이상기후변화가 낙동강 유역의 수문·수질요소에 미치는 영향

Hydrologic and Water Quality Responses to Precipitation Extremes in Nakdong River Basin

장 재 호* / 안 종 호**

Jang, Jae Ho / Ahn, Jong Ho

Abstract

SWAT model is applied to simulate rainfall-runoff and pollutant loadings in the Nakdong River basin as the condition for extreme droughts and floods. The year 1994 and 2002 are chosen as the drought and flood year, respectively, through the analysis of past rainfall data for 30 years. The simulation results show decreases in both runoff and pollutant loadings for the drought year but increases for the flood year. However, the pollutant loadings on some upper sub-basins increase for drought year due to highly-regulated dam discharge and soil moisture change. Collectively, extreme droughts and floods have negative impacts on water quality, showing elevated SS loadings during wet season and concentrated T-P concentrations during low flow season. The extent of these impacts is highly influenced by antecedent dry days and precipitation patterns.

Keywords : extreme droughts and floods, Nakdong River basin, SWAT model, water quality

요 지

가뭄, 홍수와 같은 이상기후에 따른 낙동강 유역의 수문과 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 강우 시나리오기반의 장기유출 유역모의를 통해 지표유출과 오염부하량 발생 특성을 살펴보았다. 전반적으로 가뭄년도에서는 지표유출량 감소에 따라 오염부하량 감소현상을, 홍수년도에는 강우유출 증가에 따른 부하량 증가를 나타냈으나, 상류유역의 댐 직·하류와 같은 특정유역에서는 가뭄 시 댐 운영으로 인한 방류효과와 토양수분량의 변화 등의 물리적 요인들로 인해 SS부하량의 증가현상이 나타났다. 가뭄에 따른 SS의 농도변화는 유량변화에 따라 민감하게 반응하여 가뭄년도의 평수량 및 갈수량 시기에 높은 농도분포를 나타내었고 T-P는 상대적으로 본류구간보다는 유량이 비교적 적은 지류구간에서 높은 농도범위를 나타내었다. 반면, 홍수년도의 경우 SS와 T-P 모두 기준년도와 유사한 농도범위에서 완만한 형태의 변화를 보였다. 또한, 유출량이 적은 건기 시에는 SS 부하량 유출도 감소하지만 유출량이 증가할수록 부하량이 급격히 증가하는 반면, T-P의 경우 건기 시에 부하량 유출이 크고 강우 시에는 오히려 감소하여 건기일수와 강우패턴에 지배적으로 각기 다른 영향을 받는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 극한 가뭄과 홍수, 낙동강 유역, SWAT 모형, 수질

* 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.

1. 서론

유엔(United Nations, UN) 산하 정부 간 기후변화위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 관한 종합보고서에서 지구온난화는 인간에 의해 초래된 것으로 지적하면서 금세기 안에 지구 표면온도가 1.8~4.0°C 상승할 것으로 전망하고 기후변화에 따라 앞으로 더 심한 폭우와 해빙, 가뭄, 폭염, 그리고 해수면 상승이 있을 것이라고 경고하였다(IPCC, 2007). 최근 국내에서도 극심한 홍수나 연이은 3월의 폭설과 같은 이상기후로 인해 기후변화에 대한 관심과 경각심이 고조되고 있으며 이에 대한 연구와 대응책 마련에 대한 목소리도 높아지고 있다. 우리나라의 기상자료를 살펴보면 최근 10년(1999~2008년)과 과거 30년(1971~2000년)의 기후자료를 비교하였을 때 연 평균 강수량과 기온이 각각 9.1%, 0.6°C 상승하였다(기상청, 2009). 또한 이와 같은 기후변화 상태에서 우리나라는 기온 상승이 가장 높은 지역으로 분류되었으며 2100년에는 아열대 기후로 변화할 것으로 예측되었다. 특히 태풍과 집중강우, 홍수 등은 시민의 생명과 재산을 위협하고 도시 기능 마비를 유발시키는 원인이 되고 있고 장기적인 가뭄 현상은 물부족과 지역 간 물분배 불균형 문제를 초래할 뿐만 아니라 유역의 유출특성 변화는 비점오염원에 의한 오염물질의 거동에 변화를 일으키며 이에 따른 하천과 호소의 수질악화, 수생태계 파괴 등을 초래할 것으로 전망된다.

