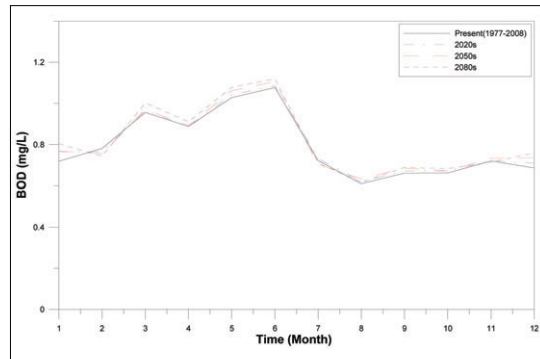


그림 13. 안동댐 유역의 BOD의 변화 모의 (A2 시나리오)

에 영향으로 판단된다.

다음은 BOD의 변화를 모의한 결과이며, BOD의 경우 수온의 영향과 유량이 큰 영향을 미치는 인자로 유량변화와 유사한 패턴을 나타내어 월변화는 갈수기인 1월부터 6월까지의 증가 후 풍수기에 급격히 감소하여 미미한 증가하는 경향을 나타내었고, 연도별 변화는 특히 갈수기에 2008년도로 갈수록 미미하지만 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기온 증가와 연관이 있는 것으로 판단된다.

TN의 경우는 전반적으로 미미하게 증가추세를 나타냈다. 2050년까지는 감소하다가 2080년부터는 증가추세를 보였으며 BOD와는 다른 추세를 나타내고 있는데 강우나 기온의 증가와는 다른 양상을 띄고 있다. 이에 대한 결과를 다음 그림 21~22에 잘 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 3월부터 6월까지가 TN이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 그

이후부터 다시 상승하는 추세를 나타내었다. 전반적으로 현재의 TN실측치 보다는 증가하는 현상을 나타내고 있다. 특히 2080년 이후에는 두 시나리오 모두 8월과 9월을 제외하고는 현재보다는 증가하는 현상을 나타내고 있다.

TP의 경우는 전반적으로 감소추세를 보였으며 특히 7월 8월 9월에 감소 폭이 크게 나타났다. 그 결과는 그림 23~24에 잘 나타내어져 있다. 그림을 살펴보면, 7월부터 9월까지 예측치가 실측치보다 감소하는 현상을 나타내고 있고, 전반적인 TP의 경향은 홍수기에 줄어들고 갈수기시에 증가하는 경향을 나타내고 있다. 전반적으로 현재 TP실측치에 비해 감소하는 추세를 나타내고 있으며 1월에서 4월까지 감소하다가, 7월부터 8월 사이에 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 6월에는 큰 폭으로 증가하는 모습을 보였다.

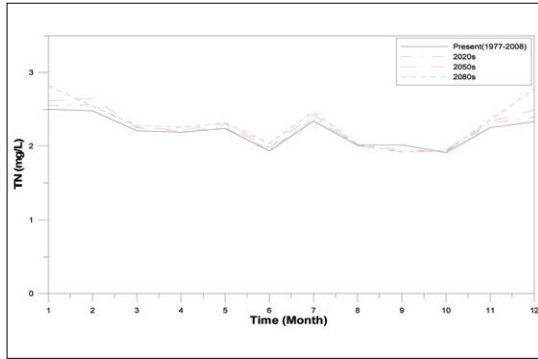


그림 14. 안동댐 유역의 TN의 변화 모의 (A2 시나리오)

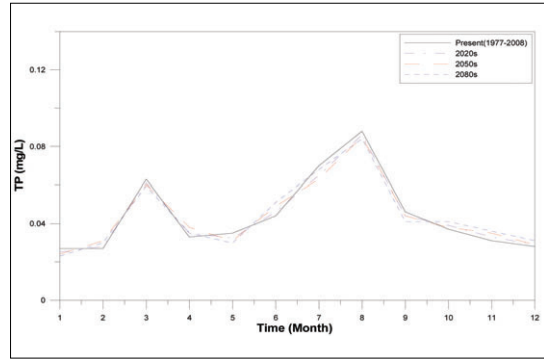


그림 15. 안동댐 유역의 TP의 변화 모의 (A2 시나리오)

