미래 기후변화에 따른 낙동강 유역의 수문·수질 변화

Assessing Future Climate Change Impact on Hydrologic and Water Quality Components in Nakdong River Basin

장 재 호* / 안 종 호**

Jang, Jae Ho / Ahn, Jong Ho

Abstract

Projected changes and their impacts on water quality are simulated in response to climate change stressors. CGHR (T63) simulation on the A1B scenario is converted to regional scale data using a statistical down-scaling method and applied to SWAT model to assess water quality impacts in Nakdong River basin. The results demonstrate that rainfall-runoff and pollutant loading in the future (2011~2100) will clearly increase as compared to the last 30-year average. The rate of pollutant loading increase is expected to continue its acceleration until 2040s. Runoff also shows similar patterns to the precipitation, increasing by 60%. Accordingly, the runoff increase results in escalation of pollutant loading by 35~45% for TSS and 5~20% for T-P. This phenomenon is more pronounced in the upper basin during winter and spring season.

Keywords : CGHR (T63), Climate change, Nakdong River basin, SWAT model, water quality

요 지

낙동강 미래 기후변화 시나리오 추출을 위해 CGHR (T63) 모형과 A1B 온실가스 배출시나리오를 통계적 규모내림방법으로 대상유역의 규모로 축소·변환한 후, 수문·수질의 거동변화 등의 영향을 모의하기 위해 SS와 T-P를 대상으로 SWAT 모델을 적용하였다. 과거 30년 자료와 비교한 결과, 지표유출은 지역에 따라 최대 60%까지, 오염배출 부하는 TSS와 T-P의 경우 각각 35~45%, 5~20% 정도 변화되어, 미래 기후변화로 인한 지표유출과 오염부하 배출은 향후 뚜렷한 증가가 예상된다. 또한, 그 증가경향은 낙동강 하류지역보다 상류지역에 크게 나타나며 계절별로는 겨울과 봄철의 증가가 크고 먼 미래로 갈수록 증가하는 반면, 여름과 가을철에는 먼 미래로 갈수록 증가율이 감소하는 경향을 나타내어 갈수기 지표수 수질에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측된다.

핵심용어 : CGHR (T63), 기후변화, 낙동강 유역, SWAT 모형, 수질

1. 서 론

오늘날 전 지구적인 기후변화는 기온과 강수량의 변화를 초래하여 강우, 증발산량, 지하수, 지표수 등 많은 수환경 인자에 영향을 미쳐 물순환 체계의 불안정을 유발하고

있다. 우리나라도 지난 35년간 폭우빈도가 2배 증가했으며 계절간 강수 불균형이 심화된 것으로 나타났다(환경부, 2008b). 지표면 복사와 기온 상승, 강우패턴의 변동심화는 수문순환과정의 변동을 야기하게 되어 물관련 재해에 직·간접적인 인과관계를 초래하며 유역하천의 수질악

* 한국환경정책·평가연구원 정책연구본부 물환경연구실 초빙연구원

Invited Research Fellow, Div. of Water Environment, Korean Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea

** 교신저자, 한국환경정책·평가연구원 정책연구본부 물환경연구실 부연구위원 (e-mail: ahnjh@kei.re.kr, Tel: 02-380-7741)

Corresponding Author, Research Fellow, Div. of Water Environment, Korean Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea

화와 수생태환경의 변화에도 중요한 영향을 미치게 될 것으로 예측되고 있다(안종호 등, 2011). 이와 같은 미래 하천유량 및 수질의 불확실성은 유역환경 변화의 예측을 어렵게 하여 수자원 관리와 공중보건을 보호하기 위해 계획된 국가적 시스템 체계에 막대한 악영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 우리나라는 생활용수 공급의 대부분을 주요 4대강 지표수로부터 의존하고 있기 때문에 지표수의 수량, 수질, 공중보건, 생태환경 등의 종합적이고 체계적인 유역관리가 매우 중요하다. 특히, 낙동강 수계는 대부분 하천표류수를 직접 취수하여 사용하여 기후변화로 인한 수질오염과 수자원 관리의 취약성이 크기 때문에(안종호 등, 2009), 다변화하는 유역환경 속에서 지속가능한 물이용 체계를 구축하는 것이 절대적으로 필요하다. 특히, 기후변화로 인해 예상되는 문제들을 앞서 검토하고 선제적으로 대비하는 것이 시민의 안전과 생태계 보호 그리고 지속가능한 수자원 확보와 수질관리차원에서 요구되며, 특히 기후변화에 대응한 수질보전을 위해서는 유량과 연계한 과학적인 수질관리방안 마련을 위한 연구가 시급한 실정이다.