국외에서는 기후변화로 인한 수문 상승이 수생태계 교란과 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 수질모형의 적용에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있으며(Michael et al., 2005; Tung et al., 2006), 기후변화 시나리오와 다양한 유역환경 변화 시나리오를 접목하여 수문학적 영향 및 수질변화를 예측, 평가하는 연구들이 진행되고 있다(Bouraoui et al., 2002; Varanou et al., 2002; Bouraoui et al., 2004; Nearing et al., 2005; Komatsu et al. 2007). 국내에서도 최근 5년 간 기상 및 수문 관측 자료의 평가와 기후변화 시나리오 기반의 수문 및 수질 예측 등의 연구들(정일원 등, 2008; 한수희 등, 2009; 박종윤 등, 2009; 최대규 등, 2009; 유승환, 2009; 이정호 등, 2010; 이아연과 김상단, 2011)이 활발하게 수행되고 있다. 그럼에도 불구하고 가뭄과 홍수와 같은 극치수문사상을 고려한 기후변화에 따른 수질영향 분석은 아직까지 국내에 전무한 실정이다. 특히, 낙동강 수계는 하천표류수를 직접 취수하여 상수원으로 이용하기 때문에 수질오염에 취약하고 빈번한 수질오염사고로 인해 유역의 물이용 특성을 고려한 상수

원 수질관리에 대한 사회적 요구가 증가하고 있는 유역으로서 극한가뭄 및 홍수를 포함한 장래 기후변화에 따른 수질관리의 취약성을 평가하여 다변화하는 기후환경과 유역환경 속에서 지속가능한 수질관리 체계를 구축할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 유역을 대상으로 장기유출 모의에 널리 활용되고 있는 SWAT 모형을 구축하여 가뭄과 홍수 등의 극한기후변동이 낙동강 유역의 수문거동에 따른 수질에 미치는 영향을 평가하여 향후 낙동강 유역의 기후변화 적응 수질관리방안 마련을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 극한기후 자료의 구성

과거 수질의 월별 측정자료는 특정시기의 극한적 기후변동으로 인해 발생하는 수질변화를 설명하는데 한계가 있으며 측정지점도 제한적이어서 낙동강 유역의 공간적 수질변화를 모두 반영할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 낙동강 유역에 대한 가뭄과 홍수를 대표하는 시나리오 구성을 위해, 불확실성이 많은 GCMs를 이용하기 보다는 비시나리오 기반의 과거 기상자료를 활용하여 극한 기상조건에 따른 수문·수질영향을 분석하고자 하였다. 따라서 낙동강 유역의 과거 30년간(1980~2009)의 강우관측 자료를 검토하여 연평균 강우량이 가장 적었던 1994년을 가뭄 대표년도로, “태풍 루사”로 인해 인적·물적 손실이 컸던 2002년을 홍수 대표년도로 선정하였다. 또한 연평균 강우량 자료의 중간값을 나타내는 2007년을 현재를 대변하는 기준년도로 선정하였다. 낙동강 유역에 대한 각 시나리오별 월강우량과 연총강우량을 비교하면 Table 1, Fig. 1과 같다. 기준년도(2007년) 1,197.5mm, 가뭄년도(1994년) 613.8mm, 홍수년도(2002년) 1,391.7mm으로 기준년도(2007년) 대비 가뭄년도(1994년)는 48.7% 대폭 감소하고 홍수년도(2002년)는 16.2% 증가하였다. 월별 강우량 패턴을 살펴보면 가뭄년도의 경우 5, 6, 10, 11월 달에 기준년도 및 홍수년도와 비교하여 많은 양의 강우를 나타냈으며 가뭄과 홍수년도의 일별 강우패턴의 경우에도 가뭄년도에 일정량의 강우가 평상시에도 연중 꾸준히 내리는 반면, 홍수년도에는 평상시보다 하절기에 강우가 집중되는 현상을 보였다(Fig. 1).