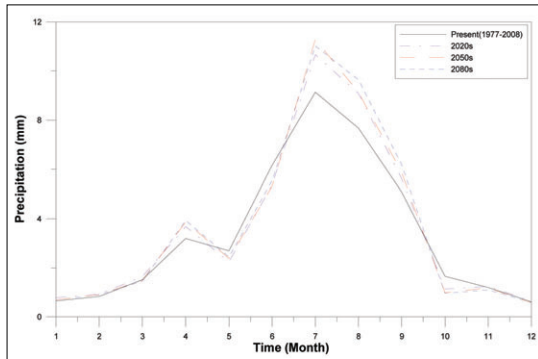


그림 16. 안동댐 유역의 월평균 강우 변화 예측 (B1 시나리오)

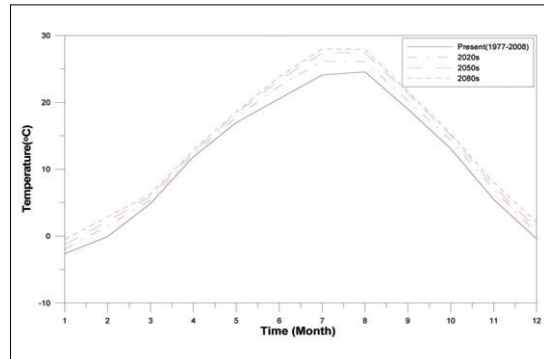


그림 17. 안동댐 유역의 월평균 기온 변화 예측 (B1 시나리오)

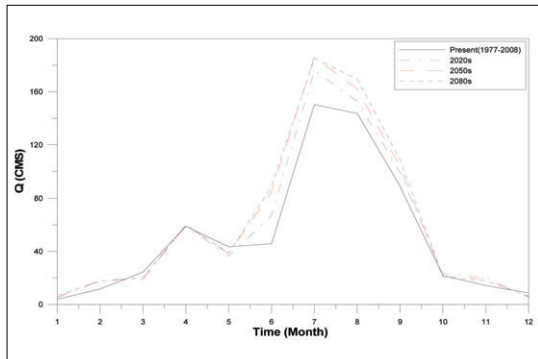


그림 18. 안동댐 유역의 유량의 변화 모의 (B1 시나리오)

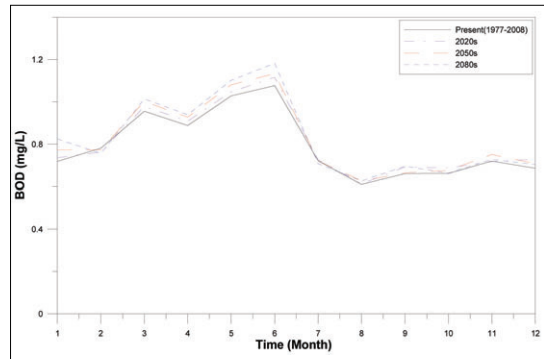


그림 19. 안동댐 유역의 BOD의 변화 모의 (B1 시나리오)

3. B1 기후변화 시나리오 적용

기후변화 시나리오를 이용하여 안동댐유역의 기온변화를 예측하여 보았다. 결과는 다음 그림 과 같이 나타나고 있다.

안동댐의 강우추세를 살펴보면 B1 시나리오에서 현재에 비해 2020년에 6.6%가 증가하고, 2050년에 8.2%, 2080년에 10.1% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 기온의 경우 2020년에 1.2℃ 증가하는 것으로 나타났으며, 2050년에 2.0℃, 2080년에 2.5

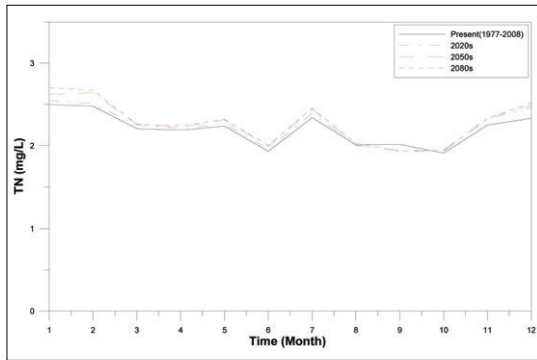


그림 20. 안동댐 유역의 TN의 변화 모의 (B1 시나리오)