국외에서는 기후변화 시나리오와 다양한 유역환경 변화를 고려하여 하천, 저수지의 수문학적 영향 및 수질과 수생태 변화 등을 예측하는 연구들(Bouraoui et al., 2004; Komatsu et al., 2007; Michael et al., 2005; Nearing et al., 2005; Tung et al., 2006)이 폭넓게 진행되어 왔다. 국내에서도 물관련 분야에서 기후변화로 인한 수자원 영향 대한 연구는 물순환 및 물수지 변화 등 기상 및 수문 관측 자료의 평가와 기후변화 시나리오를 이용한 수문예측(Kim et al., 2007; ; 양해근, 2007; 이동규, 2008; 정일원 등, 2008; 한수희 등, 2009; 이정호 등, 2010; 손태석 등, 2010a; 이아연과 김상단, 2011) 등이 지속적으로 이루어지고 있다. 이에 비해 기후변화에 따른 하천 수질영향 연구는 박종윤 등(2009), 손태석 등(2010b), 정제호 등(2011), 최대규 등(2009)에 의해 수행된 바 있으나, 낙동강과 같은 대규모 유역에 대한 오염부하량 배출특성과 미래 기후변화에 따른 하천수질 악화 및 비점오염원 거동특성 변화에 관한 총체적인 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 GCMs 모형인 CGHR(T63) 모형과 온실가스 배출 시나리오인 A1B를 이용하여 미래 기후변화에 따른 수질오염에 취약한 낙동강 유역의 수문 영향과 지표유출에 따른 수질에 미치는 영향을 평가하였다. 특히, 수질의 경우 탁수 및 부영양화의 원인물질인 SS와 2단계 오염총량관리 대상항목인 T-P를 대상으로 하였으며 평가도구로는 국내외에서 수문·수질모의에 널리 활용되고 있는 SWAT 모델을 적용하였다.

2. 미래 기후정보 구축

기후시나리오에 따른 유출량 및 수질변화를 모의하기 위해 한반도 수환경 평가에 적절한 기후변화 모델을 구축하고자 하였다. 이를 위해 총 17개의 GCMs 자료를 수집하였으며 현재기후 시나리오인 20C3M 시나리오의 모의결과와 우리나라 24개 기상관측 지점의 1971~2000년 기온 및 강수량자료를 비교·검증하였다. 최종적으로 GCMs의 동아시아의 육지표현능력이 뚜렷하며 현재기후의 재현성과 우리나라 수환경과의 적합성 및 영향분석에 필요한 자료의 이용성 등을 고려하여 캐나다에서 2005년도에 개발한 A1B 시나리오(2011~2100년)가 적용된 CGHR(T63)을 선정하였다(안종호 등, 2011). A1B는 A1 시나리오 그룹 중 하나로 미래의 매우 빠른 경제성장, 세기 중간에 최대 인구에 도달한 후 감소, 새롭고 더 효율적인 기술의 빠른 도입 등을 묘사하여 모든 에너지원의 균형 상태를 이루고 있는 경우로서 현재 우리나라의 경제발전상황을 잘 대변하는 시나리오이다. CGHR(T63)의 해상도는 경위도 $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$ 이며 대략 한 개의 격자크기가 300×300 km로서 낙동강 유역의 공간적 기상분포를 정확하게 묘사하기 위해서는 편보정과 상세화기법이 요구된다.