3. SWAT 유역모델의 구축

수문·수질 모의를 위한 유역단위 수질모형으로 미국

Table 1. Comparison of Monthly Precipitation Scenarios (unit: mm)

Month	Reference (2007)	Drought (1994)	Flood (2002)
01	3.4	7.4	28.6
02	43.9	7.1	3.9
03	91.6	14.6	40.8
04	31.7	49.0	123.9
05	72.9	132.8	112.6
06	100.8	110.3	53.9
07	179.0	73.0	212.7
08	265.2	113.1	640.9
09	343.3	13.4	97.8
10	38.5	74.9	43.2
11	1.8	16.3	6.0
12	25.5	2.0	27.3
Total	1,197.5	613.8	1,391.7

Fig. 1. Time Series of Daily Precipitation Scenarios

농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형(ver. 2005)을 낙동강 유역을 대상으로 구축하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방안의 영향을 모의하기 위해 개발되었고 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어 있다(Neitsch et al., 2005).

낙동강 유역에 대한 SWAT 유역모형은 장재호와 안중호(2012)에서 제시된 방법을 따라 다음과 같이 구축하였다. 수치지고도모델(해상도 30 m)과 낙동강 유역 경계 및 하천도를 이용하여 수질오염총량관리 단위유역을 고려한 67개의 소유역을 추출하고 환경부 환경지리정보서비스에서 제공하는 1:25,000 해상도의 중분류 토지피복도와 국립식량과학원에서 제공하는 정밀토양도를 이용하여 1,256개의 HRUs를 생성하였다. 기상자료는 일별 강우량, 최대·최저기온, 풍속, 일사량 및 상대습도 등을 국토해양부 산하 35개 지점과 기상청 산하 21개 지점으로부터 수집·변환하

여 모형에 입력하였다. 댐 방류량은 국가 수자원관리종합정보 시스템으로부터 주요 댐 제원과 일방유량(2004~2009)을 수집하여 입력하였으며 모형에서 관측일 유량법을 적용하여 모의하였다. 또한 2007 상수도 통계연보(환경부, 2008a)를 참조하여 소유역별 생·공용수량을 산정하였으며 농업용수의 경우 하천 유량, 강우량, 수정 Penman식에 의해 증발산량을 산정하여 모형 입력 자료로 활용하였다. 한편, 수질 모의를 위해 2007년 전국 오염원 기초자료(환경부, 2008b)를 수집하여 T-P의 각 수질항목에 대한 배출부하량을 산정하였고 이중 개별 배출부하량과 환경기초시설 부하량을 합산 후 각각의 소유역에 할당하였다. 또한 부유성고형물(Suspended Solids, SS)의 경우 환경기초시설 방류수 수질기준인 10~20 mg/L을 지역적 규제기준을 적용하여 부하량을 산정하여 모형에 입력하였다.

모의기간은 모형의 안정화 기간 2년을 포함하여 총 8년

(2002~2009년)으로 보정은 2007년부터 2009년까지, 검증은 2004년 8월부터 2006년까지 수행하였다. 모형의 보정은 연중 일단위를 중심으로 유량 및 수질모의에 적절한 매개변수를 선정하여 허용범위 내에서 변화시키면서 단순 시행착오법에 의해 수행하였다(장재호와 안종호, 2012). 모형의 검·보정은 본류구간 13개 지점과 지류구간인 30개 지점에 대해 수행하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 전반적으로 유출량, 수질 모두 본류구간에서 지류구간보다 모형의 적용성이 높게 나타났고 수질의 모델예측 효율이 유량에 비해 다소 낮은 경향을 나타내었으며 Donigian (2000)이 제시한 %difference는 35% 이하, R^2 는 0.5 이상의 조건을 만족하는 수준으로 검·보정을 실시하였다.