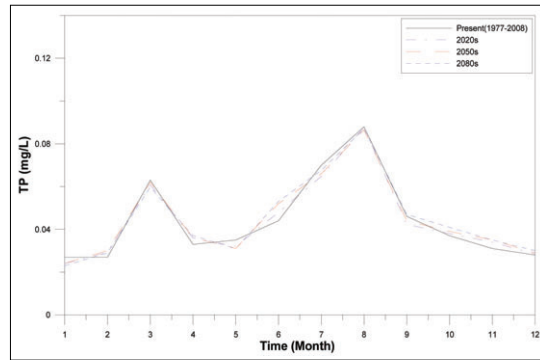


그림 21. 안동댐 유역의 TP의 변화 모의 (B1 시나리오)

℃가 증가하는 것으로 나타났다.

유량의 경우는 A2 시나리오와 마찬가지로 강우의 영향으로 인해 강우가 감소하는 3월과 4월, 5월에서 유량도 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 10월의 경우도 강우 감소의 영향으로 A2 시나리오와 마찬가지로 감소하는 추세를 나타내고 있다.

BOD의 경우는 수온과 유량의 변화로 인해 3월부터 6월까지의 변화가 뚜렷하게 나타나고 동절기로 갈수록 변화의 추세가 감소하는 패턴을 나타내고 있다.

TN의 변화 양상은 BOD와는 다소 다른 전반적으로 증가추세를 나타내고 있다. 현재 실측치보다 8월에서 10월까지의 낮은 수치를 나타내고 있으나, 그 외의 다른 월변화의 경우 전체적으로 증가하는 경

향을 보이고 있으며, BOD와는 사뭇 다른 양상을 나타내고 있다. 이는 기온과 유량의 변화와는 다른 인자의 영향이 더 크게 작용하는 것이라고 판단된다.

TP는 A2 시나리오와 마찬가지로 전반적으로 감소추세를 보였으며 5월달의 감소와 7, 8, 9월의 감소가 눈에 띈다. 그러나 A2 시나리오에 비해서 감소폭은 상대적으로 적은 것으로 나타나고 있다.

4. 기후변화 및 수질예측결과 및 고찰

본 연구에서는 A2, B1 시나리오를 이용하여 안동댐 유역의 기후변화를 예측하여 2020년, 2050년, 2080년의 기온과 강우량 등 기후변화 자료를 생성하였다.

표 2. 안동댐 유역 월평균 강우량 변화율(%)

구분	A2(2020s)	B1(2020s)	A2(2050s)	B1(2050s)	A2(2080s)	B1(2080s)
1월	21.2	21.2	20.7	6.9	22.8	7.9
2월	4.6	11.0	16.6	9.2	39.0	8.4
3월	7.1	8.2	1.7	-1.3	1.0	-4.1
4월	26.9	15.2	13.5	20.8	12.8	23.0
5월	-11.7	-16.6	-17.8	-11.4	-1.7	-9.4
6월	-20.9	-12.7	-14.0	-13.7	3.7	-10.0
7월	17.6	16.7	24.5	23.5	27.2	20.6
8월	28.2	18.4	14.4	19.0	8.1	25.6
9월	3.6	10.5	10.4	15.4	31.2	21.5
10월	-29.5	-31.4	-34.5	-40.4	-34.0	-41.6
11월	-9.7	3.8	-4.6	-1.0	11.9	-8.3
12월	1.6	6.5	-5.4	-5.3	0.4	-2.5
평균	3.3	4.2	2.1	1.8	10.2	2.6

표 3. 안동댐 유역 월평균 기온 변화(°C)

구 분	A2(2020)	B1(2020)	A2(2050)	B1(2050)	A2(2080)	B1(2080)
1월	0.3	0.7	1.2	1.3	3.6	2.1
2월	1.2	1.6	2.3	2.3	4.4	2.9
3월	0.4	0.5	1.2	1.1	2.7	1.4
4월	0.4	0.4	0.9	0.8	1.6	1.0
5월	0.6	0.8	1.2	1.3	1.9	1.6
6월	1.4	1.9	2.4	2.8	3.6	3.3
7월	1.5	2.0	2.9	3.3	4.6	3.9
8월	1.0	1.6	2.6	2.8	4.5	3.4
9월	0.7	1.3	2.0	2.3	3.5	2.6
10월	0.8	1.3	1.6	1.9	2.8	2.2
11월	1.0	1.5	1.6	2.0	3.1	2.5
12월	0.2	0.8	1.0	1.5	3.2	2.4
평 균	0.8	1.2	1.7	2.0	3.3	2.5