편의보정은 GCM에서 제공되는 20C3M시나리오의 1971~2000년의 월별 평균기온과 강수량 자료를 동일한 기간의 24개 지점에서 관측 자료의 공간평균자료와 일치시키기 위해 누적분포함수를 관측된 공간평균 자료의 누가확률밀도함수에 Quantile mapping하는 방법으로 수행하였다. 편의보정과정을 거쳐 획득한 현재 및 미래 강수량과 평균기온 자료를 이용하여 시공간적 변화인자기법(Spatio-Temporal Changing Factor Method, STCFM)을 적용하여 규모내림 하였다. STCFM의 경우 현재 기후에 의한 통계학적 상관성이 미래 기후에도 영향을 미칠 수 있다는 단점이 있지만, 월 강수량 및 월 평균기온에 근거하여 비교적 간단하며 계산이 경제적이기 때문에 GCM 자료를 이용하여 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다(환경부, 2006). 이 기법은 강수량을 백분율 기준으로, 평균기온은 편차 기준으로 적용하며 실질적인 예로서 강수량에 대한 절차를 Fig. 1과 같이 나타냈으며 요약하면 아래와 같다.

- ① 지점별 과거 관측 30년 자료의 공간평균 월 기상자료(낙동강 19개 기상관측소 1980~2009년)에 예측된 백분율을 적용하여 미래 공간 평균 월 기상자료(2011~2040년) 산출
- ② 미래 공간평균 30년 자료를 내림차순으로 정렬하고 과거 관측 공간평균자료도 내림차순으로 정렬

(a) Nakdong River basins

(b) Down-scaling procedure

Fig. 1. Site description and Down-scaling Procedure

- ③ 상기 미래 공간평균 자료의 순위와 일치하는 과거 관측 공간평균자료의 공간분포 분율(지점 월 강수량/ 공간평균 월 강수량)을 미래 공간평균 자료에 적용하여 미래 지점별 일 기상자료 생성
- ④ 2041~2070년, 2071~2100년에 대해서도 동일한 절차로 생성

3. SWAT 모델의 구축 및 검·보정

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델은 미국 농무성의 농업연구소(USDA, Agricultural Research Service)에서 개발하였고 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지 관리 상태에 따른 강우-유출, 유사이동, 영양물질을 예측하는 준 분포형 유역단위 수질모형으로서(Neitsch et al., 2005) 수문·환경·생태학자들의 연구에 광범위하게 활용되고 있다. SWAT 모델은 유출량 해석을 중심으로 연구가 시작되어 최근에는 비점오염 관리를 위한 수질 모의, 모형의 알고리즘 개선, 기후변화에 따른 수문·수질영향 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서 사용된 모델은 SWAT2005 버전으로 ArcGIS기반에서 수지도도모형과 유역경계 및 하천망 자료를 이용해 대상유역을 분할하고 토지이용도와 토양도 및 경사도를 중첩하여 만든 수

문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)별로 유량 및 오염물질 발생량을 계산하며 이를 하도 추적한다. 모델의 소유역 자동분할 기능을 이용하여 오염총량관리 단위유역을 고려한 67개의 소유역으로 분할하였다. 환경지리정보서비스(<http://egis.me.go.kr/egis>)와 국립식량과학원으로부터 중분류 토지피복도 및 정밀토양도를 각각 제공받아 유역경계에 맞게 재분류하였으며 재분류된 소유역별 토지이용과 토양특성 그리고 경사정보를 중첩하여 1,256개의 HRUs를 생성하였다.

수문보정을 위해 대상유역에 대한 강우량, 기온(최대·최저기온), 풍속, 일사량 및 상대습도 등의 기상자료를 일단위로 수집하여 모델에 입력하였다. 하천수질 모의를 위해 2007년 전국 오염원 기초조사 자료를 이용하여 배출부하량을 산정하였다. 환경부 수질측정망 자료의 태별 농도를 참고하여 암모니아, 질산염, 아질산염, 유기질소, 인산염, 유기인 등의 태별 비율을 계산하였으며 질소와 인에 대한 태별 배출부하량을 산정하여 소유역별로 할당하였다. SS의 경우 방류수 수질기준인 10~20 mg/L을 지역적 규제기준에 따라 소유역별로 적용하였다. 한편, 대상유역에 조절유량을 반영하기 위해 국가 수자원관리종합정보시스템의 7개 댐 제원과 일별 방류량(2004~2009)을 수집하였으며 관측일 유량법을 적용하여 모의하였다. 또한 2007 상수도 통계연보(환경부, 2008a)를 이용하여 소유역