가뭄과 홍수조건에 의한 수질영향을 모의하기 위해 앞에서 구축된 기상시나리오를 적용하였고 기상조건을 제외한 토지이용 및 배출부하량 등은 2007년 기준으로 동일

Table 2. Calibration and Validation Results of SWAT Model

		Calibration			Validation		
		Flow	SS	T-P	Flow	SS	T-P
Main streams	%diff	10.78	14.93	25.80	8.98	20.58	27.89
	R ²	Flow: 0.88		SS: 0.64		T-P: 0.61	
Tributaries	%diff	14.12	23.69	34.75	14.45	31.12	32.61
	R ²	Flow: 0.80		SS: 0.53		T-P: 0.50

Fig. 2. Development of 28 Unit Sub-basins with SWAT

하게 적용하여 유역모델을 위한 각각의 모의시나리오를 구축하였다. SWAT 모델링을 위한 모의기간은 안정화기간 2년을 포함한 총 3년으로 동일하게 설정하였으며 극한 기후변동에 따른 수문·수질영향을 적절히 분석하고 평가하기 위해 낙동강 유역을 28개 대표유역으로 재구성하여 Fig. 2와 같이 나타내었다.

4. 극한기후변화 영향

4.1 하천유량과 부하량의 공간적 변화

강우조건에 따라 선정된 각 시나리오 모의결과, 낙동강

본류유역과 본류로 유입되는 주요 지류하천 유역의 강우량 및 지표유출량의 공간적 변화는 Figs. 3 and 4와 같다. 강우량의 경우 가뭄년도는 기준년도에 비해 낙동강 유역 전반에 걸쳐 20~65% 범위에서 감소 경향을 보였으며 특히 낙동강 본류를 중심으로 중·하류 서부지역의 강우량이 뚜렷한 감소현상을 나타냈다. 홍수년도의 경우 강우량이 유역 전반에 걸쳐 증가하였는데 낙동강을 경계로 상류지역은 최대 40% 수준까지, 하류지역은 최대 130%수준까지 증가하는 특징을 보였다. 특히, 밀양천과 양산천 유역 그리고 낙동강 하구연에서 2배 이상의 강우량 증가를 나타냈다. 이와 더불어 지표유출의 경우 강우량 조건별로

Fig. 3. Responses to Extremes in Precipitation for the Drought and Flood Periods

Fig. 4. Variations of Streamflow to Extremes in Precipitation (drought and flood)

유사한 공간적 변화경향을 보여주었으며 임하댐 상류유역과 양산천, 밀양강 유역 및 낙동강 하류구간의 본류유역에서 유출량 증가가 뚜렷하게 발생했다. 이로 인해 경남 함안의 백산제와 합천의 함안제가 붕괴돼 침수 피해를 나타낸 바 있다. 가뭄년도의 경우 의성 475mm, 영천 511mm, 안동 513mm, 대구 537mm 등을 기록하였으며 강수량 부족은 그 이듬해인 1995년으로 이어졌다(한국수자원공사, 2006). 기준년도 대비 지표 유출량은 낙동강 상류의 내성천, 임하댐, 영강 유역에서, 그리고 금호강, 회천, 황강, 남강 등의 낙동강 중·하류 서부지역에서 감소현상이 뚜렷이 나타났다.

한편, 오염물질 부하량 변화를 분석한 결과, 가뭄년도의 경우 전반적으로 부하량이 감소할 것으로, 홍수년도의 경우 강우유출 증가에 따라 부하량이 증가할 것으로 예상된다. 그러나 가뭄년도의 SS 부하량의 경우 유출량이 감소함에도 불구하고 반변천 및 안동·임하댐 직하류 본류유역에 걸쳐 부하량 증가 현상을 나타냈다(Fig. 5). 이는 가뭄이 지속되어 불가피한 댐 운영으로 인한 방류효과가 가장 큰 증가 요인으로 작용했으며, 그 밖에 토양수분량의 증감 등 유역에서의 다양한 물리적 요인이 증가원인이 되었다. 유역에서의 토양유실은 강우량이 풍부한 시기에 토양수분이 증가할수록 상당히 감소되며 반면에, 건기 중에

(a) Drought period (1994)

(b) Flood period (2002)

Fig. 5. Variations of SS Load to Extremes in Precipitation (drought and flood)

(a) Drought period (1994)

(b) Flood period (2002)

Fig. 6. Variations of T-P Load to Extremes in Precipitation (drought and flood)