표 4. 안동댐 유역의 유량의 변화율(%)

구 분	A2(2020)	B1(2020)	A2(2050)	B1(2050)	A2(2080)	B1(2080)
1월	24.6	36.7	42.6	43.1	158.6	78.3
2월	43.4	58.9	70.9	54.2	83.8	48.6
3월	-9.1	-18.6	-17.0	-23.1	-19.4	-17.0
4월	-3.5	-11.9	-4.9	-1.9	-15.1	-6.3
5월	-10.4	-16.2	-18.3	-11.5	-3.6	-10.8
6월	32.3	46.2	84.4	85.2	124.9	93.6
7월	18.2	17.1	25.0	23.8	27.6	23.3
8월	9.8	6.4	13.3	12.8	15.7	17.9
9월	5.2	11.6	11.7	16.7	31.3	22.5
10월	9.3	6.2	3.6	-3.6	5.9	-3.4
11월	23.4	41.6	28.9	33.5	50.4	23.3
12월	-45.2	-33.6	-39.7	-35.8	-11.2	-26.4
평 균	8.1	12.0	16.7	16.1	37.4	20.3

이를 이용하여 유역모형인 SWAT를 적용하였고, 유역에서의 유출량과 BOD, TN, TP에 대한 영향을 분석하였다. 기후변화에 따른 주요 원인으로 작용하는 기온 변화 추세는 A2 시나리오에서 안동댐은 2020년에 0.8°C, 2050년은 1.7°C 2080년은 3.3°C가 증가하였다. B1 시나리오에서 안동댐은 2020년에 1.2°C, 2050년에 2.0°C, 2080년에 2.5°C가 증가하는 것으로 나타났다. 다음 표 2와 3은 월평균 강우와 기온의 변화율을 나타낸 것이다.

SWAT모형을 적용한 강우량 영향을 많이 받는 댐 유역의 월별 유량변화는 강우가 감소하는 3월과

4월에서 유량이 감소하는 것으로 나타났다. 강우가 감소하는 10월의 경우도 이전 월에 비해 증가폭이 급격히 감소하는 현상을 보이고 있으나 강우량의 영향이 미미한 2월의 경우 유량이 증가하는 것은 융설(snowmelt)에 영향인 것으로 판단된다. 유량의 증감에서 평균 유량은 2020년 및 2050년은 B1 시나리오가 미미하게 많은 것으로 나타내고 있으나 유량의 증감 변화는 A2 시나리오가 B1 시나리오에 비해 굉장히 크게 나타나고 있는 것으로 보인다. 특히 홍수시의 유량의 증가가 큰 폭으로 증가하고 있는 것으로 나타났다.

표 5. 안동댐 유역의 BOD의 변화율(%)

구 분	A2(2020)	B1(2020)	A2(2050)	B1(2050)	A2(2080)	B1(2080)
1월	6.4	2.4	6.3	7.5	11.8	14.7
2월	-2.2	-2.3	-2.6	-1.0	-4.7	-3.2
3월	1.0	2.3	1.6	4.8	4.8	6.1
4월	-0.1	2.4	0.4	4.5	2.6	5.7
5월	1.4	1.9	3.2	5.1	4.9	7.2
6월	0.8	3.6	4.0	5.3	4.0	9.7
7월	1.2	0.6	-3.0	-0.1	-1.7	-1.9
8월	1.6	0.3	3.3	2.6	1.0	2.6
9월	1.7	4.7	3.6	0.5	4.2	5.3
10월	1.5	3.9	1.4	2.1	3.2	0.2
11월	0.1	-0.3	1.9	4.3	-0.8	1.1
12월	3.4	6.1	6.3	3.2	10.6	2.6
평균	1.4	2.1	2.2	3.2	3.3	4.2