별 생·공용수량을 산정하였으며 하천 유량과 강수량 그리고 수정 Penman식에 의해 계산된 증발산량 등을 이용하여 소유역별 농업용수량을 산정하였다. 이상과 같은 대상 유역의 SWAT 모델 구축과정과 검·보정 절차는 안중호 등(2010)의 연구보고서에 상세히 설명되어 있다.

모의기간은 6년(보정: 2007~2009, 검증: 2004~2006)이고 모델의 안정화를 위해 2002년부터 2003년까지 추가 모의하였다. 국내외 연구자들이 보고한 매개변수를 참고하여 유량 및 수질모의에 적절한 매개변수를 선정하여 허용범위 내에서 단순시행착오법에 의해 보정하였다. 또한 실측값에 대한 모의결과의 적절성을 평가하기 위해 % *difference* (ASCE, 1993), *NSE* (Nash and Sutcliffe, 1970) 그리고 결정계수(Coefficient of Determination, R^2)를 산정하였으며 모델효율 범위는 Donigian (2000)이 제시한 조건을 기초로 보정하였다. 모델의 검·보정은 본류구간 13개 지점과 지류구간 30개 지점에 대해 각각 수행하였으며 보정결과는 동일한 대상유역을 기초로 수행된 장재호와 안중호(2012)의 연구를 참조할 수 있다. 지표유출량의 경우 낙동강 본류 및 지류구간 모두 검·보정기간에 걸쳐

모델효율 범위 내(% *diff* 15% 이하, *NSE* 0.64~0.85)에서 실측 유량에 대한 높은 적응성을 나타내었다. 수질 검·보정 결과, SS와 T-P는 % *diff*가 15~35% 범위로 특정지점 및 항목에 있어 다소 높게 나타났으나 수질 메커니즘이 복잡·다양한 유역의 공간적 특성을 고려할 때 실측자료의 경향을 적절히 묘사한 것으로 판단되었다. 또한 선형회귀분석 결과, 유량은 R^2 가 0.70 이상으로 비교적 높은 유의성을 보였으며 SS와 T-P는 각각 0.50~0.64의 범위로서 모델을 이용한 장기 수질예측에 있어 신뢰성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 미래 기후변화 영향 평가

4.1 미래 기후변화 전망

STCFM을 적용하여 규모내림된 2020s (2011~2040년), 2050s (2041~2070년), 2080s (2071~2100년)의 단위기간과 과거 20c3m (1980~2009년) 자료와의 비교를 통한 단위유역별 기온과 강수량의 상호 증감변화를 살펴보면, Table 1과 같다. 기온의 경우 가을철은 미미한 수준에서 증가하

Table 1. Projected Changes in Temperature and Precipitation

Season	Scenario	Temperature		Precipitation	
		(℃)	variation (℃)	(mm)	variation (%)
Spring (Mar.-May)	Present	13.33	-	211.8	-
	2020s	13.28	-0.05	250.6	18.3
	2050s	14.31	0.98	244.3	15.4
	2080s	14.99	1.67	285.5	34.8
Summer (Jun.-Aug.)	Present	24.19	-	640.4	-
	2020s	24.18	-0.01	743.3	16.1
	2050s	25.25	1.06	791.6	23.6
	2080s	26.06	1.87	760.4	18.7
Autumn (Sep.-Nov.)	Present	15.49	-	212.3	-
	2020s	15.54	0.05	257.6	21.3
	2050s	16.70	1.21	260.3	22.6
	2080s	17.27	1.78	268.2	26.3
Winter (Dec.-Feb.)	Present	2.18	-	48.5	-
	2020s	2.15	-0.03	66.3	36.8
	2050s	3.82	1.64	66.8	37.7
	2080s	4.29	2.11	78.5	62.0
Annual (Jan.-Dec.)	Present	13.80	-	1,113.0	-
	2020s	13.79	-0.01	1,317.8	18.4
	2050s	15.02	1.22	1,362.9	22.5
	2080s	15.65	1.86	1,392.6	25.1