는 토양유실량이 더욱 커질 수 있다(Toy et al., 2002). 한편, 홍수년도에는 상류의 안동댐, 임하댐, 반변천, 내성천, 위천 등의 지류유역과 하류의 황강, 밀양강, 양산천 등의 지류유역에서 100%에서 280%까지 강우유출에 의한 증가 현상을 뚜렷하게 나타내었다. 또한 T-P 부하량의 공간적 변화는 유출 경향과 유사하게 나타났다. 특히 가뭄년도에 부하량이 전반적으로 감소하는 현상이 발생했으며 홍수 년도의 경우 거의 대부분의 지역에서 증가현상을 보였다. 특히, 임하댐, 길안천, 밀양강, 양산천 등의 유역에서의 증가가 두드러지게 나타났다(Fig. 6).

4.2 하천수질의 시계열 변화

극한기후에 따라 가뭄과 홍수년도에 발생하는 부하량의 공간적 특성은 하천 유출수 수질에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있으며 이를 확인하기 위해 Figs. 7 and 8과 같이 가뭄과 홍수가 수질에 미치는 영향을 누적확률로 나타냈다. 그 결과, 가뭄년도의 연간 총 하천유량은 강우량과 비례하여 가장 적으며 당해 연도의 갈수기와 평상시에도 하천유량이 작은 반면에 SS 농도는 기준년도 및 홍수년도와 비교하여 상당히 높게 모의되었다.

Fig. 7. Cumulative Probability Distributions of SS Concentrations

Fig. 8. Cumulative Probability Distributions of T-P Concentrations

특히, 본류구간에서는 하류지역으로 갈수록, 지류는 유역 및 하천규모가 클수록 기준년도 및 홍수년도와의 격차가 크게 나타났다. 일반적으로 건기일수의 증가는 토양수분을 고갈시키며 건조해진 토양은 강우 시 지표유출로 인한 토양유실을 보다 쉽게 발생시키기 때문에 유실되는 부유물질의 농도에 상당한 영향을 준다. 반면에 강우량이 집중되면서 하천 유출량이 증가하는 시기의 SS 농도는 기준년도 및 홍수년도보다도 낮게 모의되었다. 낙동강 유역은 산지가 많이 분포되어 있으며 토질은 samam, daebon, songjeong 등의 양토가 약 40% 정도를 차지하여 유역 전반에 걸쳐 배수가 양호하다. 이러한 산림과 토양표층의 특성으로 강수의 직접적인 충격으로부터 표토를 보호하고 지표유출을 감소시켜 토양이 유실되는 것을 억제할 수 있다. 그러나 60%에 가까운 낙동강 유역의 토양 특성은 비옥도가 낮고 유실이 잘되는 특성으로 인해 산림면적의 감소가 지속되어 토양 유실이 심화되기 쉽다. T-P 농도는 비교적 완만하게 증가하여 유량변화에 따른 민감도가 낮은 것으로 나타났다. 특히, 본류구간의 경우 기준년도의 T-P 농도와 비교하여 전반적으로 낮게 나타났고 반면에 지류구간에서 가뭄년도의 농도가 상대적으로 더 크며 금호C와 남강E 등과 같이 유역 및 하천규모가 클수록 기준년도와의 농도차이가 증가하는 것으로 나타났다.

한편, 홍수년도의 경우에 SS의 농도 변화는 본류구간의 경우 기준년도와 유사하게 모의되었으나 하류로 갈수록

유량변화에 민감하여 급격한 농도의 변화를 나타냈다. 지류구간의 경우도 마찬가지로 농도가 다소 증가하며 금호C와 남강E에서는 급격한 농도의 변화를 나타냈다. TP의 경우 기준년도와 유사하거나 다소 감소하는 경향을 보였는데, 비교적 유량이 풍부한 본류구간과 금호C, 남강E와 같이 유량이 풍부한 지류구간에서 농도 감소현상이 비교적 뚜렷하였다. 반면, 상류지천인 내성B는 강우에 의한 비점오염원에 영향을 받아 기준년도보다 T-P 농도가 연중 높게 모의된 것으로 판단된다.