표 6. 안동댐 유역의 TN의 변화율(%)

구 분	A2(2020)	B1(2020)	A2(2050)	B1(2050)	A2(2080)	B1(2080)
1월	2.2	2.0	4.5	5.0	12.8	8.2
2월	3.3	1.2	6.8	6.6	2.5	7.9
3월	1.8	1.9	2.2	2.4	3.2	2.4
4월	0.5	1.1	1.4	1.7	3.1	2.5
5월	0.8	1.3	2.9	3.4	3.5	3.5
6월	0.6	1.5	2.3	2.8	5.3	3.7
7월	1.5	2.2	3.7	4.4	5.3	4.9
8월	0.2	0.0	-0.5	-0.4	0.4	0.9
9월	-3.4	-3.8	-4.7	-3.8	-4.8	-4.2
10월	1.0	1.0	1.0	1.7	1.6	1.9
11월	2.4	3.1	3.5	3.7	4.5	3.6
12월	2.8	5.8	6.9	6.9	19.0	8.0
평균	1.1	1.4	2.5	2.9	4.7	3.6

댐 유역의 수질 중 기온 및 유량의 영향을 많이 받는 인자인 BOD는 2020년, 2050년, 2080년으로 갈수록 A2 시나리오 및 B1 시나리오가 증가하는 경향을 나타내었다. 월별 변화는 강우량 적고 수온이 높은 갈수기 중에 3~6월의 경우 상대적으로 BOD 농도가 상승 및 증가 폭이 높은 추세를 보이고, 하절기가 될수록 강우에 따른 유량 증가의 원인으로 농도가 감소한 후 10월부터 조금씩 상승하는 것으로 나타났다. A2 및 B1 시나리오별 월평균 BOD농도 변화는 유량의 변화와 같이 2020년 및 2050년은 B1 시나리오에서 증가하였고 2080년 A2 시나리

오가 높은 경향을 나타냈다.

TN변화 특성은 3월부터 6월까지 TN이 감소하는 경향을 나타내었으며 그 이후부터 다시 증가하는 패턴을 나타내었다. 또한 안동댐 유역의 8월, 9월은 기준연도인 2000년보다 TN농도가 낮게 나타나고 있으며 그 밖에 월평균 자료는 현재보다 증가하는 것으로 나타났다. 특히 A2 시나리오에서 2080년 이후의 증가가 확실히 눈에 띄는데 이는 강우량이 2080년에 A2 시나리오가 B1 시나리오에 비해 유량이 증가하는 경향 때문인 것으로 판단된다.

TP변화 특성은 BOD와 TN과는 달리 전반적으로

감소하는 추세를 나타내었다. 연도별 변화는 오히려 2020년에서 2080년에 갈수기의 TP가 더욱 감소하는 현상을 나타내고 있는데 특히, 2080년도 갈수기에 더욱 감소하는 현상을 나타내었는데 이는 유량의 감소 및 조류성장에 원인으로 판단된다. 월별 변화 또한 1월부터 5월까지가 예측치가 실측치보다 감소하는 현상을 나타내고 있으며 전반적인 TP농도의 변화는 홍수기에는 증가하고 갈수기에 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, TP 농도 변화는 B1 시나리오가 A2 시나리오 보다 미미하게 높은 경향을 나타내었다.

IV. 결론

본 연구는 기후변화가 댐 유역의 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해서, 우선 IPCC의 배출 시나리오 중 극한사황을 나타내는 A2 시나리오와 청정 및 자원 효율적이고 대상유역과 유사한 조건인 B1 시나리오에 대하여, 2020년, 2050년, 2080년에 대한 장래 기온과 강우량을 추정하였다. 이러한 장래 예측된 기후인자 및 토지이용 자료를 이용하여, 안동댐 유역에 대한 유량 및 BOD, TN, TP 농도를 SWAT 모형을 적용하여 모의하였다.

1. 기후변화에 따른 강우 변화 추세는 극한 현상을 나타내는 A2 시나리오에서 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 기온의 경우는 B1 시나리오보다 A2 시나리오의 연도별 증가폭이 큰 것으로 나타났으며, 2000년부터 2080년까지 월평균 기온 변화도 정도의 차이가 있으나 전반적으로 모두 증가하는 경향을 나타내었다.