였지만 다른 계절에서는 오히려 감소경향을 보인 2020s와는 달리 2050s와 2080s는 모든 계절에서 미래로 가면서 꾸준히 증가하였는데, 계속되는 지구온난화로 인해 2080s의 평균온도는 겨울철에 최대 2.1℃ (130%)까지 상승할 것으로 전망되었다. 또한 봄, 여름, 가을의 경우도 서서히 증가하여 과거 30년 대비 2080s까지 10% 이상의 기온 상승이 예상되었다. 기온변화의 공간적 특성은 겨울철에 낙동강 상류는 100% 이상, 하류는 30% 수준으로 상당한 증가가 예상된다.

한편, 규모내림 된 결과를 통해 강수량의 변화경향을 살펴보면, 장기적으로 강수량의 증가가 예상되며 2020s, 2050s, 2080s에서 각각 18.4%, 22.5%, 25.1%씩 증가할 것으로 나타났다. 과거대비 2020s는 급격한 증가를 보였으며 시간이 경과함에 따라 과거와의 편차가 점차 증가할 것으로 전망되는데, 특히 2080s에서 가장 큰 편차율을 나타냈다. 계절적인 변화특성은 15~62% 범위의 변화폭을 보였고, 특히 겨울철에 증가경향(37~62%)이 가장 큰 폭으로 나타나면서 전반적으로 겨울, 봄, 가을철의 편차가 증가하는 반면, 여름철의 편차변화는 먼 미래로 갈수록 감소하는 특성을 보였다.

4.2 미래 기후변화에 따른 수문·수질예측

4.2.1 단위유역별 수문·수질 변화특성

Fig. 2는 단위유역에 대한 단위기간별 강수량의 변화특성을 보여준다. 낙동강 상·하류 간의 변화폭에는 큰 차이가 없으나 낙동강 상류구간에서 먼 미래로 갈수록 강수량 변화가 다소 크게 나타났다. 또한 안동·임하댐 유역을 시작으로 낙동강 본류구간을 중심으로 증가경향을 뚜렷하

게 나타내었다. 지표유출량의 경우 강우량의 변화특성과 유사한 경향을 나타냈는데(Fig. 3), 증가가 뚜렷한 지역으로는 지류유역의 경우 내성천, 임하댐, 회천 유역 등에서 60% 이상으로 가장 크게 나타났고 안동댐, 반변천, 병성천, 백천, 합천댐 및 양산천 유역 등에서도 50% 이상의 높은 증가를 나타냈다. 또한 본류유역의 경우 강우 변화패턴과 유사하게 전반적으로 높은 증가율을 보였다. 부유물질 부하량의 경우 내성천, 임하댐, 회천 등의 지류유역과 낙분H와 낙분K 등의 본류유역에서 약 80% 이상의 높은 증가를 나타내어 유출량의 변화와 상호 밀접한 관계가 있음을 보여주었다(Fig. 4). 한편, T-P는 임하댐과 양산천 유역에서 40% 이상으로 가장 뚜렷한 증가경향을 보였으며 그 뒤를 이어 회천, 길안천, 위천 유역 등의 증가율도 높게 나타났다(Fig. 5).

전반적으로 강수량 및 유출량의 변화특성에 따라 수질 변화 경향도 유사한 결과를 보였으며 지류유역의 오염부하량 증가가 비교적 크게 나타났다. 2100까지의 단위기간별 (2020s, 2050s, 2080s)변화 정도를 살펴보면 SS의 경우 유출량 경향과 유사하여 2020s에서 급격한 증가를 보였으며 2080s로 갈수록 1.42~1.50배 정도 부하량이 증가하는 것으로 나타났다. 한편, T-P의 경우 2020s에서 비교적 큰 폭으로 증가하는 반면, 2080s로 갈수록 증가율이 다소 둔화되면서, T-P 부하량의 장기적인 변화경향은 전반적으로 약 1.1배 수준에서 증가하는 것으로 예측되었으며, 그 원인은 Fig. 8을 통해 설명될 수 있다. 이와 더불어 특정유역의 경우 수질항목 및 지역에 따라 유출량이 증가함에도 불구하고 비교적 부하량 변화가 적은 경향을 나타냈다. 원인을 살펴보면 낙동강 유역은 일부 도시지역을 제외하