살펴본 바와 같이 가뭄이나 홍수와 같은 갑작스런 기후 변동은 수질변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특히, 가뭄에 따른 지표유출량의 감소와 장기간 건조한 상태의 지표토양 상태는 오염부하 유출특성을 변화시킨다. 한편, 시간에 따른 연 누적 유출유량 변화와 오염부하량에 대해 일반화하여 각 시나리오에 따른 변화를 비교한 결과, Figs. 9~10과 같다. SS의 경우 하류구간에서는 유량의 증감에 따라 부하량도 유사하게 변화하나 상류구간에서는 건기 시 유출량과 비교하여 부하량 유출률이 낮고 우기로 접어들면서 부하량 유출률이 급격하게 증가하는 S자 형태를 나타낸다. 이러한 경향은 가뭄과 홍수에 따라 변곡되는 시기가 결정되는데, 가뭄년도의 경우 뚜렷한 장마철이 없고 연중 소량의 강우가 꾸준히 내리기 때문에 SS 유출률이 증가되는 시점이 상대적으로 빨리 도달하게 된다. 이와 같은 현상들은 건기일수와 강우패턴에 지배적

Fig. 9. Normalized Cumulative Distributions of Daily SS Loads

Fig. 10. Normalized Cumulative Distributions of Daily T-P Loads

인 영향을 받는 것으로 판단된다.

T-P의 경우에는 시간에 따른 연 누적 유출량과 오염부하량 사이의 관계가 SS와는 정반대의 경향을 나타낸다. 즉, 건기 시 유출량 증가에 따라 T-P 부하량의 유출률이 증가하다가 변곡점을 지나 풍수기 또는 홍수기 지나면서 유출률이 감소하며 유량 증가율과 비교하여 부하량 증가율이 큰 영향을 못 미치는 것을 확인할 수 있으며 변곡점의 시기는 가뭄년도에 더 빨리 도달하는 것으로 나타났다. 이는 우기시 유량이 증가하는 반면, 수질은 회석효과에 의해 개선되면서 T-P 부하량 감소에 영향을 주는 것으로 판단하였다. 특히, 이러한 경향은 상류가 하류보다 뚜렷하고 본류보다는 지류구간에서 더 뚜렷하게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 가뭄, 홍수와 같은 극한기후가 낙동강 유역의 수문과 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 과거 30년간 강우자료를 검토하여 연평균 강우량이 가장 적은 1994년도를 가뭄년도로, “태풍 루사”로 인한 침수 피해를 겪은 2002년도를 홍수년도로 선정하고 2007년을 기준 강우조건으로 하여 SWAT 모형을 구축하고 각각의 시나리오 모의를 통해 지표유출과 오염부하량 발생특성을 살펴 보았다.

강우시나리오에 따른 가뭄년도 모의에서는 강우량 감소에 따라 유출량 감소현상이 유역전반에 걸쳐 뚜렷이 나타난 반면, 홍수년도에는 전반적으로 높은 증가현상을 보였으며 비교적 하류지역에서 뚜렷하게 나타났다. 수질변화의 경우 가뭄년도에 전반적인 부하량 감소현상을, 홍수년도에는 강우유출 증가에 따른 부하량 증가를 예상하였으나 댐 직하류와 같은 특정 유역에서 가뭄년도의 SS 부하량 증가를 나타냈다. 이는 가뭄 시 댐 운영으로 인한 방류효과와 토양수분량의 변화 등 유역의 복잡한 물리적 요인들이 영향을 미치는 것으로 판단되며 정확한 원인규명을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

한편, 수질농도에 대한 누적확률분포를 통해 가뭄과 홍수가 하천수질에 미치는 영향은 SS의 경우 유량변화에 따라 상당히 민감하게 반응하여 기준년도 및 홍수년도에 비해 평수량 및 갈수량 시기에 일정량의 강우를 꾸준히 기록한 가뭄년도가 높은 농도분포를 나타냈다. T-P는 상대적으로 완만한 변화를 보였고 본류구간은 기준년도보다 전반적으로 작게 나타났으며 유량이 비교적 적은 지류구간에서는 높은 농도범위를 나타내었다. 반면, 홍수년도의 경우 SS는 유량변화에 민감하게 반응하여 급격한 증가를 보였으며 농도변화는 기준년도와 유사한 범위에서 나타났다. T-P의 경우는 기준년도와 유사한 범위에서 완만한 형태의 변화를 보였다. 또한 시간에 따른 연 누적 유