2. SWAT모형을 적용하여 예측한 댐 유역의 월별 유량 변화는 강우가 적은 5월과 6월에 유량도 감소하는 경향을 나타내었고, 이후 9월까지 급격히 증가하며 10월에 이르러 증가폭이 급격히 감소하는 현상을 나타내었으며, 2월은 용설(snowmelt)의 영향으로 강우량의 영향은 미미하였으나 유량이 증가하는 것으로 나타났었다. 연도별 유량 변화는 시나리오별 강우량의 증가로 전체적으로 증가 추세를

보였으며, 2050년까지는 유량 증가폭이 미비 하였으나 2080년으로 갈수록 유량 증가폭이 크게 나타났다.

3. 댐 유역의 수질 중 기온 및 유량의 영향을 많이 받는 인자인 BOD는 2020년, 2050년, 2080년으로 갈수록 일부 증가하는 경향을 나타내었다. 월별 변화는 강우량 적고 수온이 높은 3~6월의 경우 BOD 농도의 상승 및 증가 폭이 큰 경향을 보이고, 하절기가 될수록 강우에 따른 유량 증가로 농도가 감소한 후 10월부터 조금씩 상승하는 것으로 나타났다. A2, B1 시나리오별 BOD 농도 변화는 B1 시나리오에서 연도별 증가폭 및 오염도가 다소 높은 경향을 나타내었다.

4. TN의 경우는 BOD와는 다른 경향을 나타내고 있는데, 갈수기인 3월부터 6월까지 TN이 감소하는 경향을 나타내고 있으며 그 이후부터 다시 상승하는 경향을 나타내고 있다. 2080년 이후에는 두 시나리오 모두 8, 9월을 제외하고는 현재보다는 증가하는 현상을 나타내고 있다. 특히 A2 시나리오에서 2080년 이후의 증가가 확인한데 이는 2080년의 경우 A2 시나리오가 B1 시나리오에 비해 강우의 증가에 따른 유량 증가 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

5. TP의 경우는 TN과 반대로 전반적으로 감소하는 추세를 보이고 있다. 연도별 변화는 오히려 2020년에 비해 2080년 갈수기의 TP가 더욱 감소하는 현상을 나타내고 있는데 이는 유량의 감소 및 조류성장이 원인인 것으로 판단된다. 월별 TP농도의 변화는 홍수기시에는 증가하고 갈수기시에 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 각 시나리오별 TP 농도 변화는 B1 시나리오가 A2 시나리오 보다 다소 높은 경향을 나타내었다.

6. 본 연구에서는 IPCC의 배출 시나리오 중 A2와 B1 시나리오를 기초로 GCM 자료를 이용하여 대상유역의 장래 기후변화를 모의하였다. 또한 이를 토대로 GIS 기반의 유역모형인 SWAT를 대상모형에 적용하여 유량 및 수질변화를 예측하였다. 향후 기후변화에 따른 기온, 유량변화와 수질 항목간의

상간관계 정립 및 수질 모의의 불확실성 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단되며, 본 연구의 결과는 수자원 및 수환경 정책수립 등에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0029194).

참고문헌

- 배덕효, 정일원, 권원태 (2007). 수자원에 대한 기후 변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I): 유역별 기후시나리오 구축, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 40(3), 191-204.
- 안재현, 윤용남, 이재수 (2001a). 지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 34(4), 347-356.
- 안재현, 윤용남, 유철상 (2001b). 지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여: 2. 물수지 모형을 이용한 대청댐 상유 유역 수문환경의 변화 분석, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 34(5), 511-519.
- Choi, Y. 2002. Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea, Korea Soc. Environmental Impact Assessment, 11, 189-203.
- IPCC(1994). Climate Change 1994, Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC(2000). Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC(2007) Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change (Pre-copy edit version) http://www.mnp.nl/ipcc/pages_media/AR4-chapters.html
- Menzel, R.G.(1980). Enrichment ratios for water quality modeling. In: CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Conservation Research Report 26, Department of Agriculture, Washington, D.C., 482-492.
- Thomann, R.V. and J.A. Mueller.(1987). Principles of surface water quality modeling and control. Harper & Row Publishers, New York, 644.