Fig. 2. Spatial Distribution of Precipitation

Fig. 3. Spatial Distribution of Streamflow

Fig. 4. Spatial Distributions of SS Loads

Fig. 5. Spatial Distribution of T-P loads

고 산림과 농경지가 많은 비중을 차지하지만, 도시지역으로부터 배출되는 가정하수 및 공장폐수 등은 일정한 양이 지속적으로 발생되어 강우시나 비강우시 배출량에는 큰 변동이 없기 때문에 불투수층의 비중이 큰 지역은 강우 또는 지표유출량의 변화에 크게 영향을 받지 않을 수 있다. 따라서 기후변화에 따른 수질영향을 명확히 해석하기 위해서는 미래 토지이용변화를 고려한 연구가 동시에 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4.2.2 계절적 변화 특성

낙동강 총량 추정지점인 낙본 E와 낙본 M을 상류와 하류구간의 각각 대표지점으로 하여 기후변화에 따른 계절적 특성을 살펴보았다(Figs. 6~8). 기후변화에 따른 지표유출의 계절변화 특성은 먼 미래로 시간이 경과함에 따라 강우량 및 기온 변화와 유사하게 나타났는데, 낙동강 상류는 20~40%, 하류는 20~60%로 하류 유역이 상류 유역

Fig. 6. Seasonal Variation of Streamflow

Fig. 7. Seasonal Variation of TSS loads

Fig. 8. Seasonal Variation of T-P loads

보다 다소 높은 증가율을 나타냈다. 이러한 특징은 시간이 지남에 따라 하류 유역의 경우 동일한 강우에 대한 지표 유출률이 커짐을 의미한다고 할 수 있다. 겨울과 봄철에는 증가, 여름과 가을철에는 유출량이 다소 감소하는 등 지구온난화로 인해 계절적 경향을 뚜렷이 나타내었다. 부유물질 부하량의 경우도 지표유출의 변화경향에 따라 30%부터 100% 이상까지 증가하였다. 또한 하류구간의 부하량 증가가 상류와 비교하여 다소 크고 계절적으로는 겨울철에 가장 뚜렷하게 증가하였고 봄철 증가율도 높게 나타났다.

한편, T-P 부하량의 경우 증가율은 SS와 비교하여 상대적으로 작아 상류와 하류구간에서 40% 미만의 증가율 분포를 보였으나 강우 유출량에 민감하게 반응하는 것을 예측할 수 있었다. T-P 부하량의 경우 계절적 변화정도를 고려하여 계절에 따른 큰 차이점을 나타냈는데, 먼 미래로 시간이 경과할수록 겨울과 봄철에는 증가하는 경향을 보였다. 이는 지표유출량 및 SS 부하량의 변화와 유사한 계절적 특성이며 지구온난화로 인해 예상되는 수문·수질특성의 이동과 밀접한 관계가 있음을 설명해 준다. 반면, 여름과 가을철의 경우 뚜렷한 패턴은 없었으나, 여름철에는 2020s가, 가을철에는 2050s에서 다른 계절과 비교하여 상대적으로 높은 부하량 증가를 나타냈으며 정량적 차원에서 2020s의 여름철 증가량이 상당히 큰 반면, 2080s로 갈수록 큰 폭으로 감소하기 때문에 Fig. 6의 T-P결과에서와 같이 먼 미래로 갈수록 여름철 영향으로 증가폭이 둔화되어 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 상류와 하류의 공간적 특성은 하류 유역의 변화율이 상류에 비해 다소 크게 나타남을 알 수 있는데, 하류유역이 동일한 강우에 대해 지표 유출률이 크기 때문에 이에 따른 부하량 배출에도 영향을 미치는 것으로 판단되며 이상의 계절적 변화특성은 AIB 시나리오의 변화특성과 낙동강 유역의 기상, 오염원, 토지이용 및 토양 등의 고유특성에 의존하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 유역 모델링을 통해 미래 기후변화가 대규모 유역의 수문·수질에 미치는 영향을 평가하고자 CGHR (T63) 모형의 결과로부터 편이보정 및 규모내림을 통해 미래 기상자료를 생산하고 SWAT 모형을 이용하여 낙동강 유역의 미래 수문학적 거동 특성 및 수질변화를 모델링하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