출량변화와 오염부하량에 대한 관계에서는 유출량이 작은 건기 시에 SS 부하량 유출이 낮지만 유출량이 증가할수록 부하량이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면, T-P 부하량은 상반된 경향을 나타내는데, 건기 시에 T-P 부하량 유출이 크고 강우 시에는 오히려 작아진다. 이러한 경향은 가뭄년도와 홍수년도에 따라 변곡되는 시기가 서로 다른데, 건기일수와 강우패턴에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 가뭄과 홍수와 같은 극한기후가 유역의 수문변화 및 수질변화와 밀접한 관계가 있음을 시사한다. 극한 홍수년도의 집중호우는 토양유실을 초래하여 특정시기에 하천수질에 막대한 악영향을 주며 특히, 토지 이용 및 식생 변화 등의 유역환경을 변화시키며 이로 인한 하천 유출특성을 바꾸고 비점오염물질에 의한 하천 수질을 악화 및 수생태계 변화 등을 초래할 것으로 예측된다. 이러한 피해의 규모는 당분간 증가하거나 최근의 추세를 유지할 것으로 예상되어 홍수피해에 대한 예방적 투자가 절실하고 보다 효율적인 수자원 관리 및 방재 대책이 요구된다. 또한 극한가뭄이 하천 수질농도의 증가를 초래할 것으로 예측되며 피해를 최소화하기 위해서는 저수지 등의 수리시설이 시기적절하게 잘 이용되어야 하며 안정적인 상수원 및 하천유지용수량의 공급을 위해 다목적 댐의 건설도 검토할 필요가 있다. 이와 같이 극한기후 변화에 대해 적응하기 위한 방안을 수립하기 위해서는 유역 모델링을 통해 하천유출 변화와 유역의 오염물질 거동 특성을 모의하고 정량화하여 적절한 관리방안을 마련해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경정책·평가연구원 녹색성장정책연구(녹색성장연구2011-13)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

기상청 (2009). 한반도 기후변화 추세분석.
박종윤, 박민지, 안소라, 김성준 (2009). “기후변화가 충주댐 유역의 하천수질에 미치는 영향평가를 위한 유역 모델링.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제10호, pp. 877-889.
유승환 (2009). 기후변화에 따른 미래 농업가뭄 특성 분석, 서울대학교 박사논문.
이아연, 김상단 (2011). “낙동강 유역 환경유량에 대한 기

후변화의 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.
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.
최대규, 김문성, 김남원, 김상단 (2009). “CGCM 미래기후정보를 이용한 기후변화가 병성천 유역 수문 및 수질반응에 미치는 영향분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 921-931.
한국수자원공사 (2006). 가뭄관리정보체계 수립 보고서.
한수희, 유가영, 김상단 (2009). “식생 물 부족지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제4호, pp. 507-514.
환경부 (2008a). 2007년 상수도 통계연보. pp. 305-395.
환경부 (2008b). 2007년 전국오염원 기초조사자료.
Bouraoui, F., Galibati, L., and Bidoglio, G. (2002). “Climate change impacts on nutrients loads in the Yorkshire ouse catchment (UK).” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6, No. 2, pp. 197-209.
Bouraoui, 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.
Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *The Physical Science Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
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.
- 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.
- Toy, T.J., Foster, G.R., and Renard, K.G. (2002). *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control*. John Wiley & Sons. Inc.
- 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.
- Varanou, E., Gkouvatsou, E., Baltas, E., and Mimikou, M. (2002). “Quantity and Quality Integrated Catchment Modeling under Climate Change with use of Soil and Water Assessment Tool Model.” *Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 228–244.

논문번호: 12-012	접수: 2012.02.06
수정일자: 2012.04.12/05.21 2012.06.04/07.23	심사완료: 2012.07.23