과거자료와 비교할 때 낙동강 유역의 미래 기후변화는 뚜렷한 지표유출 증가와 함께 수질오염 배출부하량을 증

가시켜 지표수 수질에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 유출량과 오염부하량의 증가경향은 낙동강 하류지역보다 상류지역에 크게 나타나며, 계절별로는 겨울과 봄철의 증가가 크고 먼 미래로 갈수록(2020s→2100s) 증가하는 반면, 여름과 가을철에는 먼 미래로 갈수록 증가율이 감소하는 경향을 나타내었다. 미래의 수문환경 자료는 다양한 불확실성이 내포된 자료를 바탕으로 예측된 결과이기 때문에 정확한 시기별 결과를 예측하는 것은 다소 무리가 있으며 수학적 통계기법과 몇 가지 인자만으로 복잡한 자연환경을 해석하는 것은 더욱더 어렵다. 그러나 기후변화에 따른 수질변화는 유역의 수문변화와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었으며 오염물질에 의한 하천수질에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다. 따라서 기후변화에 대한 적응 및 대응전략을 수립하기 위해서는 유역 모델링을 통해 수자원의 변동성과 유역의 오염물질 거동 특성을 예측하고 정량적인 분석을 통해 적절한 관리방안을 마련해야 할 것으로 판단된다.

한편, 본 연구 결과는 한계점이 존재하며 본 연구의 결과를 절대적 판단 기준으로 적용하는 것은 어렵지만, 유역 모델링을 통한 평가기법을 제시하고 미래 기온과 강수량의 변화와 지표유출 및 오염물질의 유출특성 변화에 대한 전망이 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해 유역모형의 구축, 낮은 해상도를 지닌 GCM의 편이보정 및 규모내림, 미래 시나리오 적용 등 일련의 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위한 노력이 요구된다. 국립기상연구소(2011)에 따르면 2012년 말까지 30개의 GCM 시나리오를 제공할 계획이며 기후변화에 따른 물환경 분야에 미치는 영향을 평가하여 보다 신뢰성 있는 결과에 일조할 것으로 판단된다. 또한 현재 우리나라는 극심한 가뭄 및 홍수와 같은 기후양극화현상이 빈번히 발생하고 있기 때문에 향후 이와 같은 이상기후변동이 낙동강 수질에 미치는 영향에 대해서도 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구과제는 한국환경정책·평가연구원 녹색성장정책연구의 연구비 지원에 의해 수행된 “기후변화 대응 수질제어 및 관리방안(II)”의 연구내용의 일부이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

국립기상연구소 (2011). IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한

- 기후변화 시나리오 보고서. pp. 1-117.
- 박종윤, 박민지, 안소라, 김성준 (2009). “기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는 영향평가를 위한 유역 모델링.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제10호, pp. 877-889.
- 손태석, 이상도, 김상단, 신현석 (2010a). “유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천유량 영향 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 10호, pp. 865-881.
- 손태석, 임용규, 백명기, 신현석 (2010b). “기후변화에 따른 낙동강 유역의 기온 경향성 및 수온과의 탄성도 분석.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제26권, 제5호, pp. 822-833.
- 안종호, 이진희, 김호정, 한대호 (2009). 물관리 취약성 과 물안보 전략 I.” **한국환경정책·평가연구원**, 2009-11, pp. 33-64.
- 안종호, 홍용석, 강형식, 김호정, 한대호, 장재호, 서동일, 박윤희 (2010). “기후변화 대응 수질제어 및 관리방안 (I).” **경제·인문사회연구회 녹색성장종합연구총서 10-02-97(6)**, 한국환경정책·평가연구원, 2010-19, pp. 112-132.
- 안종호, 장재호, 강형식, 한대호, 정선희, 이진희, 김진희, 김영오 (2011). “기후변화 대응을 위한 수질제어 및 관리 방안(II).” **경제·인문사회연구회 녹색성장종합연구총서 11-02-85(5)**, 한국환경정책·평가연구원, 2011-13, pp. 1-202.
- 양해근 (2007). “기후변화에 따른 유역의 물수지 변화.” **대한지리학회지**, 대한지리학회, 제42권, 제3호, pp. 405-420.
- 이동규 (2008). “기후변화에 의한 한반도 기후와 유출량의 변화.” **대한설비공학회지**, 대한설비공학회, 제37권, 제1호, pp. 8-12.
- 이아연, 김상단 (2011). “낙동강 유역 환경유량에 대한 기후변화의 영향 분석.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제27권, 제3호, pp. 273-285.
- 이정호, 전성우, 이명진, 홍현정 (2010). 기후변화 연동 4대강 유역 지하수 함양량 예측 및 이용 가능량 산정 II.” **경제·인문사회연구회 녹색성장종합연구총서 10-02-97(5)**, 한국환경정책·평가연구원, 2010-18, pp. 1-149.
- 장재호, 안종호 (2012). “낙동강 유역의 수질관리를 위한 유역모델링 적용 연구.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제28권, 제3호, pp. 409-417.
- 정일원, 이병주, 전태현, 배덕효 (2008). “유출모형이 기후변화 수자원 영향평가에 미치는 영향 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 907-917.
- 정제호, 김동일, 최현구, 한건연 (2011). “기후변화시나리오에 따른 댐유역의 장기 수질변화 예측.” **한국환경영향평가학회지**, 한국환경영향평가학회, 제20권, 제2호, pp. 107-121.
- 최대규, 김문성, 김남원, 김상단 (2009). “CGCM 미래기후정보를 이용한 기후변화가 병성천 유역 수문 및 수질반응에 미치는 영향분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 921-931.
- 한수희, 유가영, 김상단 (2009). “식생 물 부족지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제4호, pp. 507-514.
- 환경부 (2006). 국제환경현안 대응·해결기술: 기후변화에 의한 물순환의 예측 및 평가. pp. 1-557.
- 환경부 (2008a). 2007년 상수도 통계연보. pp. 305-395.
- 환경부 (2008b). 수자원·수질 부문 기후변화 영향평가 및 적응대책 인벤토리 발굴 연구(I).
- ASCE (1993). “ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models.” *Irrigation Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 3, pp. 429-442.
- Bourauoi, F., Grizzetti, B., Granlund, K., Rekolainen, S., and Bidoglio, G. (2004). “Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment.” *Climate Change*, Vol. 66, pp. 109-126.
- Donigian, Jr., A.S. (2000). HSPF Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22, EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, 2000, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC.
- Kim, B.S., Kim, H.S., Seoh, B.H., and Kim, N.W. (2007). “Impact of climate change on water in Youndam Dam Basin, Korea.” *Stochastic Environment Research and Risk Assessment*, Vol. 21, pp. 355-373.
- Komatsu, E., Fukushima, T., and Harasawa, H. (2007). “A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality.” *Ecological Modeling*, Vol. 209, pp. 351-366.
- Michael, A., Schmidt, J., Enke, W., Deutschlander, T., and Malitz, G. (2005). “Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss results of

- comparative model simulations.” *Catena*, Vol. 61, pp. 155–164.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “Riverflow Forecasting through Conceptual Model.” *Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282–290.
- Nearing, M.A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnais, Y., Nichols, M.H., Nunes, J.P., and Renschler, C.S. (2005). “Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover.” *Catena*, Vol. 61, pp. 131–154.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. USDA Agricultural Research Service and Texas, pp. 1–476.
- Tung, C.P., Lee, T.Y., and Yang, Y.C. (2006). “Modelling climate-change impacts on stream temperature of Formosan landlocked salmon habitat.” *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 1629–1649.

논문번호: 12-007	접수: 2012.01.20
수정일자: 2012.07.16/08.02	심사완료: 2012.08.02